

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
(MAÎTRISE PROLONGÉE DE L'UQAM)

LES MOUVEMENTS SUBAÉRIENS D'ÉROSION DES BERGES :
ÉTUDE DE CAS D'UNE BERGE EN ÉROSION, RIVIÈRE OUELLE, QUÉBEC

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉOGRAPHIE

PAR
VALÉRY B. HAMEL

JANVIER 2012

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski 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 Rimouski 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

Tout d'abord, merci aux bailleurs de fonds, sans qui cette recherche n'aurait pu être possible : le Conseil de Recherche en Sciences naturelles et en Génie (CRSNG) et le Laboratoire de géomorphologie et de dynamique fluviale de l'UQAR. Merci aussi à Yves, Yolande et François, pour l'accès à votre terrain, sans vous nous n'aurions recueilli aucune donnée pour réaliser ce mémoire!

De nombreuses personnes ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail, je tiens donc à vous remercier. Merci aux gens du labo pour votre entrain et votre support. Sylvio Demers, merci de m'avoir à plusieurs reprises ramenée à la réalité et rappelé que oui parfois on veut tout laisser tomber. Sylvio je te dois beaucoup avec le logiciel Cyclone, sans toi, je n'y serais jamais arrivée. Geneviève Allard, merci pour nos folies que nous partageons si facilement toi et moi, pour ta patience et pour ta profondeur. Taylor Olsen, merci de dédramatiser tout et tout le temps, pour le plaisir d'être avec toi sur le terrain et pour les nombreux échanges musicaux. Suzan M. Taylor, je te dois mon intégration, des moments de folies, des bonnes bouffes... Merci pour ton aide sur le terrain, pour tes multiples conseils d'ordi et pour ton rire contagieux.

Merci à tous mes « *helpers* » de terrain!!! Merci à Maxime Boivin, Jean-Philippe Marchand, Stéphane Babin, Suzan M. Taylor, Geneviève Allard, Xavier Brigaudet, Thomas Buffin-Bélanger, Stefanie Van-Wiersts, Joachim Bobinet, Audrey Mercier-Rémillard et Danny Lechasseur. Merci beaucoup! Bernard Héту merci pour ton support, ton soutien et tes commentaires!!! Merci pour ton sens de l'humour et ta sensibilité. Ta présence est toujours agréable.

Merci à tous ceux qui ont participé d'un peu plus loin. Béragère Simard merci pour ton support. À ma famille, merci pour votre présence. Michel et Johanne merci pour le chalet... et Dubaï... sérieusement merci encore! Un merci particulier à mon homme Alexandre Bourdage, merci pour ton support, mais surtout pour ta compréhension. Merci de me permettre de décompresser en si bonne compagnie.

Certains sont plus difficiles que d'autres à remercier compte tenu de leur implication autant émotive que physique dans cette grande aventure. « The last but not least », le seul et unique Thomas Buffin-Bélanger. Mon directeur dévoué, à l'écoute et présent. Tom, merci de m'avoir donné cette chance alors que je partais de loin... merci de m'avoir soutenue, merci de m'avoir laissée prendre ma place dans mon projet et trouvé ma voie... un peu trop parfois!!! Tu m'as appris la rigueur. En toi, j'ai vu la flamme et la passion. Ce qu'il me reste à faire, c'est de transmettre cette passion comme tu me l'as si bien appris... MERCI MILLE FOIS!

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	IV
TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES FIGURES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
RÉSUMÉ	X
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I LES PROCESSUS CONTRIBUANT À L'ÉROSION DES BERGES EN MILIEU TEMPÉRÉ FROID : CONNAISSANCES ET LACUNES.....	3
1.1 INTRODUCTION	3
1.2 LES PROCESSUS CONTRIBUANT À L'ÉROSION DES BERGES	3
1.2.1 L'érosion fluviale	3
1.2.2 Les mouvements de masse	6
1.2.3 Les mouvements subaériens	9
1.3 L'INTERACTION DES PROCESSUS.....	15
1.3.1 La notion d'équilibre des berges	16
1.3.2 La distribution spatiale des processus dans le corridor fluvial	18
1.3.3 La fréquence et l'amplitude des processus d'érosion des berges	19
1.4 CONCLUSION	20
CHAPITRE II OBJECTIFS ET MÉTHODES.....	21
2.1 INTRODUCTION	21
2.2 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE	21
2.3 DESCRIPTION DES SITES D'ÉTUDE.....	22
2.3.1 Bassin versant de la rivière Ouelle	22
2.3.2 Le site Saint-Onésime	25
2.3.3 Le site Fosse de la courbe.....	27
2.4 MÉTHODOLOGIE.....	29
2.4.1 Acquisitions des données	29
2.4.2 Traitements des données	34

2.4.3	Résultats du site Fosse de la courbe.....	44
2.5	CONCLUSION	46
CHAPITRE III CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE L'ÉROSION DES BERGES : LES		
MOUVEMENTS SUBAÉRIENS SUR UNE BERGE DE LA RIVIÈRE OUELLE, QUÉBEC,		
CANADA.....		
		47
3.1	INTRODUCTION	50
3.2	SITE D'ÉTUDE	52
3.3	MÉTHODOLOGIE	52
3.3.1	Séries photographiques de la berge	53
3.3.2	Les modèles de terrain à haute résolution.....	54
3.3.3	Les conditions météorologiques	55
3.4	RÉSULTATS.....	56
3.4.1	Caractéristiques des mouvements subaériens sur la berge.....	56
3.4.2	La chronologie des mouvements subaériens.....	57
3.4.3	Les changements morphologiques.....	58
3.5	DISCUSSION	59
3.5.1	Contribution saisonnière des mouvements subaériens à l'érosion des berges	59
3.5.2	Changements environnementaux et processus subaériens.....	60
3.6	CONCLUSION	62
CONCLUSION GÉNÉRALE		73
RÉFÉRENCES.....		75

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Érosion fluviale sur la rivière Rouge, Bas-Saint-Laurent (Photo Suzan M. Taylor).....	5
Figure 1.2 Les différents mouvements de masse observables sur les berges selon le type de matériau qui constitue les berges. (Tirée de Lawler <i>et al.</i> , 1997).....	8
Figure 1.3 L'érosion par l'eau par les trois processus principaux : 1) les gouttes de pluie, 2) le ruissellement et 3) l'érosion interne.	12
Figure 1.4 L'action des aiguilles de glace sur une berge (Tirée de Lawler, 1993a).	13
Figure 1.5 Mouvements subaériens sur la rivière à Pierre, Gaspésie (photo : Caméra Reconyx) a) 13 mars 2009 12h00PM b) 14 mars 2009 11h00AM	14
Figure 1.6 Schématisation du concept d'équilibre des berges. Les chiffres suivent les étapes indiquées dans le texte. Modifiée de Brierley et Fryirs (2005).....	17
Figure 1.7 Schéma représentant les trois mécanismes d'érosion des berges selon leur « dominance » à l'échelle d'un bassin versant et d'un cours d'eau.	19
Figure 2.1 a) Localisation géographique des sites à l'étude dans le bassin versant de la rivière Ouelle (source BNDT, image Google Earth, 2007) b) localisation des sites sur le profil longitudinal de la rivière Ouelle (source SoftMap).....	24
Figure 2.2 a) Berge à l'étude, b) accumulation de sédiments grossiers à la base de la berge agissant comme protection naturelle (dimension de l'échelle : 17.5x14.5 cm), c) granulométrie de la berge (longueur du crayon 16cm), d) profil de la berge à l'étude (Photos a : Caméra Reconyx; b et c : Valéry B. Hamel).....	26
Figure 2.3 a) Berge à l'étude et son enrochement à la base, b) granulométrie de la berge et présence de lentilles d'argile, c) et d) profil de la berge (Photos Jean-Philippe Marchand).	28
Figure 2.4 Outil de travail principal : le Leica ScanStation II (photo Valéry B. Hamel).	32
Figure 2.5 Comparaison des différences dans les scans obtenus à l'aide de trois types de cibles (Kersten <i>et al.</i> , 2008).....	34
Figure 2.6 Séparation de la berge en différentes zones pour faciliter l'observation des processus et pour spatialiser les événements.	37
Figure 2.7 Petites avalanches survenues le 26 janvier 2010 sur le site Saint-Onésime.	38
Figure 2.8 a) Points x,y,z observés dans Cyclone, b) points x,y,z une fois la végétation retirée par Cyclone II topo.....	41
Figure 2.9 Résultat visuel des 12 méthodes d'interpolation disponibles avec le logiciel Surfer.	42

Figure 2.10 Modèle numérique des différences d'élévation pour le site Fosse de la courbe entre août 2009 et mai 2010.	45
Figure 3.1 - Localisation du site d'étude dans le bassin versant de la rivière Ouelle.	64
Figure 3.2 - a) Berge du site Saint-Onésime. b) profil de la berge Saint-Onésime. (Photo Caméra Reconyx).	65
Figure 3.3 - Mouvements subaériens observés sur la berge Saint-Onésime 2009-2010 mis en relation avec la température de l'air et les précipitations à la station météorologique La Pocatière.....	66
Figure 3.4 - Modèles numériques des différences d'élévation (MNDE) pour le site Saint-Onésime entre août 2009 et mai 2010.	67
Figure 3.5 - Modèle conceptuel montrant l'influence des changements climatiques sur l'érosion des berges en se basant sur le concept d'équilibre des berges.	68

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Processus et mouvements internes et externes subaériens d'érosion des berges	10
Tableau 1.2	Facteurs et paramètres principaux contrôlant l'érosion des berges	15
Tableau 1.3	Les processus observés selon leur fréquence et leur intensité relatives.....	20
Tableau 2.1	Données morphologiques, sédimentologiques et hydrologiques principales des sites d'étude.....	29
Tableau 2.2	Les processus subaériens recensés sur la berge du site Saint-Onésime et leur définition respective.	36
Tableau 2.3	Calcul de l'erreur-type selon les différentes méthodes d'interpolation du logiciel Surfer 8.0.....	43
Tableau 2.4	Étapes de traitement des données	43
Tableau 3.1	Les processus subaériens recensés sur la berge Saint-Onésime et leur définition respective	69
Tableau 3.2	Type de mouvements et leur récurrence selon leur position sur la berge et leur amplitude.....	70
Tableau 3.3	Moyennes des précipitations (mm) et des cycles gel-dégel survenu dans les dernières 24 heures, 48 heures et lors de la dernière semaine pour chacun des processus répertoriés	71
Tableau 3.4	Gains nets (mm) provenant des MNDE pour le site Saint-Onésime divisés selon le haut, le centre et le bas de la berge.....	72

RÉSUMÉ

Ce mémoire traite des processus d'érosion des berges en bordure des cours d'eau. Trois processus distincts agissent en interrelation et contribuent à l'érosion des berges: les mouvements de masse, l'érosion fluviale et les mouvements subaériens. Alors que la grande majorité des études traite de l'érosion fluviale et des mouvements de masse, cette recherche axe davantage sur les processus subaériens, moins bien documentés. En effet, les mouvements subaériens sont généralement considérés comme un mécanisme préparatoire affaiblissant la berge et facilitant l'érosion par les deux autres processus. Ainsi, cette étude examine les mouvements subaériens en tant que processus érosifs à l'aide d'observation *in situ* permettant de décrire et de quantifier leur contribution à l'érosion des berges. Pour ce faire, une berge en érosion sur la rivière Ouelle, Québec, est étudiée à l'aide de levés topographiques mensuels issus d'un LIDAR terrestre (Scan-station II de Leica). Les levés couvrent une période permettant de suivre l'évolution saisonnière des processus érosifs. De plus, une analyse qualitative des processus contribuant à l'évolution de la berge est faite à l'aide d'une série photographique horaire issue d'une caméra automatisée installée en permanence sur le site. Les variations saisonnières des taux d'érosion liés aux mouvements subaériens sont mises en relation avec les données météorologiques d'Environnement Canada. Le suivi d'une berge en érosion montre que les mouvements subaériens peuvent représenter un processus érosif au même titre que les mouvements de masse et l'érosion fluviale lorsqu'observé sur une longue période de temps. Les variations temporelles soulignent l'importance de considérer les saisons pour mieux évaluer l'amplitude et la fréquence de la contribution des différents processus à l'érosion des berges.

Mots clés : Érosion des berges, Mouvements subaériens, Volume d'érosion et d'accumulation, LIDAR terrestre.

INTRODUCTION

Les rivières alluviales se forment dans des sédiments qu'elles transportent et déposent par elles-mêmes (Church, 2006). Elles forment un système complexe, comprenant des sédiments déposés et des sédiments en transfert ayant été érodés dans leur bassin versant (Macklin et Lewin, 2008). La dynamique morphologique des rivières est en grande partie causée par l'apport sédimentaire provenant de l'érosion des berges. Les processus d'érosion des berges des cours d'eau représentent un facteur important dans les changements morphologiques des rivières : développement des méandres, ajustement de la largeur des chenaux (Casagli *et al.*, 1999; Dapporto *et al.*, 2001), migration latérale (Lawler, 1992; Couper et Maddock, 2001). Ils sont par conséquent responsables de la transformation d'une grande partie des plaines alluviales.

L'érosion des berges peut représenter un problème important lorsqu'il est question d'aménagements fluviaux (Dapporto *et al.*, 2001). L'érosion correspond aussi à un processus écologique nécessaire (Piégay *et al.*, 1997) en contribuant par exemple à la succession végétale à l'intérieur de chenaux abandonnés (Salo *et al.*, 1986). L'érosion des berges est un phénomène qui intègre le transfert de sédiments, l'évolution des rivières et la survie des écosystèmes (Florsheim *et al.*, 2008). La compréhension des processus qui façonnent les rivières devient donc fondamentale pour expliquer le développement des systèmes fluviaux (Hooke, 1979). Trois grands types de processus se retrouvent dans la littérature : les mouvements de masse, l'érosion fluviale et les mouvements subaériens. Cependant, une incertitude demeure quant à la contribution relative de chacun des processus et, plus spécifiquement, sur l'apport en sédiment de chacun d'eux (Lawler, 1995). Cette incertitude est en partie due au fait que le rôle de chacun des processus est fonction de l'hydrométéorologie du système fluvial et du matériel qui constitue les berges, mais elle est aussi due au fait qu'ils peuvent survenir en concomitance et à des fréquences et amplitudes très variables.

Le présent mémoire vise à développer nos connaissances concernant l'érosion des berges de cours d'eau en milieu tempéré froid. Il a pour objectifs d'étudier et d'analyser les processus subaériens contribuant à l'érosion des berges 1) en décrivant des processus subaériens contribuant à l'évolution d'une berge dans un cycle annuel, 2) en proposant une quantification des volumes de sédiments mobilisés par ces processus subaériens et 3) en liant l'activité des processus subaériens aux conditions hydrométéorologiques régionales. La rencontre de ces objectifs se fait par la mise en place d'une méthodologie originale. La description des processus est réalisée à l'aide d'une caméra Reconyx orientée vers la berge en érosion. Une série chronologique horaire de photographies révèle l'occurrence, l'amplitude et la position sur la berge de plusieurs processus subaériens sur une base

annuelle. Les volumes d'érosion proviennent de relevés mensuels à l'aide d'un LIDAR terrestre durant l'année 2009-2010. Ces relevés permettent d'extraire des taux d'érosion à l'aide de modèles numériques de terrain à haute résolution. Finalement, les séries chronologiques de photographies et les taux d'érosion sont mis en relation avec les données hydrométéorologiques régionales. Initialement, deux sites ont été choisis pour réaliser cette étude sur la rivière Ouelle dans le Bas-Saint-Laurent : Saint-Onésime et Fosse de la courbe. Le site Fosse de la courbe s'est avéré excessivement difficile d'accès avec tout notre matériel pour réaliser un suivi à haute résolution temporelle à l'aide du LIDAR en plus de ne disposer que d'une caméra Reconyx. Aussi, seul le site Saint-Onésime a permis de réaliser une analyse mensuelle des processus subaériens. Une analyse annuelle du site Fosse de la courbe a cependant pu être réalisée.

Le mémoire comporte une introduction, trois chapitres principaux et une conclusion générale. Le premier chapitre présente une revue de littérature sur l'érosion des berges. Le second chapitre traite de la problématique, des objectifs de recherche, du site d'étude et de la méthodologie utilisée. Le troisième chapitre est un article scientifique traitant des résultats obtenus durant la présente étude. Il permet d'approfondir nos connaissances sur l'érosion des berges, mais surtout de discuter des recherches à envisager pour mieux comprendre l'érosion des berges en milieu fluvial. Ce chapitre-article a été soumis à la revue *Géomorphologie : relief, processus, environnement*.

CHAPITRE I

LES PROCESSUS CONTRIBUANT À L'ÉROSION DES BERGES EN MILIEU TEMPÉRÉ

FROID : CONNAISSANCES ET LACUNES

1.1 INTRODUCTION

L'érosion des berges des cours d'eau est contrôlée par trois types de processus : les mouvements de masse, l'érosion fluviale et les mouvements subaériens (Hooke, 1979; Thorne, 1982; Lawler, 1992; Couper et Maddock, 2001; Couper, 2003). Les mouvements de masse et l'érosion fluviale sont bien documentés et perçus comme étant les processus responsables de l'érosion des berges. Plusieurs auteurs (*e.g.* Abernethy et Rutherford, 1998; Luppi *et al.*, 2009) considèrent les mouvements subaériens comme des processus préparatoires à l'érosion en augmentant les taux de recul des berges produits par les deux autres processus (Couper, 2003). Selon le concept d'équilibre des berges (Carson et Kirkby, 1972; Thorne et Tovey, 1981), l'érosion fluviale et les mouvements de masse sont interdépendants, ce qui les rend difficilement observables individuellement. Il devient alors complexe de départager chacun des processus pour déterminer la contribution de chacun à l'érosion des berges. S'ils sont en effet accentués par les processus subaériens, une meilleure compréhension de chacun des processus s'impose. Le présent chapitre présente un bref bilan des connaissances acquises pour chacun des processus et discute de la difficulté de décrire la contribution relative de chacun des processus dans l'évaluation des taux d'érosion des berges.

1.2 LES PROCESSUS CONTRIBUANT À L'ÉROSION DES BERGES

Chacun des processus est contrôlé par des facteurs principaux qui accentuent ou minimisent leur rôle dans les taux de recul des berges. La section 1.2 focalise sur les facteurs de contrôle de chacun des processus. La section sur les mouvements subaériens est plus étoffée puisque la recherche porte sur ces processus.

1.2.1 L'érosion fluviale

L'érosion fluviale dans des rivières alluviales s'exprime par le détachement et l'entraînement de particules sur les berges par l'action hydraulique. Comme elle est grandement contrôlée par les propriétés des berges, elle est généralement abordée selon deux types de berge : les berges non

cohésives et les berges cohésives (Thorne, 1982). Les berges non cohésives sont principalement le résultat de dépôts amenés par le chenal lui-même. Les rivières sableuses sont composées en grande partie de sable qu'elles transportent facilement même sous de faibles débits. Les rivières graveleuses comportent des sédiments plus grossiers, tels des cailloux et des graviers, mobilisés seulement sous de forts débits. Les rivières à bloc sont constituées de sédiments très grossiers (>256 mm) qui ne bougent que très rarement (Knighton, 1998).

L'érosion par l'action hydraulique d'une berge non cohésive se fait généralement par le retrait de particules une à une dû à un déséquilibre entre les forces qui contribuent au mouvement et les forces qui résistent au mouvement. Sur des berges non cohésives, l'érosion fluviale représente le processus le plus actif (Knighton, 1998). De manière très fréquente, les travaux de Shields (1936), sur les lits des cours d'eau, sont cités (*e.g.* Buffington et Montgomery, 1997) pour expliquer la mise en mouvement d'une particule. Trois forces agissent sur une particule et déterminent si elle entre ou non en mouvement : la force de gravité, la force de soulèvement et la force de poussée. Il y a mouvement lorsque la force de soulèvement et la force de poussée sont plus grandes que la force gravitationnelle.

Les travaux de Shields (1936) sur l'initiation du mouvement sont souvent critiqués puisqu'ils reflètent des résultats obtenus dans des conditions idéales où chacune des particules est identique en termes de grosseur et de poids alors que la vitesse est contrôlée de façon expérimentale. La distribution des caractéristiques de vitesse, de la contrainte de cisaillement et de la turbulence ont une forte influence sur le potentiel érosif de l'action hydraulique (Knighton, 1998). Ainsi, dans des milieux naturels, les calculs ne peuvent s'appliquer de façon aussi simple. D'ailleurs Lawler *et al.* (1997) indiquent que la forme des sédiments peut les mener à s'imbriquer si fortement les uns, les autres que seule l'action préalable des processus subaériens peut rendre la berge susceptible à l'entraînement par l'eau. Les travaux de Shields (1936) sont en outre plus axés sur le lit des rivières et doivent donc considérer la pente de la berge pour être applicables totalement à l'érosion des berges des cours d'eau. Quoiqu'il en soit, les forces hydrauliques peuvent être séparées en deux groupes : celles qui agissent près de la surface de l'écoulement, incluant les vagues produites par le vent et les embarcations nautiques, et celles qui agissent près de la base de la berge et tendent à créer un porte-à-faux (Knighton, 1998).

L'érosion d'une berge cohésive par l'action hydraulique sur les particules fines se fait généralement par l'entraînement d'agrégats (Thorne, 1982). Les forces en jeu sont les mêmes que pour une berge non cohésive, cependant la force électrochimique de l'eau contenue dans les pores rend le calcul du taux de recul un peu plus complexe (Simon et Collison, 2002). Wynn et Mostaghimi (2006) avancent par exemple que la concentration en sel (sodium, potassium, calcium, et magnésium) du sol est un indicateur de la force ionique de l'eau dans les pores, ce qui influence la dispersion des argiles.

De plus, le pH et la conductivité électrique de l'eau contenue dans les pores stabilisent ou déstabilisent le sol et ont ainsi un impact direct sur l'érosion. Notons ici que la connaissance du rôle des forces électrochimiques, entre les particules cohésives et l'écoulement, est encore limitée.

Les chercheurs travaillant à mesurer l'érosion fluviale soulignent tous l'impact des processus « préparatoires » subaériens sur le taux de recul global des berges et réussissent rarement à séparer les deux processus en cause. De plus, les forces appliquées sur les particules ou les agrégats de particules sont difficilement mesurables. Par conséquent, des paramètres hydrauliques tels les débits ou la puissance spécifique (débit * pente) d'un cours d'eau sont mesurés pour ensuite être mis en relation avec l'évolution des berges par la mesure des taux de migration. Par exemple, Wolman (1959) conclut qu'un événement de crue estivale qui attaque des berges sèches produit moins d'érosion que de plus petits débits d'hiver qui attaquent des berges humides. Hooke (1979) remarque que l'érosion des berges est fonction de l'aire de drainage et du pourcentage d'argile et de limon contenu dans les matériaux qui constituent les berges. Knighton (1998) explique que l'érosion est très reliée aux conditions de vitesse près des berges et particulièrement au gradient de vitesse très près des berges ce qui détermine l'amplitude de la force hydraulique. Julian et Torres (2006) concluent, pour leur part, que l'érosion des berges par l'action hydraulique est contrôlée par l'intensité des pics de crue. La figure 1.1 montre une berge subissant de l'érosion fluviale sur la rivière Rouge, Bas-Saint-Laurent.



Figure 1.1 Érosion fluviale sur la rivière Rouge, Bas-Saint-Laurent (Photo Suzan M. Taylor).

1.2.2 Les mouvements de masse

Les mouvements de masse sont des processus érosifs directement contrôlés par la gravité et par la composition des berges. Les mouvements de masse représentent un apport ponctuel en sédiments au cours d'eau. Millar et Quick (1998) indiquent que les mouvements de masse représentent un processus par lequel des blocs de matériaux s'effondrent en masse. La susceptibilité des mouvements de masse dépend de la géométrie, de la structure et des propriétés des matériaux des berges (Knighon, 1998). Les mouvements de masse sont souvent caractérisés selon leurs surfaces de rupture qui dépend fortement de la composition des berges. Thorne et Tovey (1981) analysent le rôle des types de berges sur les mouvements de masse. Ils les classent dans trois catégories qui seront explicitées ici : les berges non cohésives, les berges cohésives et les berges stratifiées. La figure 1.2 présente des schémas des trois différentes catégories accompagnés d'une image permettant de bien visualiser les notions présentées ici.

Les berges cohésives sont généralement constituées de sables fins, de limon et d'argile déposés par la rivière elle-même (Thorne et Osman, 1988) ou par une mer postglaciaire (Dionne et Pfalzgraf, 2001) et sont conséquemment mal drainées. Les mouvements de masse sont grandement contrôlés par la géométrie de la berge. Une berge basse, possédant fréquemment une pente abrupte (plus de 60 °), a tendance à subir des glissements suivant une surface plane préalablement affaiblie par une fissure de tension permettant alors aux sédiments de tomber en bloc. La figure 1.2 reprend une photo de Charlton (2008) d'une berge en érosion sur la rivière Ure en Angleterre. Elle permet de bien voir la pente très abrupte et le mouvement en bloc qui en découle dans un contexte de berge cohésive. Une berge plus imposante avec un angle de pente inférieur à 60° est plutôt exposée à des glissements rotationnels (Thorne, 1988, tiré de Lawler *et al.*, 1997). Les mouvements rotationnels sont très dommageables en terme de perte de terrain et se produisent sur des berges hautes (Simon, 1989; Thorne, 1990) puisque la contrainte de cisaillement augmente plus rapidement avec la profondeur que la résistance au cisaillement (Lawler *et al.*, 1997). Dans des circonstances extrêmes, la berge peut se liquéfier (Brierley et Fryirs, 2005).

Les berges non cohésives constituées de sable grossier, de gravier et de blocs principalement hérités de glaciations antérieures et d'alluvions sont en général bien drainées. La stabilité des berges dépend de la pente de la berge et de la friction interne entre les grains (Knighon, 1998; Thorne et Osman, 1988). Les mouvements gravitaires interviennent quand l'angle de la pente est supérieur à la force de friction entre les grains (Osman et Thorne, 1988). La stabilité peut être compromise par l'action de processus subaériens qui affaibliront la berge en diminuant l'angle de friction et la compaction des grains (Thorne, 1982). Les mouvements de masse dans des berges bien drainées sont

principalement superficiels puisque la pression interstitielle créée par l'eau est absente éliminant la force électrochimique intergranulaire (Lawler *et al.*, 1997). Sur la deuxième ligne de la figure 1.2, nous retrouvons une image d'un mouvement de masse survenu sur la Rivière-au-Renard en Gaspésie suite à une importante inondation en 2007. Alors que des sédiments ont été apportés par l'action hydraulique, un glissement en plan s'est manifesté suite au retrait de l'eau. Une partie du haut de berge est encore accrochée à la berge par la présence de petites racines qui maintiennent fortement les sédiments ensemble. Le rôle de la végétation dans les mouvements de masse est encore difficilement identifiable et peut être positif ou négatif, *i.e.* que la végétation peut engendrer ou réduire la susceptibilité d'une paroi à subir un mouvement de masse (Thorne, 1990). Les racines renforcent le sol, mais cet effet est moindre lorsque la hauteur de la berge est de loin supérieure à la longueur des racines. Cependant, par la présence d'une grande densité de végétation, la quantité d'humidité contenue dans le sol diminue. De ce fait, la végétation réduit l'apparition de condition d'humidité extrême dans la berge tout en permettant de limiter le nombre de mouvements de masse (Robert, 2003).

Les berges stratifiées représentent une succession de sédiments cohésifs et non cohésifs en strates. Les strates non cohésives sont constituées de dépôts de sable et gravier provenant d'anciens bancs alors que la portion cohésive est constituée de sédiments argilo-limono-sableux représentant des dépôts de débordement (Thorne et Tovey, 1981; Thorne, 1982) ou hérités de la dernière glaciation. Le plan de glissement dans des berges stratifiées peut traverser une seule couche, mais peut aussi pénétrer plusieurs couches (Thorne et Lewin, 1979). Les couches non cohésives, se situant sous les couches cohésives de débordement, ont tendance à subir une érosion accélérée laissant les couches cohésives en surplomb (Thorne et Tovey, 1981; Brierley et Fryirs, 2005). Les couches cohésives sont résistantes au fluide, mais tendent à avoir une faible résistance au cisaillement et deviennent alors susceptibles aux effondrements (Thorne et Tovey, 1981). La troisième ligne de la figure 1.2 montre une image d'un tel glissement sur la rivière Rouge dans le Bas-Saint-Laurent.

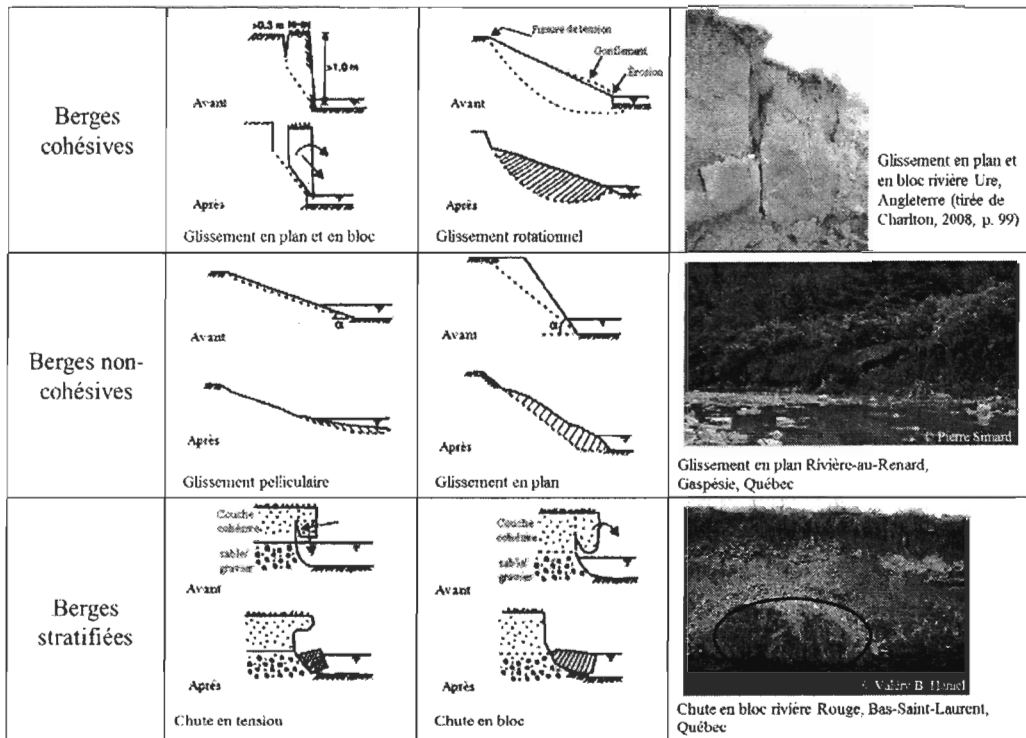


Figure 1.2 Les différents mouvements de masse observables sur les berges selon le type de matériau qui constitue les berges. (Tirée de Lawler *et al.*, 1997).

1.2.3 Les mouvements subaériens

Les mouvements subaériens¹ sont mentionnés dans plusieurs études (e.g. Thorne et Osman 1988; Dietrich et Gallinatti, 1991) tout comme les facteurs qui les contrôlent. Cependant, il est très difficile de trouver de l'information les décrivant mis à part qu'ils contribuent à l'affaiblissement des berges. Les données ayant trait aux taux d'érosion des berges par les processus subaériens sont très rares dans la littérature (e.g. Lawler, 1993a; Prosser *et al.*, 2000; Couper et Maddock, 2001), ce qui ne permet pas de comparer leur contribution avec les autres processus. Même si plusieurs auteurs considèrent qu'ils ne représentent pas un processus érosif (e.g. Thorne et Tovey, 1981; Thorne, 1982; Charlton, 2008) et qu'il importe d'étudier les processus d'érosion dominants, *i.e.* les mouvements de masse et l'érosion fluviale (Rinaldi et Darby, 2007; Abernethy et Rutherford, 1998; Rinaldi et Casagli, 1999), les mouvements subaériens méritent malgré tout une attention particulière.

La reconnaissance des processus subaériens débute avec les études de Wolman (1959) lorsqu'il remarque l'action érosive de la glace et des précipitations sur les berges de la rivière Watts Branch dans le Maryland. Ces observations qualitatives sont secondées par Twidale (1964). Leur action « préparatoire » à l'érosion des berges devient alors connue; certains chercheurs par la suite mentionnent qu'ils ont un rôle considérable à jouer dans les taux de recul des berges (e.g. Hooke, 1979, 1980; Thorne 1982) sans jamais réussir à mesurer leur apport sédimentaire. Lawler (1993a) donne un coup d'envoi pour la quantification d'un des processus subaériens, l'action des aiguilles de glace (pipkrakes). Par la suite, Prosser *et al.* (2000) indiquent un faible taux de recul dans un canal incisé de Tasmanie ($13 \text{ mm} \pm 2 \text{ a}^{-1}$) dû à l'action de la glace et à la dessiccation du sol. Puis, Couper et Maddock (2001) tentent de faire changer le paradigme concernant l'érosion des berges lorsqu'ils ont mesuré les trois grands types de processus (mouvements de masse, érosion fluviale et mouvements subaériens) leur permettant de comparer les contributions relatives de chacun pour leur période d'étude. En effet, tel que mentionné précédemment, plusieurs auteurs (e.g. Rinaldi et Darby, 2007; Abernethy et Rutherford, 1998; Thorne et Tovey, 1981) identifient l'érosion fluviale et les mouvements de masse comme étant les principaux processus d'érosion des berges des cours d'eau.

¹ La terminologie française pour les mouvements subaériens n'est pas encore définitive. Selon le Dictionnaire des Sciences de la Terre de Moureau et Brace (2000) le mot subaérien signifie : « Au contact de la couche inférieure de l'atmosphère; se dit des conditions ou des processus dont l'évolution se fait à l'air libre ». Dans le cadre de ce mémoire, les mouvements dits « subaériens » correspondent à tous les déplacements de particules ayant lieu sur la partie extérieure des berges des cours d'eau *i.e.* la partie supérieure des berges qui ne touche pas à l'eau de la rivière sauf la partie basale lorsque celle-ci est en période de crue. Comme nous le verrons, ces mouvements se distinguent des mouvements de masse puisqu'ils représentent des apports sédimentaires de faible amplitude, mais de très forte fréquence. Aussi, plusieurs processus distincts sont en jeu avec la gravité pour générer les mouvements le long de la berge.

Couper et Maddock (2001) pour leur part, indiquent que ces processus sont bel et bien responsables de l'érosion des berges, mais que les mouvements subaériens, trop longtemps considérés comme uniquement préparatoires, procurent un apport en sédiment du même ordre de grandeur que les mouvements de masse et l'érosion fluviale. Les processus subaériens sont contrôlés par différents processus internes et externes (Thorne, 1982). Un résumé de ces différents processus recensés dans la littérature est présenté dans le tableau 1.1. En gras, les processus qui seront documentés dans la présente recherche sont indiqués. Parmi ces différents processus, trois d'entre eux sont fréquemment mentionnés dans les écrits : les cycles humidification-dessiccation, l'érosion par l'eau et les cycles gel-dégel. Ceux-ci sont donc décrits en détail dans le texte qui suit.

Tableau 1.1
Activités internes et externes subaériennes d'érosion des berges

Internes	De surface
Pression interstitielle (fonction de l'humidité et de la granulométrie)	Érosion pluviale
Cycle humidification-dessiccation	Écoulement de surface, ruissellement
Glace (glace de ségrégation; lentilles et aiguilles)	Reptation, solifluxion, gélifluxion, avalanche
Infiltration, lessivage	Aiguille de glace, thermoclastie
Suffosion	Transport éolien
	Bioturbation
	Décrochement, chute de bloc, chute d'arbre

Les cycles humidification-dessiccation

La quantité d'eau contenue dans une berge peut diminuer ou accentuer sa stabilité, soit par une humidité extrême ou encore par une dessiccation. En effet, les cycles d'humidification-dessiccation diminuent la stabilité des berges en créant un mouvement de dilatation puis de contraction du sol (Robert, 2003). Green *et al.* (1999) montrent que les fissures de dessiccation qui se forment dans des berges principalement constituées de sédiments fins sont une des formes d'érosion principales sur les tributaires de la rivière Namoi en Australie. Prosser *et al.* (2000) concluent également que l'érosion estivale des berges argileuses du canal Ripple Creek en Tasmanie est le résultat des processus subaériens de dessiccation. De plus, une immersion rapide d'une berge d'argile sèche peut amener la surface à s'éroder par relâchement. En fait, la surface de la berge devient saturée en eau et emprisonne

l'air à l'intérieur de la berge. La pression de l'air interne peut produire une pression suffisamment grande pour causer des fissures selon un plan parallèle à la surface de la berge (Thorne, 1982). Ces cycles de contraction et d'expansion du sol peuvent être contrôlés et limités simplement par la présence de végétation et de leurs racines dans le sol (Abernethy et Rutherford, 1998).

L'érosion par l'eau

L'eau qui circule à l'intérieur comme à la surface de la berge est considérée comme un facteur d'érosion très important. Cela représente l'infiltration, la percolation et la rétention qui sont grandement contrôlées par le volume, la taille, la distribution et la continuité de l'espace entre les pores et donc, par l'arrangement géométrique et par la texture des particules et des agrégats du sol (Bryan, 2000). L'érosion par l'eau peut être divisée en trois phénomènes distincts (*cf.* figure 1.3). 1) *L'érosion par les gouttes de pluie* qui est contrôlée par l'énergie cinétique et qui dépend directement des caractéristiques des gouttes (type de précipitation, intensité) (Bryan, 2000). D'ailleurs, Otto (1998) remarque que sous la cime des arbres, l'énergie des gouttes de pluie est souvent plus forte puisque les gouttes se réunissent sur les feuilles avant d'atteindre le sol. 2) *L'érosion par le ruissellement* qui implique une concentration de l'écoulement de l'eau souvent causé sur des versants naturels par la microtopographie, la végétation ou par la bioturbation (Bryan, 2000). 3) *L'érosion interne (suffosion)* qui est un processus d'écoulement souterrain connu comme étant un agent significatif dans le transport des sédiments des falaises deltaïques de la Côte-Nord (Bernatchez et Dubois, 2004). Cette érosion, sous forme de tunnel, se développe spontanément quand une force assez grande est exercée sur le sol pour en éjecter des particules et agrandir les macropores (Thorne, 1982; Bryan, 2000). Elle implique également une stratification des dépôts avec des perméabilités très variables, les plus perméables se retrouvant au-dessus des moins perméables, ce qui provoque une concentration des volumes d'eau dans le dépôt.

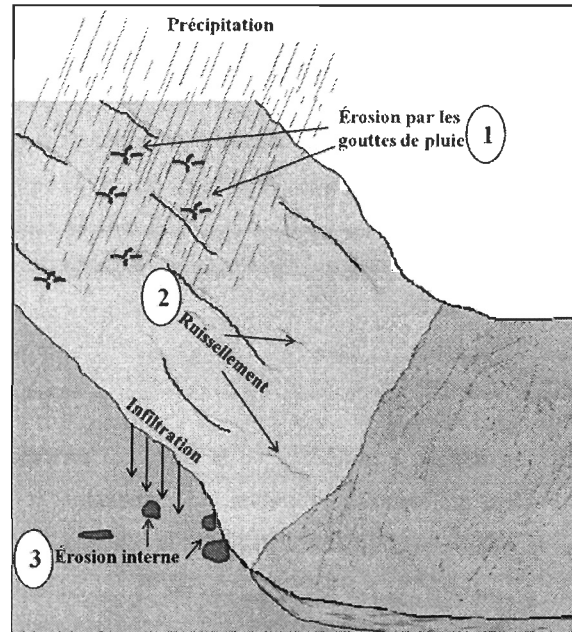


Figure 1.3 L'érosion par l'eau par les trois processus principaux : 1) les gouttes de pluie, 2) le ruissellement et 3) l'érosion interne

Les cycles gel-dégel

Le rôle des glaces n'a certes pas d'influence dans tous les domaines morphoclimatiques. Cependant, dans un milieu tempéré froid, comme dans le sud du Québec par exemple, le rôle des glaces ne peut être négligé. En ce sens, plusieurs études ont montré que l'érosion hivernale est beaucoup plus importante que l'érosion estivale (*e.g.* Wolman, 1959; Leopold, 1973; Hooke, 1979, Prosser *et al.*, 2000). En effet, les aiguilles de glace contribuent à affaiblir la berge tout en fournissant un apport en sédiments à la rivière. Ainsi, les aiguilles de la glace contribuent à l'érosion de façon plus marquée que la dessiccation en été. Cette tendance montre alors un patron saisonnier en ce qui a trait aux processus subaériens (Couper, 2003). Les aiguilles de glace, considérée par Lawler (1993a) comme étant un quatrième type de processus après les mouvements de masse, l'érosion fluviale et les mouvements subaériens, sont plutôt bien documentées.

Il a en effet identifié quatre différents scénarios montrant le déplacement de particules par les aiguilles de glace. Sur la figure 1.4 en a) les aiguilles de glace sortent du sol et entraînent avec elles des particules qui finissent par tomber simplement par l'action de la gravité. En b) les aiguilles chargées en sédiments fondent en entraînant des sédiments vers le bas de pente. En c), les aiguilles glissent en bloc vers le bas de pente apportant avec elles les sédiments qu'elles comportent. Finalement, en d) les aiguilles de glace tombent, individuellement ou en groupe, dû à la présence de particules plus grossières. Dans cette étude, Lawler (1993a) a déterminé que les aiguilles de glace représentent de 32 % à 43 % du retrait total des berges enregistré sur la rivière Ilston au Royaume-Uni.

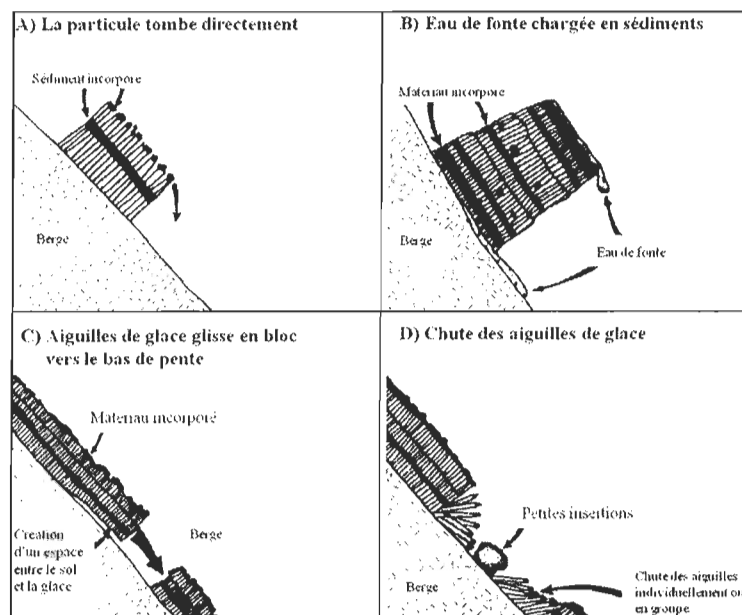


Figure 1.4 L'action des aiguilles de glace sur une berge (Tirée de Lawler, 1993a).

D'autres processus érosifs, reliés à la transformation de l'eau en glace, sont répertoriés dans la littérature. Le gel de l'eau dans les pores a longtemps été cité comme étant un processus subaérien préparatoire particulier (Wolman, 1959; Duijsings, 1987; Thorne, 1990). L'eau qui se transforme en glace à l'intérieur de la berge prend de l'expansion, séparant alors les particules qui constituent la berge les unes des autres. La séparation des matériaux diminue l'interconnexion entre les grains et donc l'angle de friction et annule ainsi toute cohésion. L'accumulation de plusieurs cycles gel-dégel et donc la création de la glace et la fonte qui en résulte, fragilise les berges (Thorne, 1982). La fonte de la glace de ségrégation dans le sol, responsable de la cryoptation/géliluxion, peut être responsable d'une grande quantité de sédiments transportés même s'ils représentent des processus lents, de quelques dizaines de centimètres par année seulement (Matsuoka, 2001). Les radeaux de glace et les chutes de carapaces de glace attachées aux berges peuvent par ailleurs causer des dommages importants lors de la fonte printanière (Church et Miles, 1982).

Les mouvements subaériens contrôlés par les cycles d'humidification-dessiccation, les cycles gel-dégel et l'érosion par l'eau sont d'une part, dépendants des matériaux qui constituent les berges, et d'autre part, des conditions hydrométéorologiques régionales qui accentuent ou qui minimisent leur impact. La quantité de précipitations, les saisons, l'altitude, la latitude, la végétation, l'orientation de la

berge, *etc.* sont des facteurs qui influencent l'occurrence et l'amplitude des mouvements subaériens. La figure 1.5 présente un exemple de mouvements subaériens où les sédiments s'accumulent sur une berge enneigée de la rivière à Pierre en Gaspésie. Les deux photographies présentées font ressortir plusieurs informations pertinentes sur les mouvements subaériens. En a) il est possible d'observer la paroi le 13 mars 2009 à 12h00PM et en b) le 14 mars 2009 à 11h00AM. Ces mouvements se sont produits en pleine période de dégel régional. Tout d'abord, elles montrent que les principaux mouvements observés correspondent aux chutes de blocs (pour définition voir tableau 2.2) alors que l'activité hydraulique est excessivement faible. De plus, il est facile de constater la grande quantité de sédiments accumulés alors qu'ils proviennent d'une multitude de petits mouvements répétitifs. Ces sédiments seront d'une part transportés éventuellement par l'action hydraulique lors de la fonte du couvert de glace, mais serviront aussi d'autre part à diminuer l'impact de l'action hydraulique sur le pied de berge. En effet, les sédiments devront être préalablement déplacés par l'eau pour ensuite atteindre la berge et l'éroder. Les mouvements de chute de blocs par éboulisation visibles sur les photos se sont manifestés en moins de 24 heures.

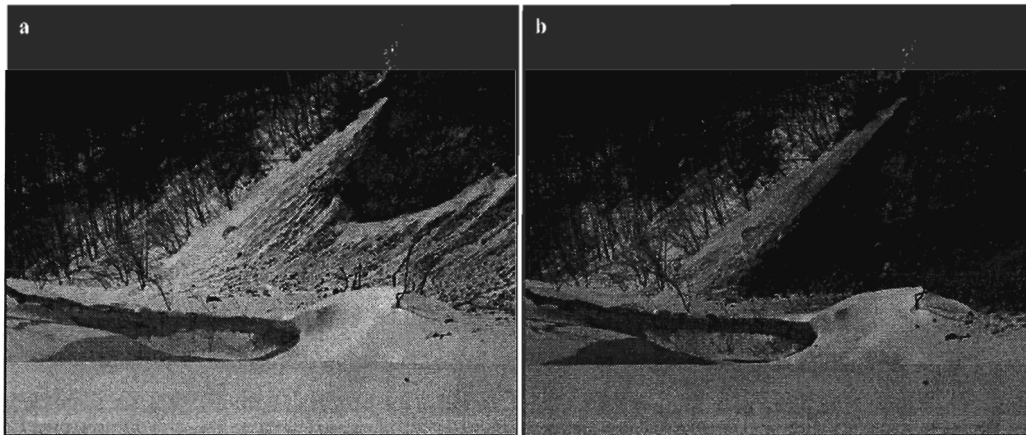


Figure 1.5 Mouvements subaériens sur la rivière à Pierre, Gaspésie (photo : Caméra Reconyx) a) 13 mars 2009 12h00PM b) 14 mars 2009 11h00AM

Pour bien conclure cette section traitant des processus d'érosion des berges, un tableau, inspiré de Knighton (1998), est présenté. Il indique les différents facteurs contrôlant l'érosion des berges des cours d'eau. Ainsi, les différentes propriétés de l'écoulement vont directement contribuer ou minimiser l'érosion par l'activité hydraulique. La géométrie du chenal, incluant la forme des berges qui est grandement contrôlée par la composition des berges, aura un impact sur les propriétés de l'écoulement et donc sur l'érosion fluviale, mais jouera surtout un rôle particulier sur les mouvements de masse. Les conditions sous la surface et toute la dynamique biologique contrôleront principalement les

mouvements subaériens. Sur les cinq facteurs répertoriés par Knighton (1998), deux d'entre eux agissent directement sur les processus subaériens, montrant qu'une multitude de petites variables accentuent ou minimisent les mouvements subaériens. Dans le tableau 1.2, nous avons tenté d'associer chacun des facteurs au processus qui sera le plus touché par ce facteur. Malgré tout, il ne faut pas omettre de mentionner que tous ces facteurs agissent directement ou indirectement sur chacun des types de processus. Le concept d'équilibre des berges qui sera présenté dans la prochaine section ne peut être sous-estimé.

Tableau 1.2
Facteurs et paramètres principaux contrôlant l'érosion des berges

Facteurs	Caractéristiques	Principaux processus impliqués
Propriétés de l'écoulement	Amplitude-fréquence et variabilité du débit Amplitude et distribution de la vitesse et de la contrainte de cisaillement Degré de turbulence	Érosion fluviale
Géométrie du chenal	Largeur, profondeur et pente du chenal Hauteur et angle de la berge Sinuosité	Érosion fluviale et mouvements de masse
Conditions sous la surface	Forces de l'écoulement interne Humidité contenue dans le sol, pression interstitielle	Mouvements subaériens
Biologie	Type, densité et racines de la végétation Terrier d'animaux, piétinement	Mouvements subaériens
Actions anthropiques	Urbanisation, drainage des terres, construction de réservoir, navigation, protection des berges	Tous

D'après Knighton, A.D., 1998. *Fluvial Forms and Processes : A New Perspective*, London : Arnold, p.117.

1.3 L'INTERACTION DES PROCESSUS

Les processus contribuant à l'érosion des berges agissent en simultané ou les uns à la suite des autres, ce qui complique l'identification de la contribution de chacun à la migration latérale d'un chenal ou encore au volume de sédiments transporté par le cours d'eau. Dans cette partie, nous présentons des concepts liés menant à une meilleure compréhension du rôle de chacun des processus dans l'érosion des berges.

1.3.1 La notion d'équilibre des berges

Il est difficile d'aborder l'érosion des berges des cours d'eau sans parler du concept d'équilibre des berges (*basal endpoint control*). Ce concept joue un rôle clé dans notre compréhension de la morphologie des cours d'eau et il contribue grandement à définir le rôle des processus dans le bilan sédimentaire à l'échelle d'une berge. Le concept d'équilibre des berges (e.g. Carson et Kirkby, 1972; Thorne et Tovey, 1981; Casagli *et al.*, 1999; Dapporto *et al.*, 2001; Wood *et al.*, 2001) explique la relation existante entre les processus agissant sur la berge à l'air libre et l'érosion fluviale. Cette relation joue un rôle important pour contrôler la forme, la stabilité et les taux de retrait de tous les types de berges (Thorne et Tovey, 1981). Le concept est abordé selon l'état de la berge. C'est-à-dire qu'il est décrit selon l'évolution d'une berge généralement observée en trois états distincts : 1) l'accumulation basale, 2) l'état d'équilibre et 3) l'érosion basale (figure 1.6). Les trois états sont discutés dans les paragraphes qui suivent.

1) L'accumulation basale indique une accumulation sédimentaire sur le pied de berge provenant de la berge elle-même. L'accumulation a lieu lorsque la source en sédiments est plus élevée que la capacité de l'écoulement à transporter ces sédiments. Les sédiments peuvent parfois tomber en blocs et leur cohésion est tellement élevée qu'ils constituent une protection naturelle pour la berge (Simon *et al.*, 1999; Wood *et al.*, 2001). La stabilité de la berge augmente alors tandis que l'apport de sédiments à la rivière diminue peu à peu pour atteindre la deuxième étape (Thorne, 1990).

2) L'état d'équilibre existe lorsque les processus qui procurent des sédiments à la rivière et ceux qui les retirent suivent le même rythme. La migration est principalement déterminée par le degré de l'activité hydraulique à la base (Thorne, 1990).

3) L'érosion basale est un retrait excessif des sédiments du pied de berge par l'action hydraulique. L'apport en sédiment est trop faible, amenant généralement la création de surplomb, l'augmentation de l'angle de la berge, tout en diminuant la stabilité. La berge affaiblie cède sous le poids des sédiments les donnant à la rivière et tendant alors vers la deuxième étape. L'équilibre (Thorne, 1990).

Le concept d'équilibre des berges focalise sur l'érosion fluviale. Les auteurs considèrent l'action hydraulique comme étant l'acteur principal qui contrôle le taux d'érosion des berges des cours d'eau. Cependant, l'érosion fluviale peut être amplifiée par les processus subaériens (e.g. Wolman, 1959). Cette dynamique met en lumière la complexité de l'étude des processus responsables de l'érosion des berges puisqu'ils sont tous en interrelation les uns les autres. Néanmoins, le rôle des processus « préparatoires » subaériens n'est pas intégré officiellement dans le concept d'équilibre des berges puisque ces processus sont considérés comme étant négligeables dans la dynamique d'érosion des berges. Le présent mémoire s'attarde à ces processus puisque nous considérons les différents facteurs qui motivent ou restreignent chacun des trois types de processus. Ainsi, les mouvements subaériens sont grandement contrôlés par les conditions hydrométéorologiques locales et régionales et s'inscrivent directement comme une étude très intéressante sur la dynamique des rivières en milieu tempéré froid au moment où les changements climatiques sont de plus en plus abordés et considérés dans les différentes études environnementales. De ce fait, les mouvements subaériens pourraient représenter une plus grande source sédimentaire que ce qui est actuellement véhiculé dans la littérature.

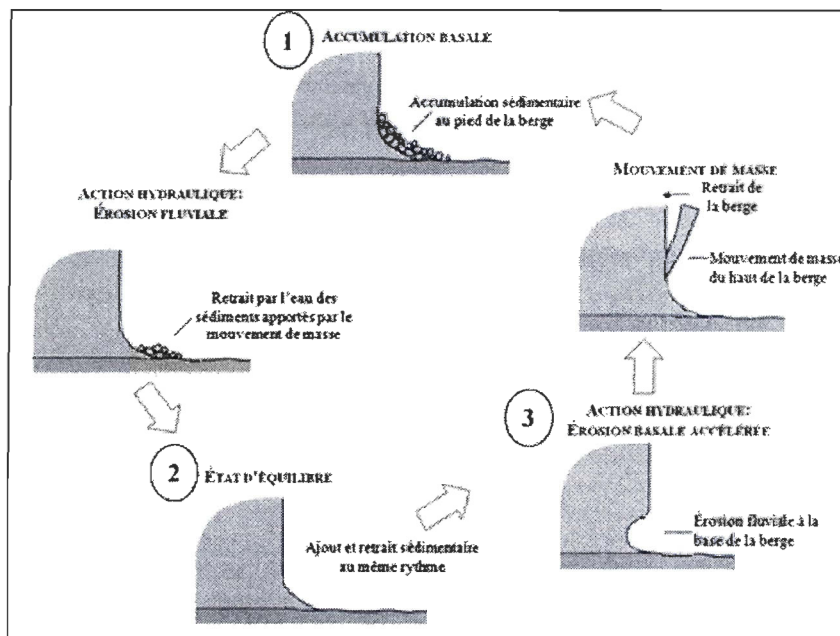


Figure 1.6 Schématisation du concept d'équilibre des berges. Les chiffres suivent les étapes indiquées dans le texte. Modifiée de Brierley et Fryirs (2005).

1.3.2 La distribution spatiale des processus dans le corridor fluvial

Le concept d'équilibre des berges présente bien l'interrelation existante entre les différents processus. Cependant, malgré la difficulté d'analyse que cela implique, plusieurs chercheurs tentent de mieux comprendre chaque type de processus de façon individuelle. Pour y parvenir, les processus ont été observés selon leur répartition spatiale. Les processus semblent être contrôlés par leur position dans le bassin versant et par la taille des bassins.

En effet, en 1995, Lawler montre, par le biais d'études principalement effectuées au Royaume-Uni, que la taille des bassins versants a un rôle à jouer sur la distribution des processus et leur contribution relative à l'évolution morphologique du cours d'eau. Il conclut que la contribution sédimentaire dans un cours d'eau possédant un petit bassin est principalement contrôlée par les processus subaériens, un bassin de taille moyenne, par l'érosion fluviale alors qu'un grand bassin, par les mouvements de masse. Une distribution spatiale des différents processus peut aussi être observée de l'amont vers l'aval (*cf.* figure 1.7). Lawler (1992) propose que les mécanismes subaériens sont plus importants en amont d'un bassin dû à la faible puissance spécifique. L'érosion fluviale devient plus importante au centre d'un bassin versant puisqu'à cet endroit le débit et la pente abrupte exprime une puissance spécifique élevée augmentant la force de l'écoulement pour éroder les berges. Finalement, Lawler (1992) propose que la profondeur du chenal augmente en aval amenant alors la berge à atteindre une hauteur critique qui réduit sa stabilité jusqu'à provoquer des mouvements de masse. La figure 1.7, tirée de Lawler (1992, 1995), montre schématiquement les trois mécanismes d'érosion des berges et leur « dominance » d'après la taille des bassins versants et leur position sur un cours d'eau. Des études terrains, Abernethy et Rutherford (1999) sur la rivière Latrobe en Australie, ainsi que Lawler *et al.* (1999) sur le système Swale–Ouse dans le North Yorkshire en Angleterre, ont confirmé les observations de Lawler (1992, 1995).

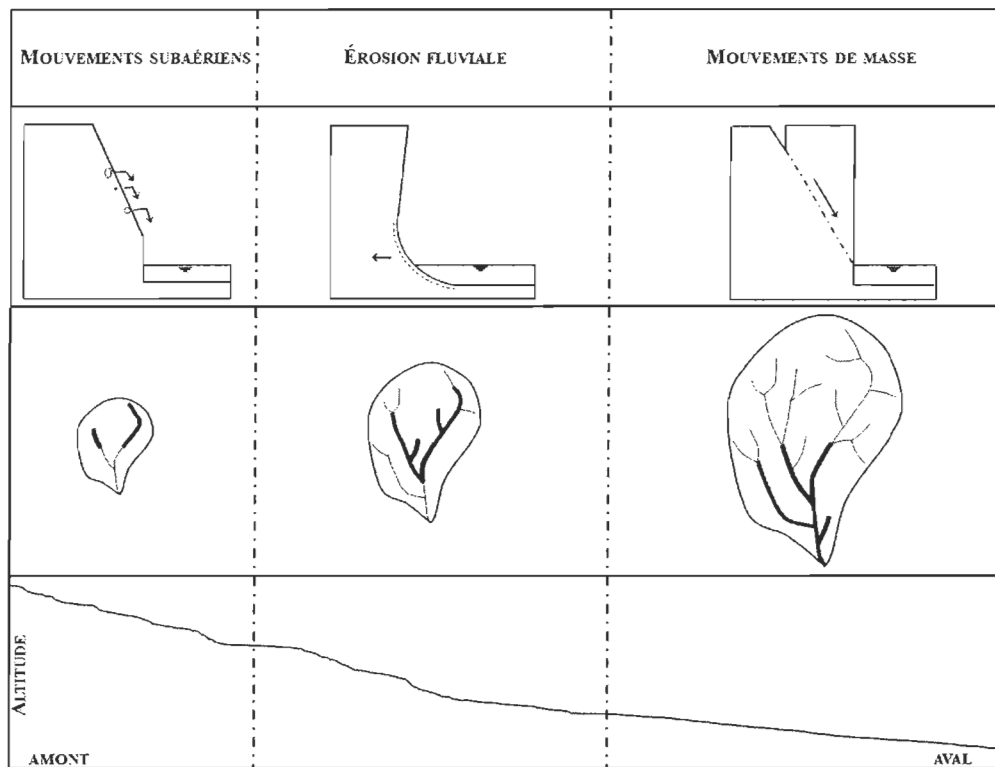


Figure 1.7 Schéma représentant les trois mécanismes d'érosion des berges selon leur « dominance » à l'échelle d'un bassin versant et d'un cours d'eau.

1.3.3 La fréquence et l'amplitude des processus d'érosion des berges

En étudiant les processus responsables de l'érosion des berges, il importe de toujours considérer l'échelle temporelle utilisée lors d'une analyse. L'échelle temporelle représente le nombre de mois ou d'années d'une étude, mais représente aussi et surtout la fréquence à laquelle la récolte, des données sur le terrain est faite. Couper et Maddock (2001) ont tenté de démystifier l'importance relative de chacun des processus en les observant sur une longue période de temps. Les auteurs ont documenté quatre sites sur la rivière Arrow au Royaume-Uni durant 16 mois à l'aide de tiges d'érosion. Ils ont remarqué que l'action hydraulique eut un effet significatif durant seulement sept jours sur 16 mois en plus d'avoir comptabilisé un seul mouvement de masse en réponse à cette érosion fluviale. Ils considèrent alors que les processus subaériens semblent être sous-estimés en tant qu'agent érosif. En examinant leurs résultats (*cf.* tableau 1.3), nous nous apercevons que le mouvement de masse produit à lui seul une érosion de grande ampleur. Cependant, l'érosion fluviale et l'érosion produite par les processus subaériens sont du même ordre de grandeur. Ainsi, si l'étude de Couper et Maddock (2001)

avait duré moins longtemps, les mouvements subaériens représenteraient le seul processus érosif sur ces différents sites puisque l'érosion fluviale et le mouvement de masse associés sont survenus à la fin de l'étude. Les auteurs insistent sur l'importance de la durée des observations dans l'étude de l'érosion des berges avant de sauter aux conclusions quant à la contribution de chacun des processus.

Tableau 1.3
Les processus observés selon leur fréquence et leur intensité relatives.

Processus	Fréquence	Intensité	Érosion moyenne observée sur 4 sites
Érosion fluviale	moyenne	moyenne	57,2 mm
Mouvement de masse	faible	grande	500 mm
Mouvements subaériens	grande	faible	47,9 mm

D'après Couper, P.R. et Maddock, I.P., 2001. Subaerial river bank erosion processes and their interaction with other bank erosion mechanisms on the River Arrow, Warwickshire, UK. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(6), 631-646.

1.4 CONCLUSION

L'érosion des berges se traduit par trois processus distincts : l'érosion fluviale, contrôlée principalement par la force hydraulique, les mouvements de masse, contrôlés par la composition des berges et les mouvements subaériens élémentaires, contrôlés grandement par les conditions hydrométéorologiques. Les différents processus agissent de concert sous le concept d'équilibre des berges et il devient alors difficile de les étudier indépendamment. Certaines recherches ont cependant montré que les processus ont une répartition géographique particulière de l'amont vers l'aval d'un bassin versant et sont plus ou moins présents selon la taille des bassins versants. Alors que les recherches tendent à considérer l'érosion fluviale comme le moteur de l'érosion des berges, certains auteurs nous rappellent que le temps alloué à l'étude de l'érosion des berges pourrait nous en dire plus sur la contribution de chacun des processus. Les mouvements subaériens semblent avoir été sous-estimés et pourraient représenter un processus érosif plutôt qu'un simple processus préparatoire.

CHAPITRE II

OBJECTIFS ET MÉTHODES

2.1 INTRODUCTION

Pour documenter davantage les processus subaériens, cette recherche présente une méthodologie novatrice dans l'étude de l'érosion des berges des cours d'eau. Ce chapitre présente la problématique de recherche, les objectifs et la méthodologie utilisée. Il fait ressortir certains éléments méthodologiques non concluants et expose en détail les étapes méthodologiques retenues pour atteindre les objectifs de recherche.

2.2 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DE RECHERCHE

L'étude de l'érosion des berges est complexe puisque les processus qui en sont responsables agissent de concert. Il devient alors difficile de les étudier séparément. L'érosion des berges est un processus naturel dans la dynamique des cours d'eau. Par contre, plusieurs actions anthropiques (ex. : retrait de la végétation sur les berges, construction de ponts, installation de maison sur le talus des berges) modifient la dynamique naturelle des cours d'eau en modifiant la quantité de sédiments apportés aux rivières (Charlton, 2008). Par la présence de ces sédiments, les riverains sont ainsi confrontés à divers aléas pouvant se transformer en risques. L'accumulation de sédiments, sous forme de bancs qui rétrécissent le chenal, est reconnue comme facteur aggravant pour la formation des embâcles, se traduisant fréquemment par des inondations (Paul, 2005). Les sédiments peuvent aussi être la cause de bris majeurs au niveau des infrastructures routières tels les ponts et les routes; ils peuvent aussi détruire, lors des crues, des récoltes entières. C'est cette accumulation sédimentaire particulièrement grande sous le pont de l'autoroute 20 dans la rivière Ouelle (Bas-Saint-Laurent) qui a attiré notre attention dans le cadre de cette étude. Notre objectif était alors de déterminer les sources principales de sédiments puisque le village de Saint-Pacôme, bordé par la rivière Ouelle, subit fréquemment des inondations. Après des visites exploratoires sur le terrain, les multiples berges escarpées ont semblé contribuer de manière importante dans l'afflux sédimentaire de la rivière Ouelle. Cependant, les mouvements de masse et l'érosion fluviale ne se montraient pas comme des processus dominants. En se fiant à l'état des berges sur la rivière selon le concept d'équilibre des berges, celles-ci se trouvent à l'étape 1 : l'accumulation basale. Comme il y a accumulation, l'action hydraulique n'est pas la

principale responsable de l'érosion des berges. De plus, selon le concept d'équilibre, l'accumulation devrait provenir de mouvements de masse. Une sorte d'affaissement de la berge du site St-Onésime peut laisser sous-entendre un ancien mouvement de masse, néanmoins la présence d'arbres par endroits laisse présager une certaine stabilité de la berge. Sur ce même site, nous avons plutôt observé une grande accumulation provenant de l'enchaînement de petits mouvements, se produisant d'ailleurs devant nos yeux. L'activité visible en surface (ruissellement, chute de bloc) a tout de suite attiré notre attention. Comme très peu de données sont disponibles concernant l'érosion par des processus subaériens, la présente recherche vise à documenter les mouvements subaériens contribuant à l'érosion d'une berge de la rivière Ouelle.

Les objectifs spécifiques sont :

- 1) De décrire et d'identifier les processus subaériens contribuant à l'évolution d'une berge dans un cycle annuel.
- 2) De quantifier la contribution relative des différents processus subaériens.
- 3) De lier les processus subaériens aux conditions hydrométéorologiques régionales.

2.3 DESCRIPTION DES SITES D'ÉTUDE

2.3.1 Bassin versant de la rivière Ouelle

La rivière Ouelle est un tributaire du fleuve St-Laurent, le troisième plus important fleuve en Amérique du Nord après le Mississippi et le Mackenzie (Environnement Canada, 2010). Elle se situe en plein cœur de la région administrative du Bas-St-Laurent, plus précisément dans la MRC de Kamouraska. La surface du bassin versant de la rivière Ouelle à la confluence avec le fleuve St-Laurent équivaut à près de 850 km² et la longueur totale de la rivière est de 75 km. La station 022704 du Centre d'Expertise Hydrique du Québec, situé à Sainte-Anne-de-la-Pocatière indique que la rivière possède un débit moyen annuel de 15,7 m³/sec et des débits maximal et minimal moyens respectivement égal à 220,6 m³/sec et 0,8 m³/sec. Selon les archives nationales d'information et de données climatologiques d'Environnement Canada à la station météo de La Pocatière située à 7 km du site d'étude, en observant les données disponibles de 1971 à 2000, la région possède une température moyenne annuelle égale à 4 °C. La moyenne annuelle des précipitations liquides est égale à 672,9 mm alors que la moyenne des précipitations solides équivaut à 288,5 cm.

La rivière Ouelle prend sa source dans les hautes terres appalachiennes dans le village de Ste-Perpétue à une altitude de 400 mètres. Elle se déverse à l'embouchure du Saint-Laurent dans la municipalité de Rivière-Ouelle à une altitude comprise entre cinq et dix mètres. Elle chevauche deux

régions administratives, soit celle du Bas-Saint-Laurent et celle de Chaudière-Appalaches. En amont, la rivière coule sur le roc où elle est principalement contrôlée par la structure appalachienne. À l'aval, la rivière méandre aisément dans des sédiments fins sur une large plaine alluviale où elle subit grandement l'effet des marées sur plusieurs kilomètres (Dionne, 1988).

La région à l'étude comporte aujourd'hui de multiples traces de la dernière glaciation wisconsinienne. Entre 12 800 et 12 600 BP, la région de Kamouraska a été déglacée et submergée par les eaux de la Mer de Goldthwait jusqu'à une altitude de 160 à 165 mètres (Chauvin *et al.*, 1985; Dionne 1988; Dionne et Pfalzgraf, 2001). La transgression postglaciaire de la Mer de Goldthwait laissa un épais dépôt argileux expliquant la section à méandre à l'aval de la rivière Ouelle. Plus à l'amont, la présence de sédiments très grossiers, souvent dépassant quelques décimètres, semblent correspondre à des sédiments hérités de la dernière glaciation de type fluvioglaciaire et de till par endroits. Les berges sont escarpées, hautes et déboisées. Le relief général est de pente faible à modérée traversé par des monadnocks. La plaine alluviale est quasi inexistante due à la présence d'abrupts rocheux qui contrôlent le cours d'eau. La région est principalement constituée de schistes argileux et de siltstones (lits fins rouges, verts, gris) recouverts à plusieurs endroits par des dépôts fluviaux actuels (Martineau, 1977; Hubert, 1973).

Le bassin versant de la rivière Ouelle a subi plusieurs modifications au niveau de l'utilisation du sol. Entre 1874 et 1958, des barrages et des estacades étaient présents sur la rivière pour rehausser le niveau d'eau. Les barrages régularisaient le débit et permettaient aux compagnies forestières de contrôler aisément les billots de bois flottant sur le cours d'eau (Furois, 2009). Les barrages avaient aussi pour fonction de retenir les sédiments et les embâcles de glace, limitant ainsi les risques d'inondation (Gidas, 1985). Suite à l'installation de ces barrages, comme les crues étaient moins présentes, les riverains ont dénudé les berges pour bénéficier de plus de terres agricoles. Aujourd'hui, les barrages ne sont plus présents sur le cours d'eau et n'ont donc plus pour fonction de régulariser le débit. Les berges dénudées constituées de graviers grossiers et de sable s'érodent facilement (Gidas, 1985). La figure 2.1a localise les deux sites à l'étude dans le bassin versant de la rivière Ouelle et la figure 2.1b les positionne sur le profil longitudinal de la rivière.

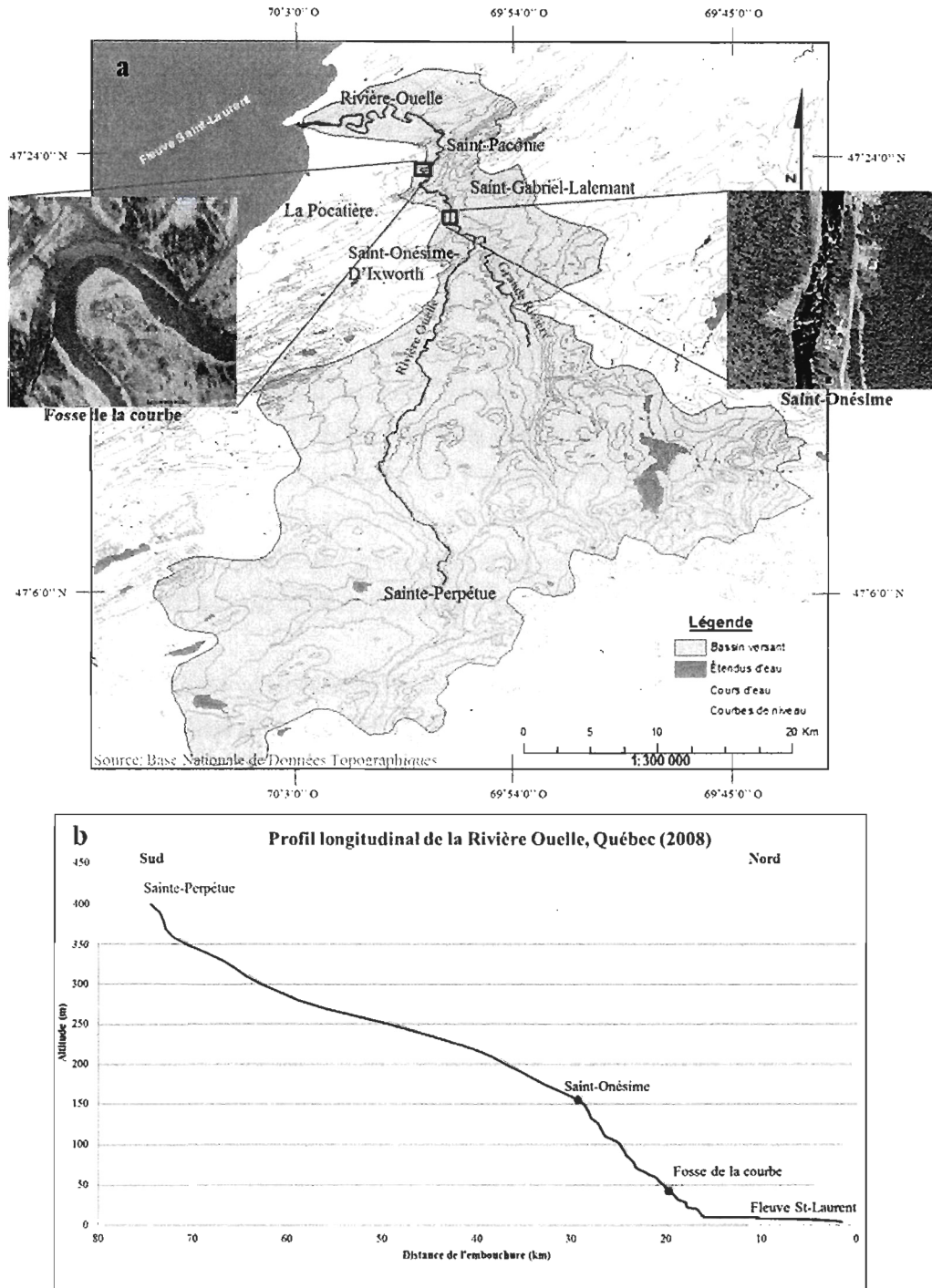


Figure 2.1 a) Localisation géographique des sites à l'étude dans le bassin versant de la rivière Ouelle (source BNDT, image Google Earth, 2007) b) localisation des sites sur le profil longitudinal de la rivière Ouelle (source SoftMap).

2.3.2 Le site Saint-Onésime

Le secteur à l'étude correspond au feuillet SNRC (Système National de Référence Cartographique du Canada) 021N05. Il est localisé à la latitude 47°21'43''N et à la longitude 69°56'30''O. L'accès au site est extrêmement facilité par la présence de routes principales et secondaires entretenues par la municipalité été comme hiver. Le site est bordé par le village de Saint-Gabriel-Lalemant au nord-est, par la petite ville de Saint-Pacôme au nord et par la ville de La Pocatière à l'Ouest.

Le secteur à l'étude est une berge en érosion, orientée NNE-SSO, située sur la rivière Ouelle, Québec, sur la rive sud du moyen estuaire du Saint-Laurent. La berge se trouve dans le village de Saint-Onésime-d'Ixworth à 26 km à l'amont de l'embouchure du fleuve St-Laurent et à 2 km à l'aval de la confluence entre la rivière Ouelle et la Grande-Rivière. Le secteur est à une altitude de 108 m avec une pente du chenal égale à 0,02 %. Tout juste en amont du site, la rivière est contrôlée par les parois rocheuses alors qu'en aval du site, le lit et les bancs sont constitués de sédiments grossiers de la même taille (D_{50} : 270 mm). La berge en question est haute de 44 mètres et possède un angle de 32 °. La surface à l'étude est d'environ 0,0022 km² et a la particularité de faire face à une rivière rectiligne à cet endroit. La berge est constituée de sédiments hétérométriques caractéristiques d'un till d'ablation (Robitaille et Allard, 2007). Il y a présence de graviers et de blocs allant jusqu'à 40 cm (axe b) tous très anguleux dans une matrice argilo-limoneuse qui maintient la cohésion entre les différentes tailles de sédiments. Le D_{50} des particules fines (< 2 mm) est égal à 14,7µm. Il n'y a pas d'imbrication évidente. La végétation sur le site est éparse et basse avec quelques arbres par endroits. La figure 2.2a montre la berge de face. La figure 2.2 b montre une grande quantité de sédiments décimétriques qui s'accumulent au pied de la berge, ce qui semble être une protection naturelle contre l'érosion fluviale. La figure 2.2c présente les sédiments hétérométriques qui constituent la berge alors que la figure 2.2d montre le profil de la berge à l'étude.

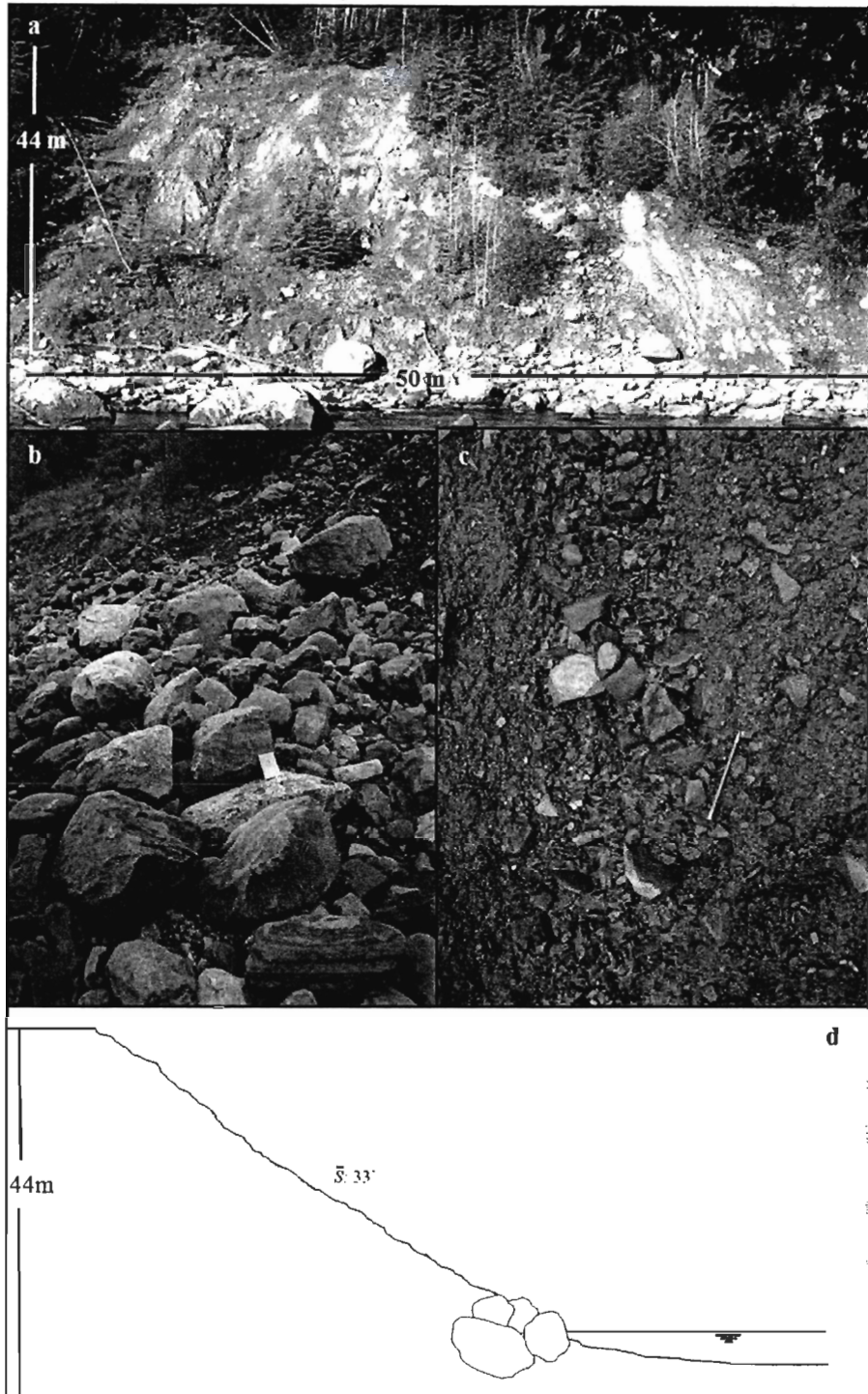


Figure 2.2 a) Berge à l'étude, b) accumulation de sédiments grossiers à la base de la berge agissant comme protection naturelle (dimension de l'échelle : 17.5x14.5 cm), c) granulométrie de la berge (longueur du crayon 16cm), d) profil de la berge à l'étude (Photos a : Caméra Reconyx; b et c : Valéry B. Hamel).

2.3.3 Le site Fosse de la courbe

Le site Fosse de la courbe est une berge en érosion en rive concave. La berge fait face au sud devant un long méandre de 700 mètres. Le site Fosse de la courbe est situé à 7 km en aval du site Saint-Onésime sur la rivière Ouelle. La hauteur de la berge approche les 50 m alors que la surface à l'étude est d'environ 0,025 km². L'altitude du lit à cet endroit est équivalente à 48 m alors que la granulométrie du lit est égale à 220 mm (D50) et la granulométrie des bancs correspond à 48 mm. La berge a une orientation presque parfaitement est-ouest. La pente du lit est de 0,01 %. Il s'agit d'une berge en érosion sur la rive concave et donc fortement soumise à l'action hydraulique. Pour contrer ce phénomène, un enrochement a été construit à la base de la berge. L'enrochement agit à titre de merlon; les sédiments s'accumulent alors au pied de la berge derrière les blocs de l'enrochement. La berge semble correspondre à des dépôts fluvioglaciaires mis en place en contact avec le glacier. Tout comme le secteur en amont, l'étendue des tailles granulométriques est très large, elle inclut des lentilles d'argile et de till. La stratification est plutôt fruste et subhorizontale correspondant probablement à de fortes variations de courant. La présence de failles normales dans les sédiments traduit la perte de support par la glace du glacier.

Dans le haut de la berge, nous retrouvons des sédiments grossiers atteignant 120 cm de largeur par endroits. Les particules fines sont très présentes (D50 : 6,1 µm), retenant les sédiments si fortement entre eux qu'ils forment des blocs de sédiments fins. La berge forme deux angles bien distincts, au sommet un angle de 70° par-dessus lequel des arbres sont en surplomb parfois parallèles à la surface du sol. La deuxième section est plus douce, soit de 32°. Une végétation basse recouvre la berge par endroits, alors que quelques saules ont été plantés pour limiter l'érosion. L'accès au site est relativement complexe et nécessite plusieurs mains d'hommes pour transporter le matériel. Pour cette raison, nous avons choisi d'étudier ce site moins fréquemment que le site Saint-Onésime. La figure 2.3a montre la berge dans son ensemble, la figure 2.3b présente les lentilles d'argiles incrustées dans la berge entourées par des sédiments plus grossiers formant des agrégats. La figure 2.3c permet de visualiser l'angle plus prononcé dans le haut de la berge alors que la figure 2.3d montre le profil général de la berge à l'étude. Le tableau 2.1 permet de comparer aisément les deux sites à l'étude selon leurs caractéristiques morphologiques, sédimentologiques et hydrologiques principales.

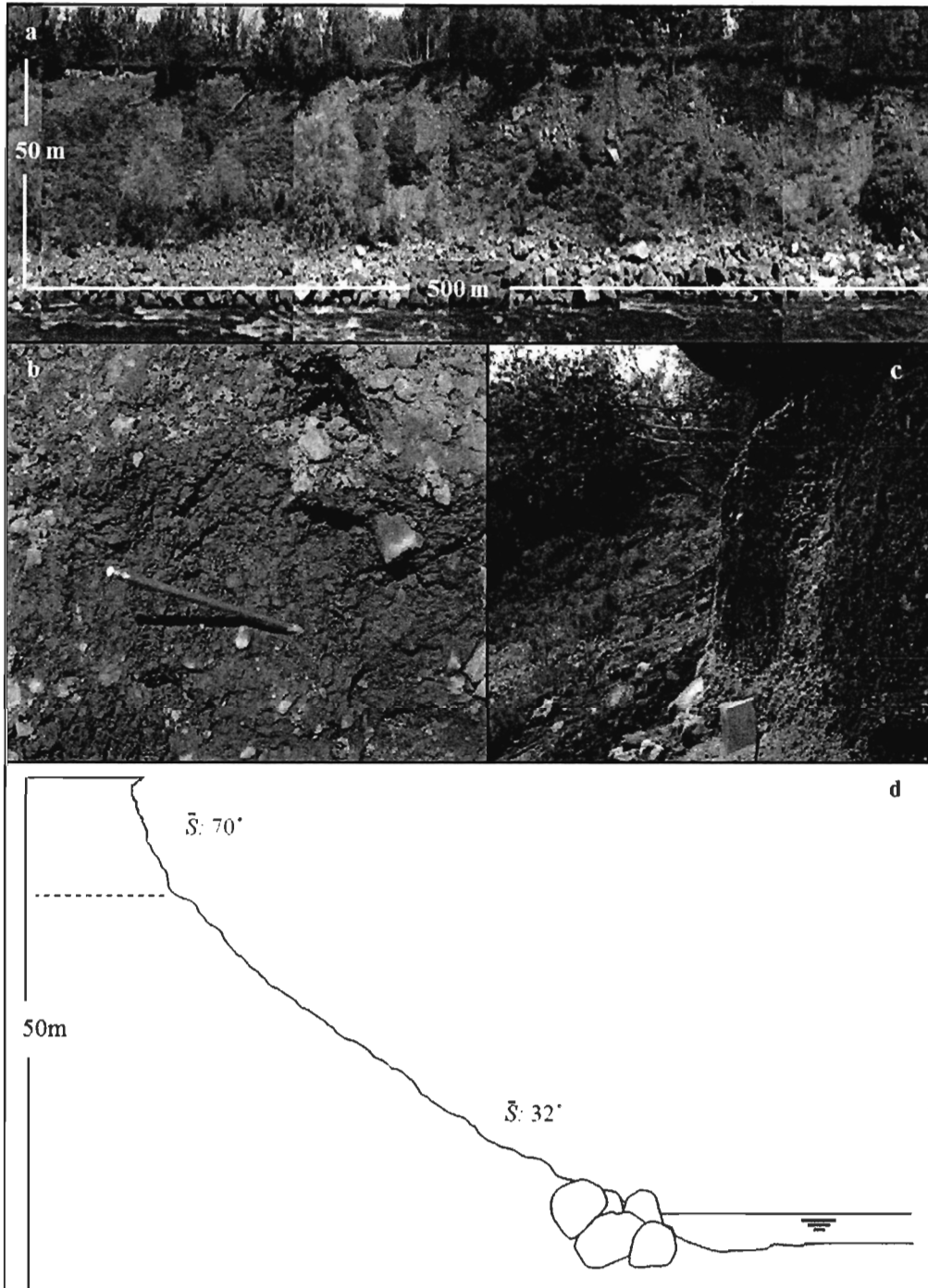


Figure 2.3 a) Berge à l'étude et son enrochement à la base, b) granulométrie de la berge et présence de lentilles d'argile (longueur du crayon 16 cm), c) profil du haut de la berge (dimension de l'échelle : 17.5x14.5 cm) et d) profil de la berge (Photos Jean-Philippe Marchand).

Tableau 2.1
Données morphologiques, sédimentologiques et hydrologiques principales des sites d'étude

	Saint-Onésime	Fosse de la courbe
Altitude du lit (Z_0)	108 m	48 m
Pente du chenal (S)	0,02	0,01
Hauteur de la berge	44 m	50 m
Orientation de la berge	NNE-SSO	E-O
Indice de sinuosité (L/λ)	N/A	2,18
Granulométrie de la berge (fraction < 2mm) ($D50$)	14,7 μ m	6,1 μ m
Granulométrie du lit (fraction > 2 mm) ($D50$)	270 mm	220 mm
Granulométrie des bancs (fraction > 2 mm) ($D50$)	270 mm	48 mm
Type de berge	Till d'ablation	Fluvio-glaciaire

2.4 MÉTHODOLOGIE

La recension littéraire a permis d'établir l'état des connaissances concernant l'érosion des berges tout en soulignant les incertitudes et les défis qui l'accompagnent. Considérant la fréquence élevée et la faible intensité des processus subaériens, il importe pour les documenter de mettre en place une méthodologie d'analyse combinant une haute résolution spatiale à une haute résolution temporelle. Ce mémoire met en place une telle méthodologie permettant de fournir des données pour mieux comprendre les processus responsables du taux de recul des berges dans un environnement nordique en continuel changement.

2.4.1 Acquisitions des données

Plusieurs sites le long du corridor de la rivière Ouelle ont été visités au mois de décembre 2008 puis en juillet 2009 pour bien évaluer le dynamisme des sites qui seraient retenus pour l'étude, mais aussi leur accessibilité selon les conditions estivales et hivernales. Le matériel utilisé étant gros et lourd exigeait une facilité d'accès au site autant que possible. Les sites retenus et leur géomorphologie ont d'abord

été caractérisés au mois d'août 2009 alors que la rivière était à son plus bas niveau. Durant cette campagne, des données de granulométrie du lit et des bancs à l'aide de la méthode de Wolman (1954) ont pu être obtenues. De plus dans cette même période, des données granulométriques des bancs à l'aide de la méthode photographique ainsi que des données de scan ont été enregistrées. La pente de la rivière aux deux endroits provient de données DGPS et de mesures au théodolite. Pour la suite, le projet de recherche se base sur des campagnes de terrain combinant des observations à haute résolution spatiale à l'aide d'un LIDAR terrestre et à haute résolution temporelle à l'aide d'une caméra automatisée.

Les photographies de la berge

Pour répondre au premier objectif, soit de décrire les processus subaériens, une caméra Reconyx RC55 Rapidfire™ a été installée sur le site Saint-Onésime. La caméra donne des images couleur d'une résolution de 3.1 mégapixels. Située à un peu moins de 50 mètres de la berge, la caméra nous a permis d'obtenir des photographies horaires de la berge à partir du début septembre 2009 jusqu'au milieu du mois de mai 2010. La méthode photographique est utilisée fréquemment en géomorphologie fluviale pour obtenir des volumes et interpréter le paysage (*e.g.* Chandler, 1999; Lane *et al.*, 2000). Pourtant, les études utilisant des caméras automatisées pour observer des processus en continu sont rares. En géomorphologie fluviale, Allard (2010) a utilisé une caméra automatisée pour obtenir un suivi d'une fosse-à-frasil. Cependant, en ce qui concerne l'érosion des berges aucune étude ne semble avoir utilisé cette méthode à ce jour. Il s'agit d'une méthode novatrice permettant d'accumuler beaucoup d'information utilisable ultérieurement telles les conditions d'humidité entre les événements, les types de processus, leur récurrence, leur amplitude (qualifiée selon la quantité de sédiments déplacés), leur localisation sur la berge et les conditions météorologiques locales. De plus, elle nous permet d'obtenir une série temporelle des événements. Cette série est très utile pour évaluer les événements hydrométéorologiques ayant pu influencer les différents processus. L'installation se fait facilement sur un arbre à proximité et la mise en activation de la caméra se fait en un tournemain.

Cependant, la caméra possède certains inconvénients qui limitent la prise de données. Les principaux inconvénients proviennent de la qualité optique de la caméra et de son installation sur le terrain. La résolution au sol des pixels (1,5 cm/px), l'ajustement automatique du focus et la sensibilité aux contrastes lumineux marqués de l'optique combinés aux conditions locales d'ensoleillement nuisent à la visibilité de la berge sur les photographies. Certains clichés sont surexposés et d'autres possèdent des zones d'ombre très noires rendant difficile l'observation des processus. Le climat peut aussi limiter la visibilité soit par des précipitations trop intenses ou encore par la présence de

brouillard. La caméra n'est pas en mesure de prendre des photographies en période de nuit sur une si grande distance. Ainsi, l'heure exacte d'un événement n'est pas connue lorsqu'il se produit en période nocturne. Finalement, la caméra nécessite des batteries qui doivent être changées fréquemment surtout en période hivernale.

Les inconvénients de la caméra ont des implications sur les mouvements subaériens pouvant être documentés à partir des photographies et nous en discuterons plus en détail plus bas.

Les modèles de terrain à haute résolution

Traditionnellement, l'étude de l'érosion des berges nécessitait des relevés intensifs sur le terrain en utilisant des tiges d'érosion ou des profils transversaux (Lawler, 1993b). Cependant, ces méthodes interfèrent avec la face de la berge mesurée et la résolution spatiale des résultats est celle équivalant aux points sous investigation. Ainsi, pour éviter ce genre de problème pour la mesure d'un taux d'érosion des berges considérant l'ensemble des processus subaériens, nous avons utilisé la méthode morphologique (Ashmore et Church, 2008). Des modèles numériques de terrain (MNT) à haute résolution ont été obtenus à l'aide d'un LIDAR terrestre (Leica ScanStation II *cf.* figure 2.4). Le LIDAR (*Light Detection And Ranging*) est une technique de télédétection qui utilise les propriétés de la lumière diffusée afin de déterminer certaines caractéristiques des objets éloignés (Heritage et Large, 2009).



Figure 2.4 Outil de travail principal : le Leica ScanStation II (photo Valéry B. Hamel).

Tous les LIDAR fonctionnent à l'aide de lumière laser (*Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation*) (Large et Heritage, 2009). Le ScanStation II fonctionne à la lumière pulsée. C'est-à-dire, qu'il émet une lumière laser qui se propage de l'instrument à un objet distant où une partie de l'énergie peut être reflétée et enregistrée dans l'instrument. Par la suite, les formes sont analysées pour déterminer la localisation et les caractéristiques de l'objet (Heritage et Large, 2009).

Des MNT obtenus à des moments différents peuvent être comparés pour obtenir des modèles numériques des différences d'élévation (MNDE). Un MNDE est une représentation numérique de la topographie. Il s'agit donc d'une grille constituée de multiples cellules possédant toutes une valeur d'élévation qui leur est associée (Yilmaz, 2007). Grâce aux valeurs d'élévation contenues dans les cellules du MNDE il est possible d'obtenir facilement des volumes de terrains, et ce, même pour des sites ne présentant pas une structure géométrique régulière. Les MNDE permettent de bien voir les surfaces d'accumulation ou d'érosion sur le MNT initial. De plus, ils permettent de calculer des volumes d'érosion ou d'accumulation sur ces surfaces. Nasermoaddeli et Pasche (2008) ont utilisé cette méthode pour mesurer l'érosion fluviale et les mouvements de masse le long de la rivière Hardebek-Brokenlander en Autriche; ils ont conclu que l'utilisation du LIDAR terrestre est une

méthode rapide et précise pour mesurer les changements morphologiques des berges des rivières. Les auteurs réussissent à quantifier des gains nets aussi petits que 14 mm pour un mois. Le plus haut taux d'érosion obtenu pour un mois est de 153 mm. Oppikofer *et al.* (2006) ont eux aussi identifié l'efficacité des images provenant de LIDAR terrestre même pour de petits changements dans les berges de Sorge River en Suisse. Les nuages de points obtenus ont montré une érosion de 800 mm sur une surface de 500 m². Resop et Hession (2010) ont analysé l'érosion d'une berge du ruisseau Stroubles, Blacksburg, Virginie. Pour ce faire, deux méthodes d'analyse ont été comparées : le théodolite et le scanneur laser terrestre. Ils concluent que le scanneur laser capte de l'information sur l'entièreté de la berge plutôt que sur une section transversale comme le fait le théodolite et est donc, de ce fait, l'outil le plus précis entre les deux techniques. Les données obtenues indiquent une érosion de 150 mm par année.

Dans notre étude, plusieurs MNTs ont été réalisés pour permettre la comparaison temporelle des sites à l'étude et d'examiner leur évolution. Au site de Saint-Onésime, six MNTs ont été obtenus sur un pas de temps mensuel entre août 2009 et mai 2010. Les mois de décembre, janvier, février et mars ne permettaient pas la capture de MNT puisque le faisceau du ScanStation II ne traverse pas la neige ou l'eau et ne permettent aucune réflexion de la lumière (Charlton *et al.*, 2009). Le choix de cet outil est justifié pour atteindre l'objectif deux, soit de quantifier les processus subaériens. Pour une distance de 50 mètres, la précision d'une mesure simple avec le ScanStation II de Leica est de 6 mm pour la position et de 4 mm pour la distance. Le scanneur laser enregistre 50 000 points à la seconde (Leica Geosystems, 2011). Le ScanStation est un LIDAR fixe qui mesure sur 360 ° à l'horizontale, 270 ° à la verticale et possède une caméra intégrée permettant d'avoir une bonne représentation de l'objet à scanner. Les informations sont enregistrées dans un ordinateur par l'entremise d'un fil Ethernet relié à l'instrument dans le logiciel Cyclone fourni par le fabricant. Comme le matériel est très lourd et multiple (scanneur, deux batteries, ordinateur portable, cibles), il importe de bien choisir le ou les sites à l'étude pour faciliter les opérations. Nous avons donc fait fabriquer un charriot pour contenir tout le matériel et nous permettre de nous rendre plus aisément aux sites d'étude.

Les scans ont été faits à partir des berges opposées des sites à l'étude. Pour assurer une superposition simple et efficace des scans à différentes dates nous avons installé cinq cibles fixes sur chacun des sites. De cette façon, le scan peut être repositionné à un endroit différent d'une fois à l'autre, mais garde les mêmes point repères, il peut alors superposer les informations facilement. La portée maximale du ScanStation II est établie à 300 mètres pour les surfaces réfléchissantes à 90 % et à 134 mètres pour les surfaces réfléchissantes à 18 % albédo (Leica Geosystems, 2011). Cependant, considérant la difficulté du scan à trouver les cibles à plus de 100 mètres, nous avons choisi de travailler sur une distance maximale de 100 mètres réduisant ainsi l'erreur associée à la distance de

l'instrument. D'ailleurs, le choix des cibles est à considérer. Kersten *et al.* (2008) ont identifié des variations relatives aux cibles du ScanStation II (*cf.* figure 2.5). Ils ont noté qu'à une distance de moins de 100 mètres les cibles HDS montrent le plus faible résidu (< 5 mm), alors qu'à plus de 100 mètres de distance les sphères indiquent le meilleur résultat (résidu maximal de 12,5 mm à une distance de 287m) dû à leur surface plus large. Nous avons décidé de scanner les berges aux centimètres près à l'aide de cible HDS pour obtenir une grande quantité d'information sans pour autant être surchargés de données.

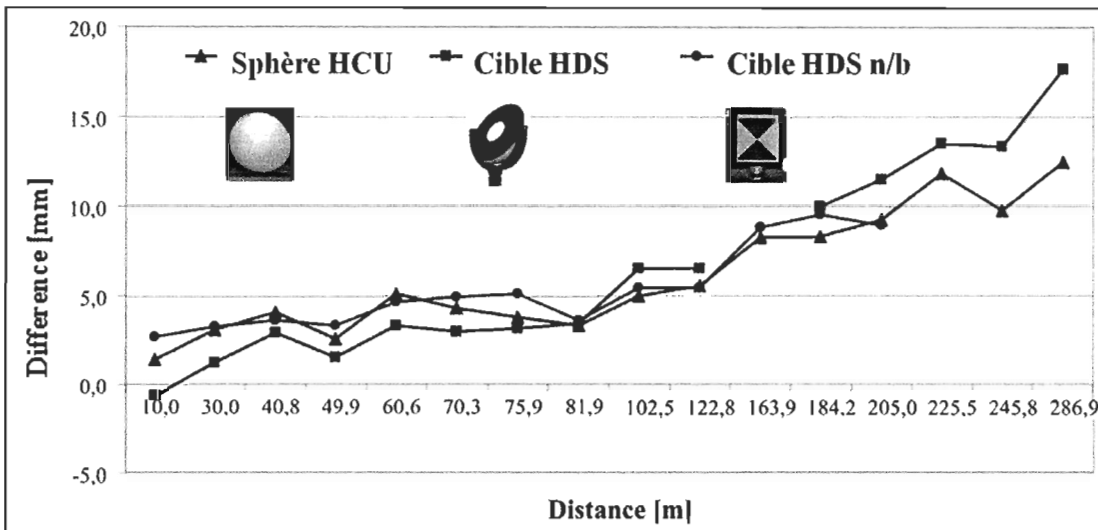


Figure 2.5 Comparaison des différences dans les scans obtenus à l'aide de trois types de cibles (Kersten *et al.*, 2008).

2.4.2 Traitements des données

Les données sur la granulométrie du lit et des bancs récoltés à l'aide de la méthode de Wolman (1954) ont été traitées à l'aide du tableur Excel alors que la méthode photographique appliquée aux bancs a été traitée à l'aide du logiciel Sedimetrics. Seules les données de la méthode de Wolman ont été retenues puisque la méthode photographique n'a pas été concluante considérant la taille des sédiments se trouvant sur chacun des sites. La granulométrie des berges a été faite sur deux échantillons par berge. La fraction grossière (> 2 mm) a été mesurée par tamisage sec alors que la fraction fine (< 2 mm) a été traitée par diffraction laser dans le logiciel *Gradistat 4.0*.

La pente de la rivière aux deux endroits provient de données DGPS et de théodolite traitée à l'aide des logiciels Excel et ArcGis. Les données de DGPS ont en plus été préalablement traitées à l'aide de l'application GNSS Solution.

Les photographies de la berge

Les photographies du site Saint-Onésime ont été scrutées à la loupe une à une pour en extraire des informations sur des processus subaériens. À l'aide de la caméra, il nous était impossible de documenter les aiguilles de glace, la contraction-dilatation de la berge ou encore l'humidité de la berge qui sont tous des processus subaériens mentionnés dans la revue de littérature. Sans aucun doute ces processus auraient avantage à être documentés dans notre étude, cependant les choix méthodologiques permettent de fournir des informations uniquement sur les processus visibles sur la caméra dans le cadre d'un suivi annuel. De plus, l'installation d'instruments de mesure à même la berge aurait modifié la face de la berge altérant alors la précision des données obtenues par le scan. Notre étude porte sur la résolution temporelle mensuelle de berges de grandes superficies. Pour cette raison, nous nous sommes concentrés sur les processus subaériens les plus visibles à l'aide de notre méthodologie (photographie). Il s'agit ici d'une première étape. Un petit secteur de référence aurait très bien pu être instrumenté et utilisé en guise de comparaison avec les données de scan. Cependant, par manque de fonds nous avons dû nous abstenir. Nous avons donc observé à l'aide des photographies six processus différents (tableau 2.2): le ruissellement à compétence élevé, le ruissellement à compétence faible, les décrochements, les avalanches, les chutes de blocs et les chutes d'arbre.

Tableau 2.2

Les processus subaériens recensés sur la berge du site Saint-Onésime et leur définition respective.

Processus	Définition
Ruissellement (C↑)	Fort écoulement de surface lorsque la berge est saturée produit par la fonte accélérée du couvert nival et/ou par de fortes précipitations et transportant des sédiments en bas de pente.
Ruissellement (C↓)	Faible écoulement de surface lorsque la berge est saturée produit par la faible fonte du couvert nival et/ou par de faibles précipitations et transportant des sédiments en bas de pente.
Décrochement	Petite partie de terre se détachant du reste du sol et se dirigeant vers le bas de pente.
Avalanche	Masse de neige se détachant du reste du couvert nival et transportant avec elle des sédiments en bas de pente.
Chute de blocs	Graviers, cailloux et blocs se détachant de la berge et se dirigeant vers le bas de pente.
Chute d'arbre	Détachement partiel ou complet d'un ou de plusieurs arbres transportant avec eux des sédiments en bas de pente.

Trois informations clefs sur les processus subaériens ont été extraites des séries chronologiques de photographies. Pour assurer une bonne qualité des observations, les photographies ont été visualisées dans la visionneuse de photos Windows où des zooms sont possibles pour mieux visualiser l'information dans des portions distinctes des clichés photographiques. Les trois informations retenues pour caractériser chaque mouvement subaérien sont : 1) l'occurrence, 2) la position sur la berge et 3) l'amplitude du mouvement. Pour ce qui est de l'occurrence, toutes les photographies ont été observées et chaque fois qu'une modification à la berge était notée ou qu'un des processus pouvait être observé directement, une date et une heure d'occurrence étaient notées. Pour ce qui est de la position sur la berge, la berge sur les clichés est séparée en 8 sections soit haut, bas, centre et I-II-III (figure 2.6). Chaque section fut observée indépendamment pour évaluer l'occurrence des mouvements subaériens. Finalement, l'amplitude de chacun des processus a été évaluée et qualifiée de faible, moyenne ou élevée en fonction de la superficie de la berge touchée par la mobilisation de sédiments par section. Pour ce faire, une note sur dix (/10) a été attribuée à chacun des mouvements. Un mouvement ayant touché moins de 3/10 de la surface de la berge dans sa section est considéré comme faible. Un mouvement touchant entre 4 et 7/10 de la surface de sa section est considéré comme une amplitude moyenne alors qu'un mouvement touchant à plus de 7/10 de la surface représente une amplitude

élevée. Les trois informations obtenues ont été comptabilisées dans un dossier Excel pour en extraire des séries temporelles d'événements selon les sections de la couverture photographique.

La caméra automatisée a aussi servi pour obtenir des données de température à même le site, pour constater l'humidité du sol avant, pendant et après les événements, pour déterminer le type de précipitation et l'impact de la couverture neigeuse. La figure 2.7 montre un exemple d'avalanche observable à l'aide des photographies.

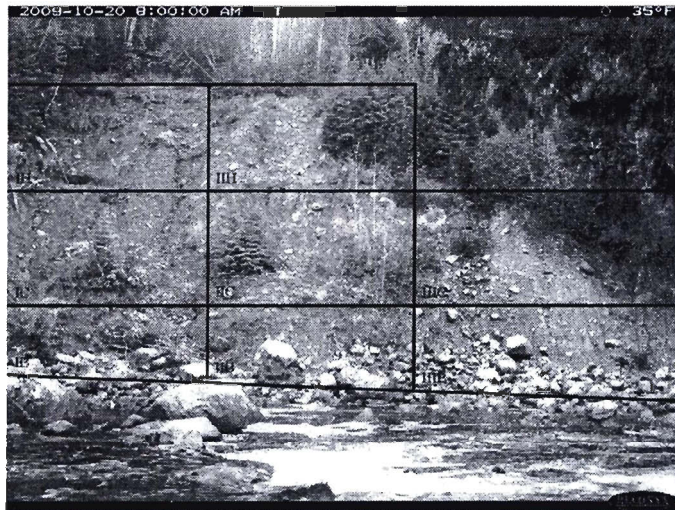


Figure 2.6 Séparation de la berge en différentes zones pour faciliter l'observation des processus et pour spatialiser les événements.

Les conditions météorologiques

Les conditions météorologiques ont été obtenues, à défaut d'avoir une station météorologique à même le site, par les archives nationales d'information et de données climatologiques d'Environnement Canada à la station météo de La Pocatière située à 7 km du site d'étude. Ces données ont pu être jumelées aux conditions horaires observables sur les photographies de la caméra automatisée. Des données de température, d'ensoleillement et de précipitation ont pu être extraites de ces deux outils d'analyse. L'intérêt d'utiliser ces données est de voir si les conditions hydrométéorologiques régionales permettent d'évaluer l'occurrence et l'amplitude des mouvements subaériens se produisant sur la berge.

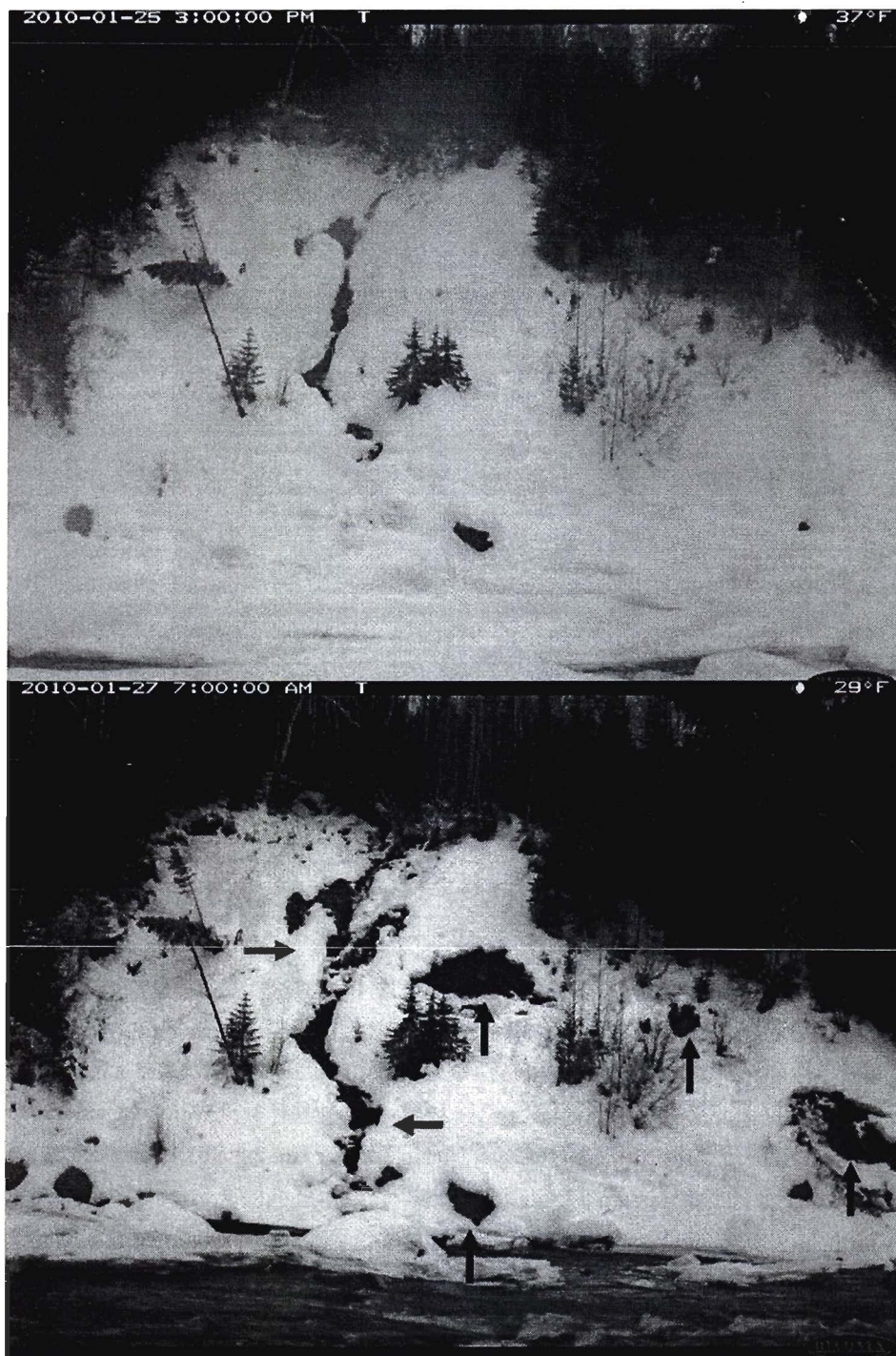


Figure 2.7 Petites avalanches survenues le 26 janvier 2010 sur le site Saint-Onésime.

Les modèles numériques de terrain

Les MNTs ont tout d'abord été manipulés dans Cyclone, le logiciel créé par Leica pour gérer les données de scans (*cf.* figure 2.8a). Cyclone, qui est raisonnablement flexible, est un outil puissant pour contrôler le LIDAR sur le terrain et pour la manipulation de nuages de points à un bureau d'ordinateur (Charlton *et al.*, 2009). Le défi était ici de trouver un logiciel capable de mesurer des volumes avec une quantité de points aussi impressionnante (20 millions par scan environ), mais aussi d'éliminer la végétation pour ne garder que la face de la berge dénudée. Ainsi, pour éliminer la végétation, le module Cyclone II topo du logiciel Cyclone a été en mesure d'offrir une surface exempte de végétation sans toutefois diminuer de beaucoup la résolution. Le logiciel cherche un point au sol en traversant la végétation et y insère une valeur pour une résolution donnée. Le logiciel permet la création rapide de plans topographiques à partir de nuage de points. Il est facile d'utilisation, ne demande pas de compétences spécifiques en matière de LIDAR et utilise des techniques de conception assistée par ordinateur (CAO) (Leica Geosystems, 2011). Il permet aussi d'enregistrer les données traitées en différents formats facilitant ainsi le traitement ultérieur. Il est à noter que le traitement effectué par Cyclone II topo modifie le nuage de points, créant à certains endroits des zones moins bien documentées (*cf.* figure 2.8 b). L'irrégularité du nuage de points est une erreur à considérer dans notre analyse. Dans cette étude, le retrait de la végétation a été effectué sous une résolution de 5 cm, réduisant ainsi notre densité de point. Nous savons que la précision de nos analyses ultérieures peut être altérée.

Par la suite, pour visualiser simplement les MNDE, le logiciel 3D Reshaper a été utile pour la gestion simple et efficace d'une grande quantité de données. Cependant, le logiciel Cyclone et 3D Reshaper, malgré leur aptitude à gérer une grande série de points et à générer un maillage impressionnant et complexe, ne permettent pas d'obtenir des valeurs en termes de volume et de différence de surface entre deux maillages ni d'exporter ces maillages dans un autre logiciel. Le logiciel Surfer a alors été utile pour calculer des volumes. Le logiciel Surfer 8.0 offre douze méthodes d'interpolation spatiales ou méthodes d'analyse globale servant à détecter des anomalies dans les données. Aucune méthode n'est meilleure qu'une autre, cependant un choix optimal s'offre à l'utilisateur sous certaines conditions (Yang *et al.*, 2004). Pour choisir la méthode la plus optimale, nous avons testé chacune des méthodes sur deux dates différentes à l'aide des données du site Saint-Onésime. Visuellement, plusieurs méthodes semblent efficaces et sont très similaires (*cf.* figure 2.9).

Pour faire un choix éclairé, nous avons effectué une validation croisée à partir de 1000 points repères sur chacune des douze méthodes. La moyenne et l'écart-type des erreurs mesurées pour chacune des méthodes ont été comparés. Considérant la densité de points que nous possédons, les erreurs sont toutes similaires pour plusieurs méthodes (*cf.* Tableau 2.3). Seule la méthode

« Natural Neighbor » a obtenu une erreur faible tant au niveau de la moyenne que de l'écart-type sur les deux dates, nous donnant ainsi une erreur-type de 0,40 cm. Pour cette raison, nous avons retenu cette méthode d'interpolation pour les analyses. La méthode « Minimum Curvature » nécessite un temps excessivement long pour obtenir les erreurs à l'aide de la validation croisée. Nous n'avons donc aucune donnée à cet effet. La méthode « Modified Shepard's » présente une erreur de programmation à même le logiciel tandis que la méthode « data metrics » ne donne aucun résultat de son côté. Le tableau 2.4 présente un résumé des étapes de traitement de données.

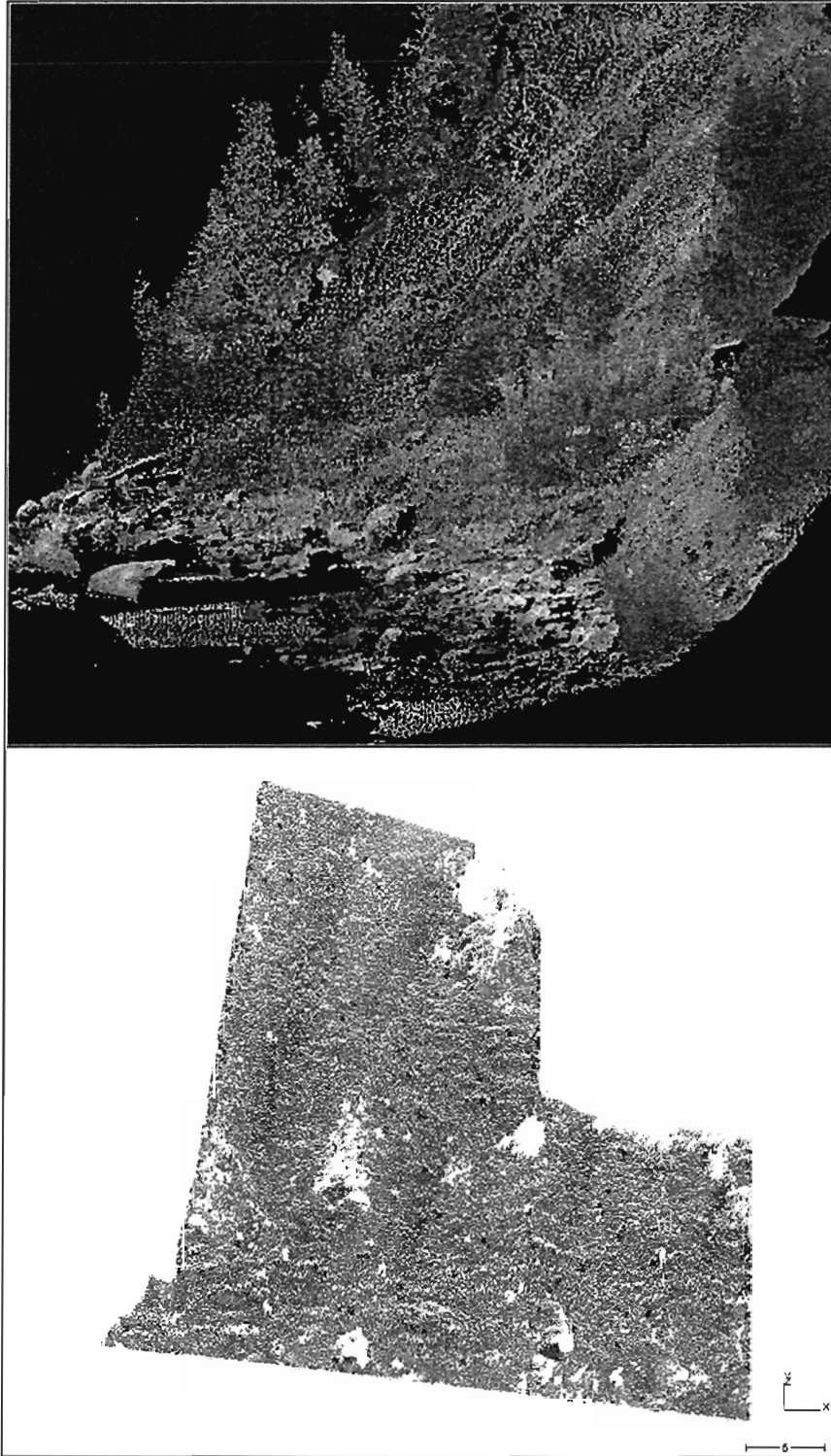


Figure 2.8 a) Points x,y,z observés dans Cyclone, b) points x,y,z une fois la végétation retirée par Cyclone II topo.

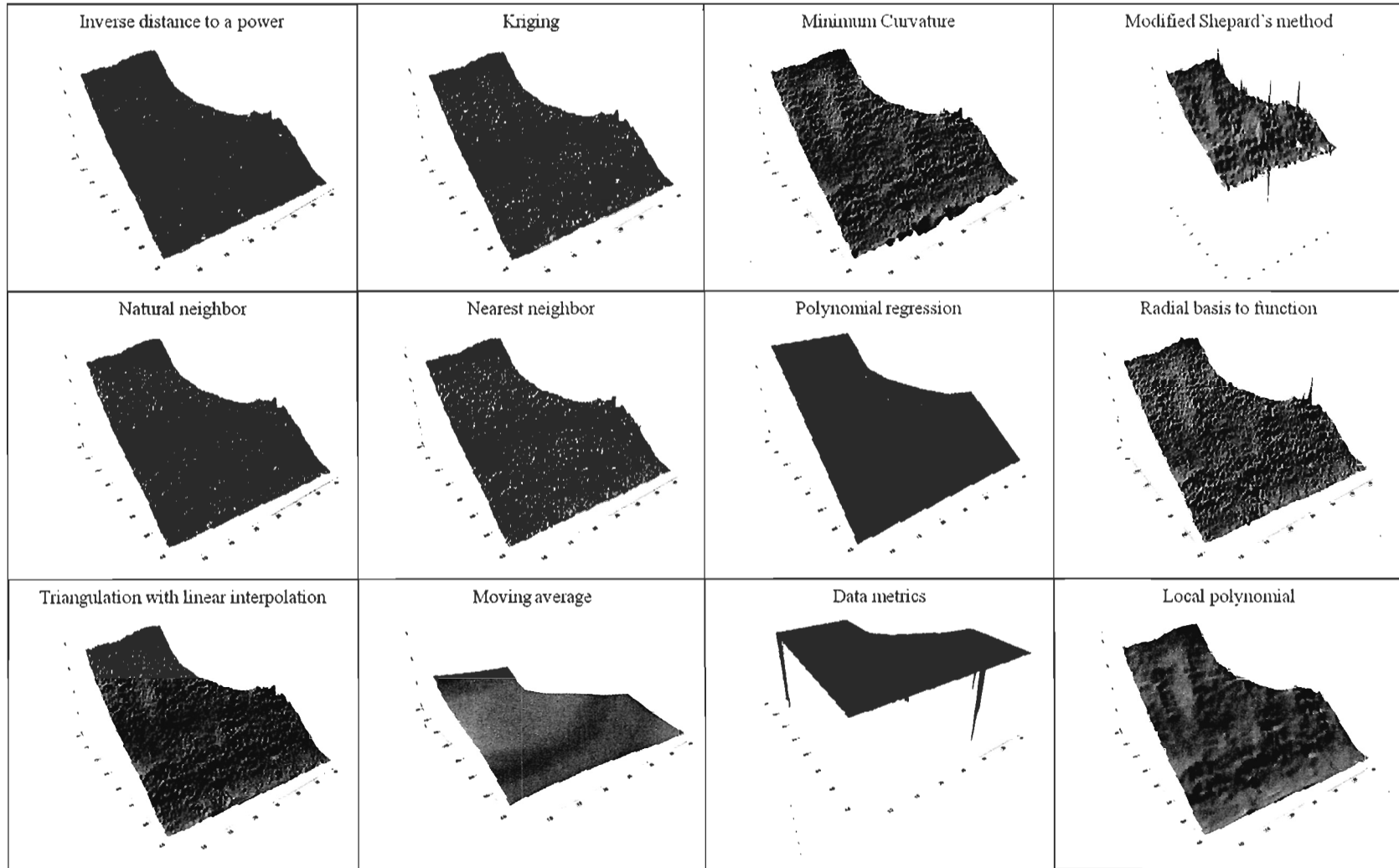


Figure 2.9 Résultat visuel des 12 méthodes d'interpolation disponibles avec le logiciel Surfer.

Tableau 2.3
Calcul de l'erreur-type selon les différentes méthodes d'interpolation du logiciel Surfer 8.0

Méthodes d'interpolation avec le logiciel Surfer 8.0	Validation croisée site Saint-Onésime					
	20 août 2009			14 avril 2010		
	Erreur moyenne (cm)	Écart-type (cm)	Erreur-type (cm)	Erreur moyenne (cm)	Écart-type (cm)	Erreur-type (cm)
Inverse distance to a power	-0,51	11,3	0,36	0,58	13,6	0,43
Kriging	-0,08	12	0,38	-0,7	17,2	0,54
Natural neighbor	-0,1	12,5	0,40	0,03	12,5	0,40
Nearest neighbor	-0,32	17	0,54	-0,01	13,6	0,43
Polynomial regression	-0,14	68,9	2,18	-6,85	69,4	2,19
Radial basis to function	-0,33	14,1	0,45	-0,06	15,4	0,49
Triangulation	0,08	14,2	0,45	-0,35	15,2	0,48
Moving average	10,27	480	15,18	-9,5	519,2	16,42
Local polynomial	0,22	13,1	0,41	0,42	13,4	0,42

Tableau 2.4
Étapes de traitement des données

1. Organisation des données dans l'espace à l'aide du logiciel Cyclone 7.0
2. Retrait de la végétation à l'aide du logiciel Cyclone II topo : résolution 5cm
3. Déterminer la méthode d'interpolation dans le logiciel Surfer 8.0
4. Interpoler pour créer des rasters : résolution 3cm (Surfer 8.0)
5. Création de « blank » (Surfer 8.0)
6. Faire la différence entre les scans pour obtenir des cartes érosion/accumulation (Surfer 8.0)
7. Diviser les cartes en trois zones : Haut, Centre et Bas (Surfer 8.0)
8. Calcul des volumes en tenant compte des erreurs lors de l'acquisition et du traitement (retrait de la végétation, interpolation)

2.4.3 Résultats du site Fosse de la courbe

Les résultats obtenus au site Fosse de la courbe sont présentés dans cette section en guise d'illustration de la méthode utilisée. Les deux sites à l'étude possèdent des berges de composition différentes et d'orientation différentes. À la base, nous souhaitons obtenir une quantification des processus subaériens sur deux sites distincts pour une même période de temps dans le but d'obtenir des données intéressantes sur ces variables. En raison de la difficulté d'accès au site Fosse de la courbe, nous avons peu de données relatives aux processus subaériens. Il a donc été convenu de retirer le site Fosse de la courbe de l'analyse des mouvements subaériens d'érosion des berges. Malgré tout, deux scans ont été réalisés au site Fosse de la courbe avec lesquels un modèle numérique des différences d'élévation (MNDE) a pu être créé. La figure 2.10 présente le MNDE du site Fosse de la courbe pour le mois d'août 2009 et mai 2010. La berge a préalablement été divisée en trois sections (Haut, Centre, Bas) pour faciliter l'analyse. Une grande accumulation se fait au sommet de l'enrochement au bas de la berge et au niveau du centre de la paroi. Le haut de la berge subit plutôt une érosion de quelques millimètres en moyenne (gain net). L'érosion se produit directement sous les racines de la végétation en surplomb. Au mois d'août 2009, le site était recouvert en partie par la végétation alors qu'au mois de mai 2010, la végétation était à peine présente sur le site. La végétation se situe principalement au centre de la berge la stabilisant et minimisant l'activité des mouvements subaériens. Le haut ne possède que très peu de végétation herbacée alors qu'aucune végétation ne s'observe sur le bas enroché. Le site Fosse de la courbe indique une accumulation dans l'ensemble de la berge durant le neuf mois de suivi. Le MNDE indique un gain net total de 32,2 mm entre les mois d'août 2009 et mai 2010. Le gain net obtenu à l'aide du MNDE montre une légère accumulation de 32,2 mm certes, mais entièrement liée au processus subaériens. Aucun mouvement de masse n'est survenu durant les neuf mois de suivi. L'érosion fluviale est quasi neutralisée par l'enrochement et donc permet aux sédiments de s'accumuler en bas de pente.

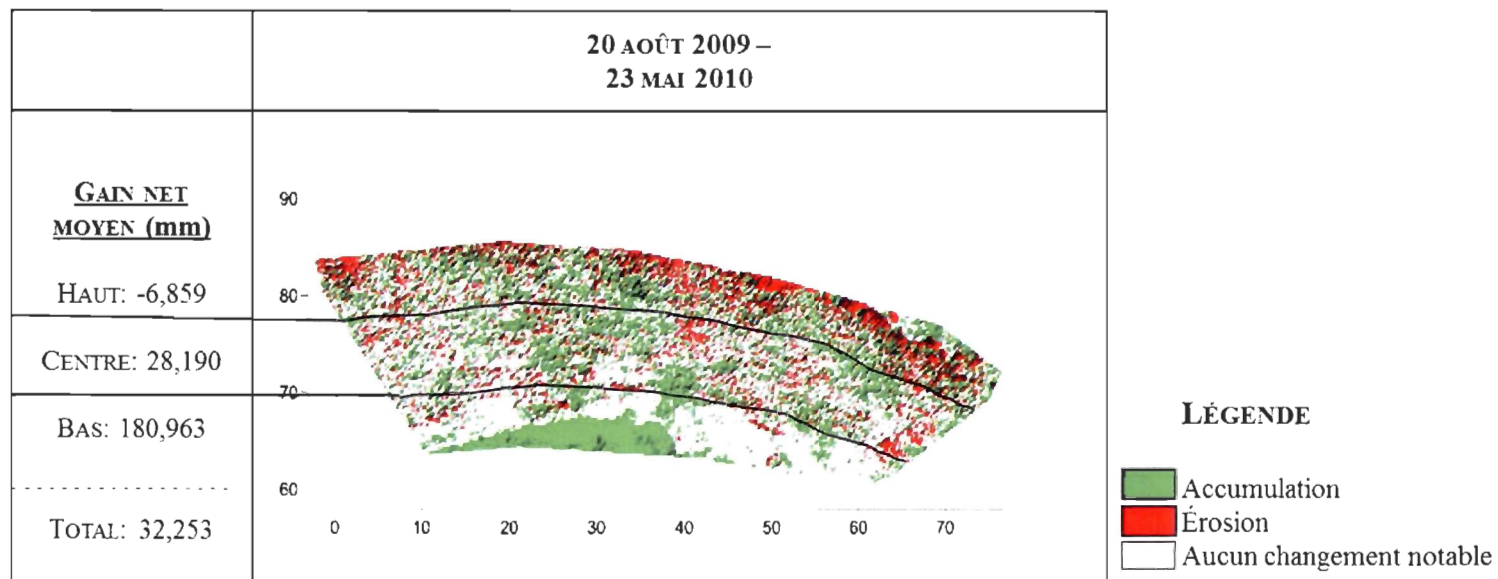


Figure 2.10 Modèle numérique des différences d'élévation pour le site Fosse de la courbe entre août 2009 et mai 2010.

2.5 CONCLUSION

Très peu d'informations sont disponibles sur les processus subaériens d'érosion des berges des cours d'eau. Nous avons donc choisi dans le cadre de ce mémoire de documenter davantage ces processus sur le site Saint-Onésime : une berge en érosion de la rivière Ouelle dans le Bas-Saint-Laurent. Pour ce faire, les processus subaériens sont observés, notés et décrits à l'aide d'une caméra automatisée installée en permanence sur le site. Ces informations sont mises en relation avec les données hydrométéorologiques locales pour en extraire une série temporelle d'événements. En parallèle, afin de quantifier le volume de sédiments provenant de processus subaériens, nous avons utilisé un LIDAR terrestre mensuellement entre août 2009 et mai 2010 pour créer des modèles numériques des différences d'élévation. Le site Fosse de la courbe, un peu en aval du site Saint-Onésime sur la rivière Ouelle, a dû être retiré de l'analyse par manque de données.

CHAPITRE III

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DE L'ÉROSION DES BERGES : LES MOUVEMENTS SUBAÉRIENS SUR UNE BERGE DE LA RIVIÈRE OUELLE, QUÉBEC, CANADA

Le chapitre 3 est un article scientifique ayant été soumis à la revue *Géomorphologie : relief, processus et environnement*. Il présente les résultats de recherche obtenus dans la présente étude tout en discutant des retombées et implications de ces résultats.

Contribution à l'étude de l'érosion des berges : les mouvements subaériens sur une berge de la rivière Ouelle, Québec, Canada

A contribution to bank erosion: subaerial movements on a riverbank of the Ouelle river, Québec, Canada

Valéry B. Hamel*, Thomas Buffin-Bélanger et Bernard Héту

RÉSUMÉ

Trois processus distincts agissent en interrelation et contribuent à l'érosion des berges en bordure des cours d'eau : les mouvements de masse, l'érosion fluviale et les mouvements subaériens d'effritement, produits, entre autres, par les cycles gel-dégel et par les cycles d'humidification-dessiccation. Les deux premiers processus érosifs sont les plus connus. Les mouvements subaériens sont moins documentés, car ils sont généralement considérés comme un mécanisme préparatoire affaiblissant la berge et facilitant l'érosion par les deux autres processus. Cette étude examine les mouvements subaériens en tant que processus érosifs à l'aide d'observation *in situ* permettant de décrire et de quantifier leur

* Université du Québec à Rimouski, Département de biologie, chimie et géographie.
300, allées des Ursulines, Rimouski, Québec, Canada, G5L 3A1
Courriel : valery.bhamel@uqar.qc.ca

contribution à l'érosion des berges. Pour ce faire, une berge en érosion sur la rivière Ouelle, Québec, a été étudiée à l'aide de levés topographiques mensuels issus d'un LIDAR terrestre (Scan-station II de Leica). Les levés couvrent une période permettant de suivre l'évolution saisonnière des processus érosifs. De plus, une analyse qualitative des processus contribuant à l'évolution de la berge a été faite à l'aide d'une série photographique horaire issue d'une caméra automatisée installée en permanence sur le site. Les variations saisonnières des taux d'érosion liés aux mouvements subaériens ont été mises en relation avec les données météorologiques d'Environnement Canada. Le suivi d'une berge en érosion montre que les mouvements subaériens peuvent représenter un processus érosif au même titre que les mouvements de masse et l'érosion fluviale, lorsqu'observés sur une longue période de temps. Les variations temporelles soulignent l'importance de considérer les saisons pour mieux évaluer l'amplitude et la fréquence de la contribution des différents processus à l'érosion des berges.

Mots clés : Érosion des berges, Mouvements subaériens, Volume d'érosion et d'accumulation, LIDAR terrestre.

ABSTRACT

Three types of processes contribute together to riverbank erosion: fluvial erosion, mass failure and subaerial movements produced partly by frost action and wetting and drying cycles. The first two processes have received far more attention than the latter which are often considered as preparatory processes to bank erosion. In this study, subaerial processes are looked as an eroding agent, in situ measures are carried out in order to document and quantify their contribution to bank erosion. An eroding riverbank on the Ouelle river, Québec, is monitored with a high resolution terrestrial 3D laser scanner (Scan-station II by Leica). Seasonal eroding processes can be followed with the large temporal period covered by the scans. Scans are coupled with qualitative analysis of processes contributing to bank face evolution. An automatized camera fixed on the site is used to obtain a photographic series of the riverbank. Meteorological data are examined in relation with the seasonal erosion rates from subaerial movements. The results suggest that subaerial movements are more than preparatory processes and that their contribution as erosive agent is likely to be underestimated. Furthermore, temporal variation underlines the importance of considering seasons for a better evaluation of magnitude and frequency of the contribution of different erosion processes of riverbank.

Key Word: Riverbank erosion, Subaerial processes, Erosion and deposition volume, Terrestrial 3D laser scanner.

ABRIDGED ENGLISH VERSION

Bank erosion can be a significant problem when it comes to river management (Dapporto *et al.*, 2001). Bank erosion is also an ecological process (Piegay *et al.*, 1997) contributing to such plant succession within abandoned channels (Salo *et al.*, 1986). Bank erosion is a phenomenon that includes sediments transfer, rivers evolution and ecosystems survival (Florsheim *et al.*, 2008). Understanding the processes that shape rivers thus becomes fundamental to explain the development of river systems (Hooke, 1979). Three types of processes are found: mass failure, fluvial entrainment and subaerial weakening and weathering. However, uncertainty remains about the relative contribution of each process and, more specifically, the supply of sediment from each of them (Lawler, 1995). This uncertainty is partly due to the fact that the role of each process depends on the hydrometeorology of the river system and material within the banks.

This article is intended to contribute to improving knowledge about bank erosion of rivers in cold temperate environments. It aims to study and analyze subaerial processes contributing to bank erosion 1) in describing subaerial processes involved on the bank, 2) by providing a volume quantification of mobilized sediments by these subaerial processes and 3) in linking subaerial process to hydrometeorological regional conditions. The study site is on the Ouelle river, Québec-Canada in the municipality of Saint-Onésime-d'Ixworth. In this study, subaerial processes looked as an eroding agent, are described and measured by *in situ* observations.

Considering the high frequency and low intensity of subaerial processes, it is important to establish an analytical methodology combining a high spatial resolution with a high temporal resolution. This study sets up such a methodology. It allows us to provide data to better understand the processes responsible for bank erosion rate in a northern environment constantly changing. Data were taken monthly, using a terrestrial LIDAR during the year 2009-2010, in order to obtain erosion rates using high resolution digital elevation models (DEMs). The data were handled in Leica Cyclone software and exported in the module Cyclone II topo to eliminate the vegetation and keep only the bare face of the bank (fig 3). To determine the spatial interpolation as faithful to reality and to create DEM of quality the new surfaces free of vegetation has been inserted into the software Surfer 8.0. The large temporal period covered by the scans allows us to follow seasonal eroding processes. In addition, an hourly monitoring photographic, from an automatized camera fixed on the site, has been made. Detailed visual analysis of photographs was used to characterize the events of erosion on the bank and build a time series of these events. Six different processes are identified: high runoff competence, low runoff competence, setbacks, avalanches, falling rocks and boulders and fallen trees (Table 2). However, the methodological choices can provide information on the process visible to the camera as part of annual monitoring. Our study focuses on the temporal resolution of monthly banks of large

areas. For this reason, we focused on subaerial processes more visible through photographs. This is a first step.

These processes identified on the camera were coupled to hydrometeorological data from Environment Canada (fig. 4). The results indicate that subaerial movements occur when the air temperature hovers around zero, and so movements are more active in fall and spring. We also noticed that falling rocks and boulders are the most frequently observed events and that the vast majority of events (80%) occurred at the top of bank or center causing some impact on the bottom of the bank. DEMs show little changes countable in millimeters. They are easy to use and can cover a large area at once. With these results we have created a conceptual model (fig. 6) incorporating basal endpoint control concept (Carson et Kirkby, 1972; Thorne et Tovey, 1981; Casagli *et al.*, 1999; Dapporto *et al.*, 2001; Wood *et al.*, 2001) where all processes are in interaction, but put the dominant factor of each process on axis. It allows correlating climate changes and lateral migration into another position because subaerial movements are controlled by hydrometeorological conditions. The model tends to see the movement as the engine subaerial erosion of banks as opposed to the current vision that focuses almost entirely on fluvial erosion. It also indicates that we should not underestimate the contribution of subaerial movements in future researches, considering actual alarming climate change models.

3.1 INTRODUCTION

L'érosion des berges est un phénomène complexe de la dynamique géomorphologique des rivières. Elle contribue au développement des méandres, à l'ajustement des chenaux (Casagli *et al.*, 1999; Dapporto *et al.*, 2001) et à la migration latérale (Lawler, 1992; Couper et Maddock, 2001). Elle représente de ce fait un aléa dont il faut tenir compte dans la gestion des risques fluviaux. L'érosion des berges est aussi un processus écologique nécessaire (Piégay *et al.*, 1997) en contribuant par exemple à la succession végétale à l'intérieur de méandres abandonnés (Salo *et al.*, 1986). L'érosion des berges des cours d'eau constitue ainsi une composante clef du système fluvial qui est associée aux transferts sédimentaires, à l'évolution des tracés fluviaux et à la diversité des écosystèmes (Florsheim *et al.*, 1997). La compréhension des processus responsables de l'érosion des berges demeure une connaissance primordiale pour la gestion de ces systèmes (Hooke, 1979).

On reconnaît généralement trois groupes de processus contribuant à l'érosion des berges : l'érosion fluviale, les mouvements de masse et les mouvements subaériens d'effritement. Ces trois groupes sont intimement liés et agissent de concert comme l'explique le concept d'équilibre des berges (basal endpoint control) (Carson et Kirkby, 1972; Thorne et Tovey, 1981; Casagli *et al.*, 1999; Dapporto *et al.*, 2001; Wood *et al.*, 2001). D'après ce concept, les mouvements subaériens affaiblissent la berge préalablement à l'érosion fluviale alors que l'instabilité provenant d'un sapement basal trop

important engendre l'apparition de mouvements de masse. L'ajout sédimentaire à la base de la berge provenant des mouvements de masse et, dans une certaine mesure, des mouvements subaériens augmente la stabilité de la berge en abaissant l'angle de la berge. Lorsque l'érosion fluviale retire cet excès sédimentaire, la berge se déstabilise et les mouvements de masse et subaériens reprennent. L'érosion fluviale et les mouvements de masse ont reçu considérablement plus d'attention en recherche que les mouvements subaériens dans l'étude de l'érosion des berges. Ceci est en partie lié au fait que les mouvements subaériens sont souvent considérés comme des processus « préparatoires » qui affaiblissent la berge, ce qui facilite alors l'érosion fluviale et les mouvements de masse (*e.g.* Wolman, 1959; Duijsings, 1987; Thorne, 1990; Lawler *et al.*, 1997; Green *et al.*, 1999). Certains auteurs (*e.g.* Abernethy et Rutherford, 1998; Luppi *et al.*, 2009) mentionnent que la nature saisonnière de ces processus rend leur étude très complexe alors que d'autres (*e.g.* Rinaldi et Darby, 2007; Rinaldi et Casagli, 1999) considèrent qu'il importe d'étudier les processus d'érosion « dominants », *i.e.* les mouvements de masse et l'érosion fluviale, soulignant implicitement que les mouvements subaériens jouent un rôle secondaire dans la dynamique d'érosion des berges.

S'opposant à cette hypothèse qui considère les mouvements subaériens comme processus préparatoires, Couper et Maddock (2001) ont suggéré que, lorsqu'ils sont observés sur une longue période de temps, les mouvements subaériens constituent un apport sédimentaire au cours d'eau du même ordre de grandeur que l'érosion fluviale et les mouvements de masse. À partir d'un suivi de 16 mois sur les berges de la rivière Arrow (Royaume-Uni), les auteurs ont été en mesure d'extraire des taux d'érosion moyens annuels pour les trois groupes de processus. Dans cette étude, l'érosion fluviale, d'une amplitude et d'une fréquence moyenne, a généré une érosion moyenne de 57,2 mm pour la période concernée, les mouvements de masse, très rares, mais très intenses, ont généré une érosion moyenne de 500 mm, alors que les mouvements subaériens, de faible amplitude, mais très fréquents, ont généré une érosion moyenne de 47,9 mm sur l'ensemble de la berge. Ces résultats, bien qu'établis pour une courte période, soulignent la contribution significative des mouvements subaériens à la production sédimentaire du cours d'eau, mais surtout au recul de la berge. Ils soulignent également la nécessité d'observer et de considérer à la fois l'amplitude et la fréquence des processus dans une évaluation exhaustive des processus contribuant au bilan sédimentaire et à la dynamique d'érosion des berges.

Dans la foulée des travaux de Couper et Maddock (2001), cet article présente une étude visant à documenter la contribution des mouvements subaériens à la dynamique d'érosion des berges. Plus spécifiquement, nous voulons démontrer que ces mouvements peuvent être sous-estimés en tant qu'agent érosif et que le rôle des mouvements subaériens doit être considéré non seulement à travers une dimension spatiale, mais aussi à travers une dimension temporelle. Cet article décrit des processus

responsables des mouvements subaériens sur une berge de la rivière Ouelle, Québec-Canada, à l'aide d'un suivi photographique et quantifie la récurrence et les volumes de sédiments mobilisés par des mouvements subaériens à l'aide de relevés topographiques à haute résolution spatiale et temporelle. L'influence des conditions hydrométéorologiques régionales sur ces mouvements est également discutée.

3.2 SITE D'ÉTUDE

Le site d'étude se trouve dans la portion inférieure du bassin versant de la rivière Ouelle, dans le Bas-Saint-Laurent (figure 3.1). La rivière Ouelle, tributaire du fleuve St-Laurent, s'écoule en grande partie sur les Appalaches et draine une superficie de près de 850 km² sur 75 km de longueur. La station 022704 du Centre d'Expertise Hydrique du Québec, situé à Sainte-Anne-de-la-Pocatière indique que la rivière possède un débit moyen annuel de 15,7 m³/sec et des débits maximal et minimal moyens de 220,6 m³/sec et 0,8 m³/sec, respectivement. La moyenne annuelle des précipitations liquides est de 672,9 mm alors que la moyenne des précipitations solides équivaut à 288,5 cm. Le site à l'étude est une berge en érosion de 44 mètres de hauteur orientée NNE-SSO (figure 3.2a) dans une section rectiligne de la rivière Ouelle. La berge correspond à un till d'ablation constitué de sédiments hétérométriques recouvert par une végétation éparse, herbacée et arbustive, sur une pente de 33 ° (figure 3.2b). Le lit à cet endroit est à une altitude de 108 mètres et la pente du chenal est égale à 0,02 %. La granulométrie de la berge (fraction < 2 mm; *D50*) est de 14,7 µm alors que celle du lit et des bancs (fraction > 2 mm; *D50*) est de 270 mm. La morphologie rectiligne du chenal à cet endroit a grandement contribué à la sélection du site d'étude. Le facteur rectiligne suggère que l'érosion par l'action hydraulique est faible. La pente relativement douce de la berge suggère aussi que les mouvements de masse sont rares à cet endroit. De plus, le matériel utilisé exigeait un site facilement accessible pour le suivi fréquent. Le site Saint-Onésime comblait parfaitement ce besoin.

3.3 MÉTHODOLOGIE

Auparavant, l'étude de l'érosion des berges nécessitait des relevés intensifs à l'aide de tiges d'érosion ou de profils transversaux (Lawler, 1993b). La version électronique des tiges d'érosion, pour obtenir des données en continu (Lawler, 1993b), et du profileur de berge électronique, pour couvrir une plus grande surface de berge que les tiges d'érosion (Prosser *et al.*, 2000), a facilité l'étude de l'érosion des berges. Néanmoins, aucune méthode ne réussit à couvrir une grande surface de berge tout en enregistrant des données en continu. Considérant la fréquence élevée et la faible intensité des

processus subaériens, il importe pour les documenter de mettre en place une méthodologie d'analyse combinant une haute résolution spatiale et une haute résolution temporelle. Cette étude utilise une telle méthodologie. Elle repose sur des campagnes de terrain combinant des observations à haute résolution spatiale à l'aide d'un LIDAR terrestre et à haute résolution temporelle à l'aide d'une caméra automatisée.

3.3.1 Séries photographiques de la berge

Pour décrire les processus subaériens sévissant sur la berge, une caméra Reconyx RC55 Rapidfire™ a été installée sur le site à un peu moins de 50 mètres de la berge. Des photographies couleur (image à résolution de 3.1 mégapixels) ont été prises de septembre 2009 à avril 2010 à raison d'une photographie par heure. Ces photographies constituent une série temporelle documentant les événements se produisant sur l'ensemble de la berge. Une analyse visuelle détaillée des photographies a permis de caractériser les événements d'érosion sur la berge et de construire une série. Six processus différents ont été identifiés : le ruissellement à compétence élevé, le ruissellement à compétence faible, les décrochements, les avalanches, les chutes de blocs et les chutes d'arbre (tableau 3.1). Toutes les occurrences de ces processus ont été identifiées à partir des séries photographiques. Pour chaque événement, l'amplitude et la position relative sur la berge ont été notées. Pour l'amplitude des processus, elle est évaluée et qualifiée de faible, moyenne ou élevée en fonction de la surface de la berge touchée par la mobilisation de sédiments par section. Pour ce faire, une note sur dix (/10) a été attribuée à chacun des mouvements. Un mouvement ayant touché moins de 3/10 de la surface de la berge dans sa section est considéré comme faible. Un mouvement touchant entre 4 et 7/10 de la surface de sa section est considéré comme ayant une amplitude moyenne alors qu'un mouvement touchant à plus de 7/10 de la surface représente une amplitude élevée. Pour la position relative, la berge a été divisée en trois sections de haut en bas soit haut (H), centre (C) et bas (B) et pareillement de l'amont vers l'aval en I, II et III (*cf.* figure 3.2). La série photographique a aussi permis de faire le suivi des conditions météorologiques locales de façon qualitative. Cette série a été utilisée pour évaluer les événements hydrométéorologiques ayant pu influencer les processus subaériens observés.

La prise de photographie horaire comporte des limites. Par exemple, l'angle d'ensoleillement nuit à la clarté des images alors que des précipitations trop intenses ou encore le brouillard limitent la visibilité. De plus, puisque la caméra prend des données à distance, elle ne peut fournir des informations sur certains processus reconnus : les aiguilles de glace, la contraction-dilatation de la berge ou encore l'humidité de la berge (*e.g.* Wolman, 1959; Lawler *et al.*, 1997). Pour ce faire, d'autres outils méthodologiques doivent être utilisés pour obtenir des données décrivant l'état interne

de la berge. Sans aucun doute, ces processus auraient avantage à être documentés. Cependant, les choix méthodologiques ne permettent de fournir des informations que sur les processus visibles sur la caméra dans le cadre d'un suivi annuel. La présente étude traite de l'érosion d'une berge de grande superficie suivie mensuellement sur une période de 10 mois. Pour cette raison, nous nous sommes concentrés sur les processus subaériens les plus visibles à l'aide des photographies.

3.3.2 Les modèles de terrain à haute résolution

Des modèles numériques de terrain (MNT) à haute résolution obtenus à différents moments dans le temps peuvent être comparés pour obtenir des modèles numériques des différences d'élévation (MNDE). Des volumes en sédiments peuvent être extraits de l'observation des changements morphologiques à l'aide de MNDE (Lane *et al.*, 2003). Nasermoaddeli et Pasche (2008) ont utilisé cette méthode pour mesurer l'érosion fluviale et les mouvements de masse le long de la rivière Hardebek-Brokenlander en Autriche. Ils ont conclu que l'utilisation de LIDAR terrestre pour mesurer les changements morphologiques des berges est une méthode rapide et précise. Les auteurs réussissent à quantifier des gains nets aussi petits que 14 mm pour un mois. Oppikofer *et al.* (2006) ont eux aussi souligné l'efficacité des images provenant de LIDAR terrestre après avoir obtenu des résultats variant entre 35 et 40 cm sur les berges de Sorge River en Suisse. Resop et Hession (2010) ont analysé l'érosion d'une berge du ruisseau Stroubles, Blacksburg, Virginie. Pour ce faire, deux méthodes d'analyse ont été comparées : le théodolite et le scanneur laser terrestre. Ils concluent que le scanneur laser capte de l'information sur l'entièreté de la berge plutôt que sur une section transversale comme le fait le théodolite et est donc, de ce fait, l'outil le plus précis entre les deux techniques. Les données obtenues indiquent une érosion moyenne de 150 mm par année.

Pour quantifier la contribution des processus subaériens à l'érosion des berges, plusieurs MNTs ont été obtenus à des temps différents à l'aide d'un LIDAR terrestre (Leica scan station II). Les scans ont été pris à une résolution de 1 cm donnant en moyenne 10 000 points/m². La surface de la berge possède une rugosité élevée, et de ce fait, nécessite des scans à plus forte résolution pour réussir à capturer le moindre détail dans les différences d'élévation (Schürch *et al.*, 2011). Au total, six MNTs ont été réalisés entre août 2009 et mai 2010 pour obtenir des données saisonnières sur les changements morphologiques. Aucun scan n'a été fait durant les mois d'hiver (décembre, janvier, février et mars) puisque le faisceau du scan ne traverse pas la couverture neigeuse.

Les MNTs ont été traités dans le logiciel Cyclone de Leica puis exportés dans le module Cyclone II topo pour éliminer la végétation et ne garder que la face de la berge dénudée. Le logiciel permet la création rapide de plans topographiques à partir d'un nuage de points. Le logiciel cherche un

point au sol en traversant la végétation et y insère une valeur pour une résolution donnée (Leica Geosystems, 2011). Dans cette étude, le retrait de la végétation a été effectué pour obtenir un MNT de 5 cm de résolution. Cette résolution est un compromis pour minimiser l'effet de l'irrégularité du nuage de points tout en optimisant le temps nécessaire à la mise en œuvre de l'extraction de la végétation. La résolution aux 5 cm obtenue à l'aide de Cyclone II topo n'implique pas un quadrillage parfait de 5cm*5cm puisque le logiciel cherche un point au sol au travers de la végétation. De ce fait, il ne peut réussir à créer un nuage de points équidistants et une interpolation est nécessaire pour comparer les MNT entre eux. Pour déterminer la méthode d'interpolation spatiale la plus fidèle à la réalité, douze méthodes d'interpolation ont été testées à l'aide du logiciel Surfer 8.0 pour deux dates différentes. Une validation croisée de 1000 points repères sur chacune des douze méthodes génère la moyenne et les écarts-types des erreurs d'interpolation. Considérant la densité de points (55 pts/m²), les erreurs sont similaires pour plusieurs méthodes, mais la méthode « Natural Neighbor » génère les plus faibles erreurs tant au niveau de la moyenne que de l'écart-type pour les deux dates. C'est cette méthode qui a été retenue pour les analyses. Comme il s'agit d'une étude sur les mouvements subaériens, l'analyse des données a été effectuée sur la surface de la berge qui n'entre pas en contact avec l'eau. En effet, pour limiter l'impact potentiel de l'érosion fluviale, la surface à l'étude a été déterminée en considérant la limite maximale atteinte par l'eau par le biais du plus haut débit obtenu durant la période d'étude.

3.3.3 Les conditions météorologiques

Les conditions météorologiques proviennent des archives climatiques nationales du Canada à la station météorologique de La Pocatière se situant à 6,6 km du site d'étude. L'intérêt de considérer les données météorologiques régionales est d'évaluer si ces données peuvent être utilisées pour une explication des processus sans que l'on ait recours à des stations météorologiques à même les sites, ce qui est en pratique impossible si l'on désire faire un bilan des processus à une échelle régionale. Ces données régionales sont jumelées aux conditions horaires observables sur les photographies de la caméra automatisée. Des données de température et de précipitation sont extraites de ces deux outils d'analyse et mises en relation avec les mouvements observés sur les photographies (*cf.* figure 3.3).

3.4 RÉSULTATS

3.4.1 Caractéristiques des mouvements subaériens sur la berge

Le tableau 3.2 donne les caractéristiques des mouvements subaériens répertoriés entre septembre 2009 et avril 2010 à l'aide des photographies obtenues par la caméra automatisée. Le tableau classe les mouvements selon le type, l'amplitude et la position sur la berge. Les chutes de blocs sont les événements observés le plus fréquemment. À eux seuls, ces mouvements représentent 50 % des 91 mouvements subaériens répertoriés. Ils possèdent une amplitude moyenne dans 40 % des cas et faible dans 60 % des cas. Par la suite, le ruissellement à compétence faible et les avalanches sont les mouvements les plus fréquents avec 17,6 % et 15,4 % respectivement. Le ruissellement à compétence élevé suit avec 11 % des mouvements totaux. Les décrochements et chutes d'arbre sont pour leurs parts peu fréquents, mais possèdent une amplitude forte à moyenne forte dans tous les cas.

La très grande majorité des événements (80 %) se produisent en haut ou au centre de la berge, mais ont des répercussions morphologiques au bas de la berge. Parmi ces 80 %, 70 % correspondent à des événements apparus au centre de la berge, soit plus de la moitié des mouvements totaux, alors que seulement 10 % correspondent à des mouvements d'amplitude élevée. Le nombre de mouvements observés de faible et de moyenne amplitude est équivalent à ceux au centre de la berge.

Le ruissellement de faible compétence possède une amplitude faible au haut de la berge, atteint une amplitude forte au centre pour ensuite diminuer au bas de la berge en raison de la pente qui s'amenuise. Le ruissellement de compétence élevée, bien moins fréquent, suit le même patron.

Les avalanches pour leur part touchent les trois zones, mais sont plus fréquentes en haut et au centre de la berge. Elles atteignent une forte amplitude au centre de la berge seulement. De forts décrochements ont seulement été observés en haut de berge. La pente plus abrupte à cet endroit et la présence de discontinuités thermiques (les arbres et le débord organique) et structurales au sein de manteau neigeux expliquent cette observation.

La chute d'arbres s'observe aussi en haut de berge où la pente abrupte et le sol humide par le ruissellement constant diminuent l'emprise des racines dans le sol. La chute d'un arbre en haut de la berge a entraîné la chute d'un autre arbre au centre de la berge. Finalement, la chute de blocs, qui correspond de loin à l'événement le plus fréquent, s'observe dans les trois zones, mais se produit principalement au centre de la berge (26 événements sur 46).

3.4.2 La chronologie des mouvements subaériens

La figure 3.3 présente la chronologie des quatre-vingt-onze mouvements subaériens répertoriés à l'aide des photographies. L'occurrence des mouvements est présentée avec les séries temporelles des précipitations et des températures régionales selon les jours juliens. Les cercles noirs, gris et blancs identifient les mouvements survenus respectivement dans le haut, le centre et le bas de la berge. La taille des cercles désigne l'amplitude relative des mouvements. Pour faciliter les observations, le tableau 3.3 précise la moyenne des précipitations survenues dans les dernières 24 heures, 48 heures et lors de la dernière semaine précédant un événement. Le tableau permet aussi d'observer le nombre de cycles gel-dégel selon les mêmes paramètres.

Les résultats soulignent que les mouvements subaériens se produisent plus fréquemment lorsque la température de l'air oscille autour de zéro. Ainsi, les mouvements surviennent surtout à l'automne et au printemps. À l'automne 2009, seize (16) événements ont été répertoriés entre la mi-octobre et la mi-décembre alors qu'au printemps 2010, cinquante-sept (57) événements ont été répertoriés entre le 24 février et le 14 avril. Le redoux hivernal de fin janvier début février 2010 a provoqué lui aussi plusieurs événements. De plus, la plupart des événements surviennent après une période de précipitations liquides. Ainsi, les petits événements du début du mois de novembre 2009 se produisent après une période de moyenne précipitation (40 mm sur une semaine) et trois cycles gel-dégel (sur 23 jours). Les événements plus nombreux de la fin novembre et du début du mois de décembre 2009 suivent pour leur part une période de précipitations totalisant 101 mm en deux semaines, précipitations qui furent accompagnées de deux (2) cycles gel-dégel complets. Cette combinaison est intervenue à d'autres reprises. Entre les jours juliens 20 et 38, onze (11) mouvements ont été observés durant une période de redoux accompagnée de précipitations liquides (19mm). Entre les jours 67 et 105, six (6) cycles gel-dégel accompagnés de pluie (64mm) ont eu lieu, produisant cinquante-trois (53) mouvements de tous les types, sauf décrochement et chute d'arbre. Les mouvements de chutes d'arbre et de décrochement correspondent à des moments où le sol est gorgé d'eau en raison des fortes précipitations. En observant le tableau 3.3, les précipitations liquides semblent avoir un rôle majeur dans le déclenchement de ces événements. Au jour julien 283, deux (2) chutes d'arbre sont survenues après un total de 63,7 mm de pluie en une semaine. Au jour julien 332, une autre chute d'arbre est survenue alors que 25 mm de pluie sont tombés durant les trois (3) jours précédant l'événement. Les décrochements du 55^e jour julien coïncident avec à une période de précipitation intense, soit de 43 mm de pluie en trois (3) jours. Les chutes de blocs, qui représentent les mouvements les plus fréquents, ainsi que les avalanches sont survenues, dans la grande majorité des cas, combinant précipitations liquides et cycles gel-dégel.

Ces observations soulignent que la fréquence des cycles gel-dégel ou la quantité de précipitation reçue sur une courte période de temps augmentent la probabilité d'observer un mouvement. Toutefois, il convient de rappeler que les données météorologiques utilisées proviennent d'une station située à 6,6 km de notre site d'étude et que les conditions réelles qui prévalaient sur ce site étaient probablement légèrement différentes en particulier en raison de l'altitude plus élevée.

3.4.3 Les changements morphologiques

Les MNDE permettent d'obtenir des données sur les volumes de sédiments accumulés ou érodés (en m^3) par unité de surface (en m^2). Pour saisir plus facilement les résultats des MNDE et comparer les résultats avec ceux des autres études, les données sont présentées en gain net. La valeur de gain net est obtenue en divisant le volume érodé ou d'accumulé par la surface de berge. Elle s'exprime donc comme une épaisseur moyenne (en mm) de sédiments mobilisés. Une valeur positive est associée à une accumulation alors qu'une valeur négative est associée à une érosion.

La figure 3.4 présente les gains nets provenant de six MNDE. Les cinq premiers MNDE proviennent de la superposition des MNEs mensuels alors que le sixième provient de la superposition des MNEs des mois d'août 2009 et mai 2010 (9 mois de différence entre les deux relevés). On retrouve en rouge, les zones d'érosion, en vert, les zones d'accumulation et en blanc, les zones sans changement topographique significatif. La figure spécifie également la position sur la berge (haut, centre, bas) et le tableau 3.4 présente les calculs de gains nets pour les positions relatives sur la berge.

Le MNDE entre les mois d'août et septembre traduit un gain net de -4,3 mm réparti sur l'ensemble de la berge. Cependant, l'érosion est plus importante au centre et en bas de berge (tableau 3.4). Le MNDE entre les mois de septembre et octobre 2009 expose un gain net de 47,5 mm sur l'ensemble de la berge avec une étroite bande d'érosion à proximité de la berge. Le tableau 3.4 atteste que le gain le plus important se trouve en haut de berge. Le MNDE entre les mois d'octobre et de novembre 2009 montre une accumulation en haut de berge alors qu'une érosion est perceptible au centre. Le MNDE entre les mois de novembre et avril présente la même dualité. Durant cette longue période, le haut de la berge a été érodé (-24,2 mm) alors que le centre (3,9 mm) et le bas (70,5 mm) de la berge ont été en progradation. Le MNDE entre les mois d'avril et mai 2010 révèle une érosion marquée de près de 80 mm à la base de la berge alors que le haut et le centre s'érodaient de 62 mm et 36 mm respectivement. Finalement, les gains nets obtenus en observant le MNDE entre les mois d'août 2009 et mai 2010 témoignent que l'ensemble de la berge subit une érosion marquée en haut de

berge et au centre de la berge alors que la base de la berge reçoit les sédiments érodés qui s'accumulent en bas de pente.

3.5 DISCUSSION

3.5.1 Contribution saisonnière des mouvements subaériens à l'érosion des berges

L'analyse de la chronologie et des caractéristiques des mouvements subaériens combinée aux modèles numériques des différences d'élévation permet d'éclairer la contribution de ces mouvements à l'érosion des berges. À l'aide de la méthodologie utilisée, les processus subaériens sont difficilement quantifiables de façon individuelle. Cependant, en observant une paroi entière il devient possible d'obtenir des données volumétriques à l'aide de MNDE. Les MNDE permettent d'observer rapidement les changements survenus sur une grande surface.

Les volumes provenant des MNDE, les photographies et les conditions météorologiques suggèrent que les pluies des mois d'août et septembre arrachent les particules fines sur la surface de la berge. ce qui explique les faibles taux d'érosion de -4,3 mm sur l'ensemble de la berge comparativement à des taux plus élevés entre les mois d'avril et mai 2010 de 57,0 mm. En effet, Bryan (2000) fait ressortir à la fois l'importance du ruissellement par l'eau pour éroder les particules en surface, mais aussi l'impact des gouttes de pluie sur les taux d'érosion. Le scan effectué au mois d'octobre 2009 a été enregistré suite à une forte période de pluie. Abernethy et Rutherford (1998) soulignent que les berges qui subissent des cycles d'humidification-dessiccation subissent par le fait même des cycles de contraction-dilatation. Ainsi, le gain net de 47,5 mm obtenu à partir du MNDE entre les mois de septembre et d'octobre 2009 suggère que la pluie fait gonfler la berge suffisamment pour que ce gonflement soit perceptible par le scan. En parallèle, celui du mois de mai 2010 a été effectué suite à une très faible période de pluie. Alors que la glace de ségrégation s'installait aux mois de septembre-octobre 2009, elle fondait aux mois d'avril-mai 2010. Pissart (1987) mentionne que l'eau, lorsqu'elle passe de la phase liquide à la phase solide, augmente en volume de près de 10 %. Cette augmentation de volume se répercute directement sur le volume de la berge elle-même. Il semble ainsi que le scan est assez sensible pour capter les gonflements de la berge, dus à l'humidification et à la présence de glace de ségrégation, difficilement observable à l'œil nu et que, de ce fait, il importe d'instrumenter les berges pour de telles recherches.

Pour appuyer nos propos, les MNDE révèlent clairement quelques mouvements recensés à l'aide de la caméra automatisée. Tout d'abord, le MNDE entre les mois de septembre et octobre 2009 en IHC et IICB montre bien les chutes de cailloux, de blocs et d'arbres, répertoriées entre les scans.

De plus, le MNDE entre les mois d'octobre et novembre 2009 montre clairement tous les événements répertoriés à l'aide des photographies. Les mouvements observés ont tous eu lieu en IIICB, puis les sédiments se sont accumulés en bas de pente. Le MNDE entre les mois de novembre 2009 et avril 2010 montre très bien les mouvements d'amplitude moyenne et forte observés sur les photographies. Ces mouvements ont tous eu lieu en IH, IIHC et IIICB. L'accumulation des sédiments en bas de pente est aussi bien enregistrée, de même que plusieurs petits événements survenus en IIB. Le MNDE entre les mois d'avril et mai 2010 met enfin en relief le ruissellement important reçu en IH et IIHC.

3.5.2 Changements environnementaux et processus subaériens

Le suivi fréquent à l'aide de scans au site Saint-Onésime sur une longue période de temps combiné aux images obtenues à l'aide de la caméra permettent de mettre en relation les résultats et les données météorologiques régionales. Par exemple, entre la fin du mois de février 2010 et le début du mois de mai 2010 plusieurs mouvements subaériens ont eu lieu pendant de nombreux cycles gel-dégel. Selon les données du consortium OURANOS (2010), les températures journalières moyennes ont augmenté de 0,2 à 0,4 °C par décennie dans le sud du Québec. De plus, les hivers sont plus courts et nous faisons actuellement face à une augmentation du nombre de jours avec précipitations de faible intensité. Les prévisions du consortium à l'horizon 2050 annoncent un réchauffement climatique touchant l'ensemble du territoire québécois et une augmentation des précipitations solides dans le sud du Québec allant de 8,6 % à 18,1 % selon les modèles. Cependant, l'augmentation des précipitations solides est aussi accompagnée d'une hausse des températures et d'une arrivée précoce du printemps limitant alors la création d'un couvert nival. Les bouleversements climatiques annoncés laissent sous-entendre que la contribution relative de chacun des types de processus érosifs risque d'être modifiée à son tour. En effet, les températures plus chaudes peuvent se traduire par des oscillations autour de zéro degré Celsius plus fréquentes. Les précipitations plus importantes et plus nombreuses annoncent une amplification des mouvements subaériens par une augmentation du ruissellement, par l'activité amplifiée des gouttes de pluie et par l'érosion interne incluant la suffosion (Bernatchez et Dubois, 2004; Bryan, 2000). En ce sens, la contribution des mouvements subaériens à l'érosion des berges pourra être exacerbée.

Le concept d'équilibre des berges affirme que l'érosion fluviale entraîne les mouvements de masse par le sapement basal (Carson et Kirkby, 1972; Thorne et Tovey, 1981) alors qu'en échange, les processus subaériens entraînent une accélération de l'érosion fluviale (Wolman, 1959; Lawler, 1993b). Les mouvements subaériens sont largement contrôlés par les variations climatiques. Des changements dans les conditions climatiques (précipitations, températures) peuvent modifier la fréquence et

l'amplitude des mouvements subaériens et, par conséquent, entraîner une accélération de l'érosion des berges par l'action hydraulique.

La figure 3.5 est plus spécifiquement un modèle conceptuel intégrant le concept d'équilibre des berges tout en considérant l'influence des changements climatiques sur les processus. Le facteur dominant de chaque processus se retrouve en grisé. Le modèle fait ressortir la nécessité d'étudier à la fois l'érosion fluviale et les mouvements subaériens pour mieux comprendre l'effet des changements climatiques sur l'érosion des berges. La flèche pointillée rappelle la relation indirecte existant entre les mouvements de masse et les changements climatiques, en raison du concept d'équilibre des berges. En effet, si les mouvements subaériens et l'érosion fluviale sont plus fréquents ou plus rares par le biais des changements climatiques, les mouvements de masse seront eux aussi plus fréquents ou plus rares en lien avec le concept d'équilibre des berges. Ce modèle propose une vision plus complète des processus contribuant à l'érosion des berges. Comme les mouvements subaériens sont contrôlés par les conditions hydrométéorologiques, le modèle permet de corrélérer les changements climatiques et la migration latérale. Par exemple, si les précipitations liquides deviennent plus fréquentes, les mouvements subaériens seront accélérés, affaiblissant la berge par le fait même, et ainsi augmenteront l'érosion fluviale. L'érosion fluviale pourra devenir assez importante pour provoquer un mouvement de masse. Aussi, si les sédiments produits par les mouvements subaériens ne sont pas lessivés par l'érosion fluviale, l'angle de la berge sera modifié par une accumulation importante en sédiments, qui minimisera les risques d'observer des mouvements de masse.

Le modèle considère les mouvements subaériens comme une des trois composantes fondamentales contribuant au recul des berges. Il élargit la vision actuelle qui estime les processus subaériens comme étant simplement préparatoires. Le modèle souligne également que l'activité des mouvements subaériens peut influencer directement celle de l'érosion fluviale de différentes façons. Comme mentionné précédemment, les mouvements subaériens peuvent diminuer la cohésion d'une berge et amplifier l'érosion produite par l'activité hydraulique lorsque le débit grimpe. Cependant, les mouvements subaériens peuvent jouer un tout autre rôle. Ils peuvent en effet exacerber ou étouffer le rôle de l'érosion fluviale. Plus les mouvements subaériens sont actifs et moins l'érosion fluviale pourra s'attaquer au pied de berge, car elle devra libérer les sédiments produits par les mouvements subaériens. Par contre, si la production de sédiments subaériens est moindre, l'érosion fluviale sera en mesure de saper plus facilement le pied de berge. Le modèle souligne la nécessité de considérer les mouvements subaériens dans l'étude de l'érosion des berges, et ce, principalement dans le contexte actuel où les modèles climatiques exposent de grandes modifications du climat dans un avenir proche (e.g. Ouranos, 2010; Arora et Boer, 2001). Le modèle fait ressortir l'importance d'étudier davantage

l'érosion fluviale et les mouvements subaériens directement contrôlés par les conditions hydrométéorologiques.

3.6 CONCLUSION

Cette étude a documenté la contribution des mouvements subaériens à la dynamique d'érosion d'une berge de la rivière Ouelle pendant près d'une année. L'étude reposait sur l'utilisation de deux approches méthodologiques, l'une basée sur le suivi photographique de la berge permettant de déterminer l'occurrence des événements, l'autre basée sur des relevés topographiques à très haute résolution spatiale à l'aide d'un Lidar terrestre. Les deux méthodes sont complémentaires et ont permis de mieux comprendre le rôle des différents mouvements subaériens. Les conclusions qui découlent de cette recherche sont :

- Les mouvements subaériens génèrent des épaisseurs d'érosion variant de 5 à 50 mm par mois; l'épaisseur d'érosion variant selon le mois et la position sur la berge.
- Sur la berge retenue, les mouvements les plus fréquemment répertoriés sont les chutes de blocs et de pierres (50 %).
- Tous les mouvements subaériens répertoriés surviennent principalement à l'automne et au printemps lorsque la température oscille autour de zéro ou lorsque des précipitations liquides surviennent.

Ces conclusions suggèrent de considérer les mouvements subaériens dans l'étude de l'érosion des berges. Ils constituent un processus érosif qui risque d'être modifié par les changements climatiques actuels et futurs. Cette étude s'est concentrée sur une petite partie des mouvements subaériens possibles. Cependant, un suivi complémentaire sur les aiguilles de glace devrait être jumelé à une recherche comme la nôtre. En effet, les mouvements apparus lors de cycles gel-dégel révèlent que la glace de ségrégation est sans aucun doute très importante dans la dynamique des mouvements subaériens. De plus, une instrumentation des berges de façon à obtenir des informations sur l'humidité et le régime des températures des sédiments serait pertinente.

La contribution des processus subaériens dans les taux de retrait des berges demeure difficilement quantifiable à l'aide des relevés topographiques mensuels, surtout lorsque les mouvements sont abordés individuellement. Cependant, suite à un suivi de neuf mois, la berge à l'étude n'a subi aucun mouvement de masse, une influence faible de l'érosion fluviale et plusieurs mouvements subaériens. Pour obtenir des données plus justes et plus complètes sur les taux d'érosion des berges, les processus subaériens doivent être considérés, et ce, sur une très longue période de

temps. L'amplitude et la fréquence de chacun des processus responsables de l'érosion des berges des cours d'eau sont à considérer.

REMERCIEMENTS

Cette recherche a été subventionnée par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) ainsi que par le laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale de l'UQAR. Un merci tout spécial à tous les volontaires qui ont apporté une aide indispensable sur le terrain et en laboratoire.

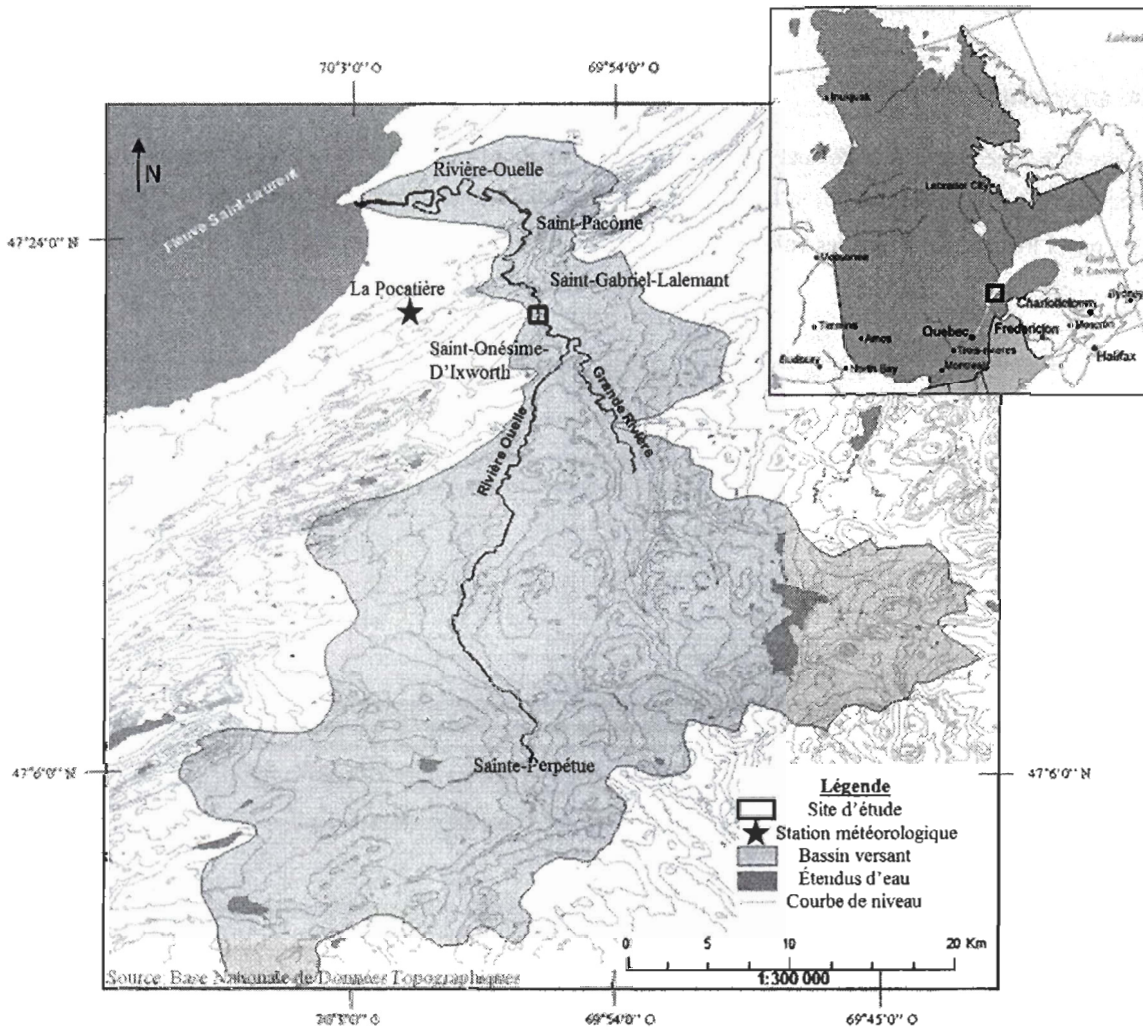


Figure 3.1 - Localisation du site d'étude dans le bassin versant de la rivière Ouelle.

Figure 3.1 - Study site in Ouelle river drainage basin.

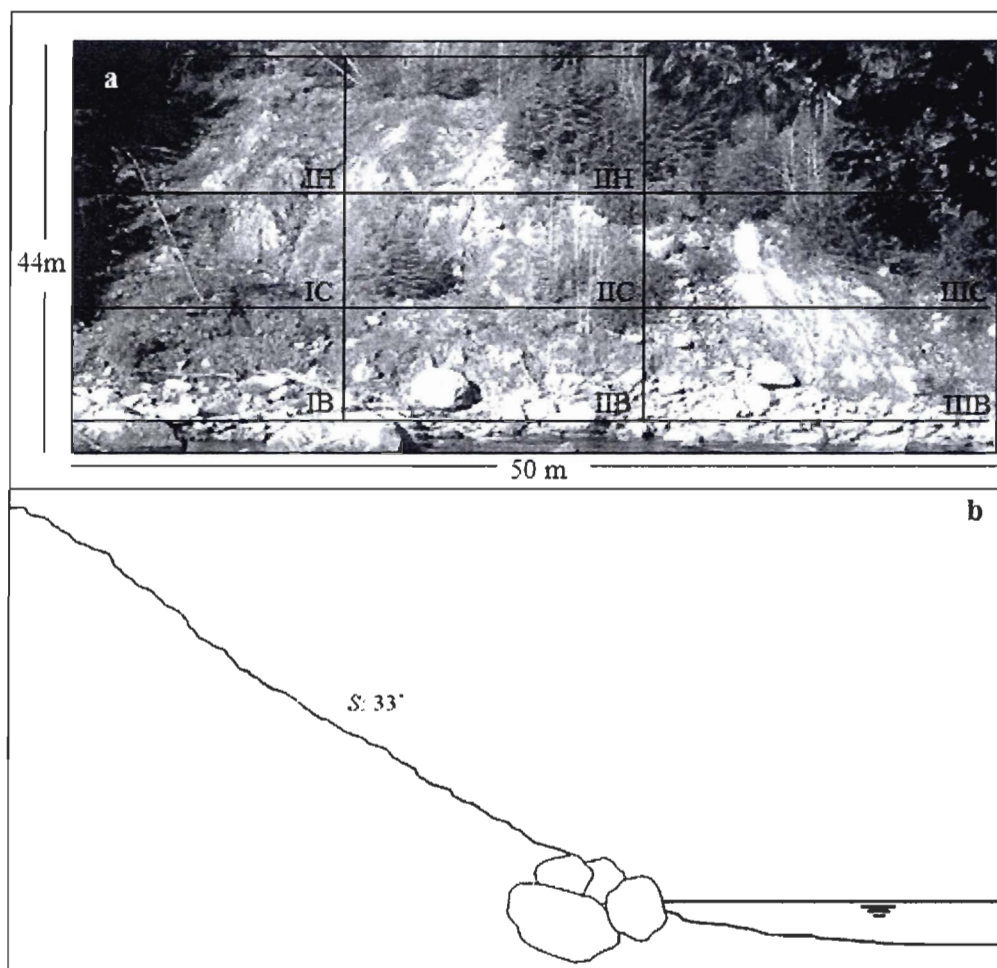


Figure 3.2 - a) Berge du site Saint-Onésime. b) profil de la berge Saint-Onésime. (Photo Caméra Reconyx).

Figure 3.2 - a) Saint-Onésime riverbank. b) Saint-Onésime bank profile. (Photo Caméra Reconyx).

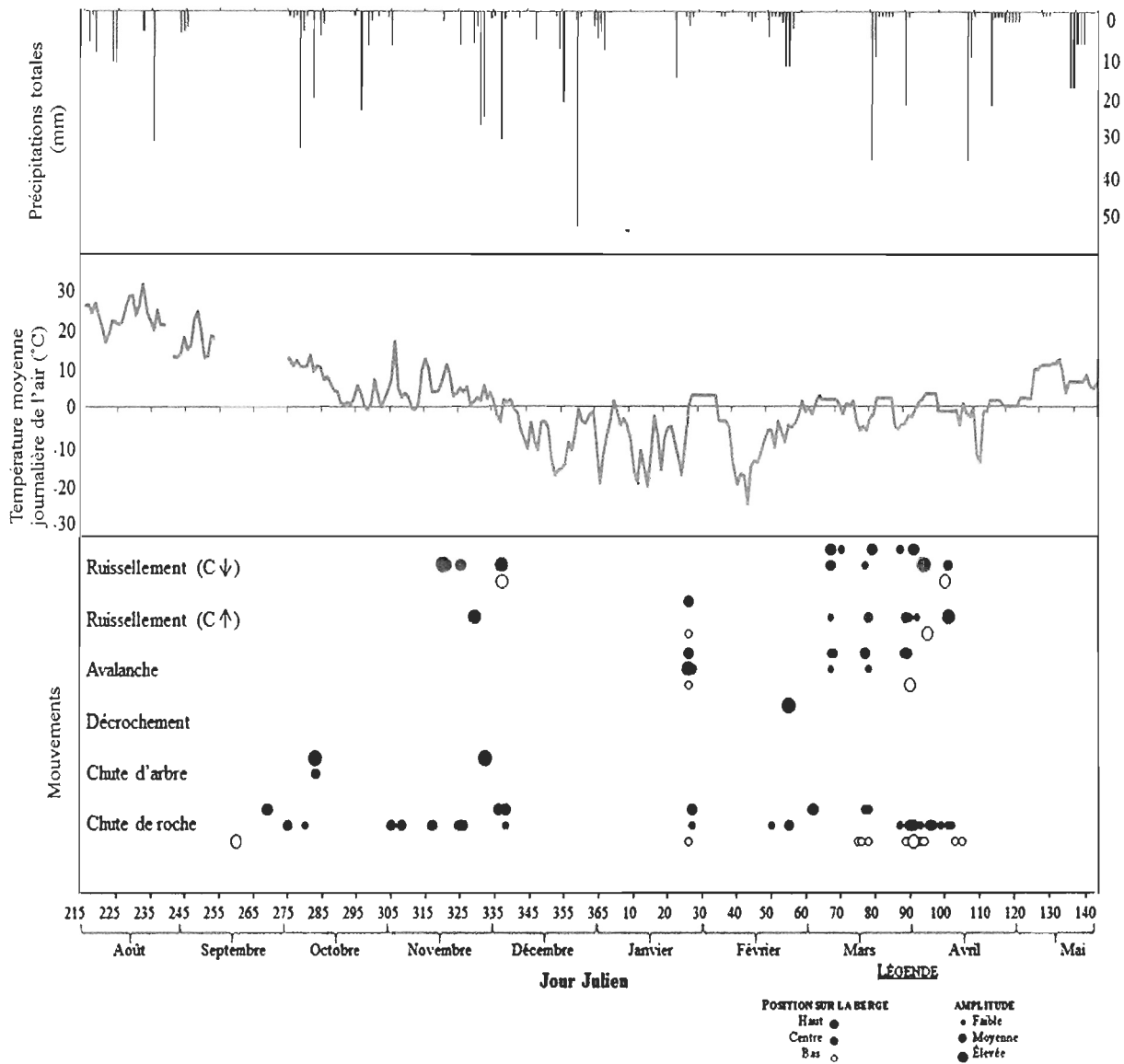
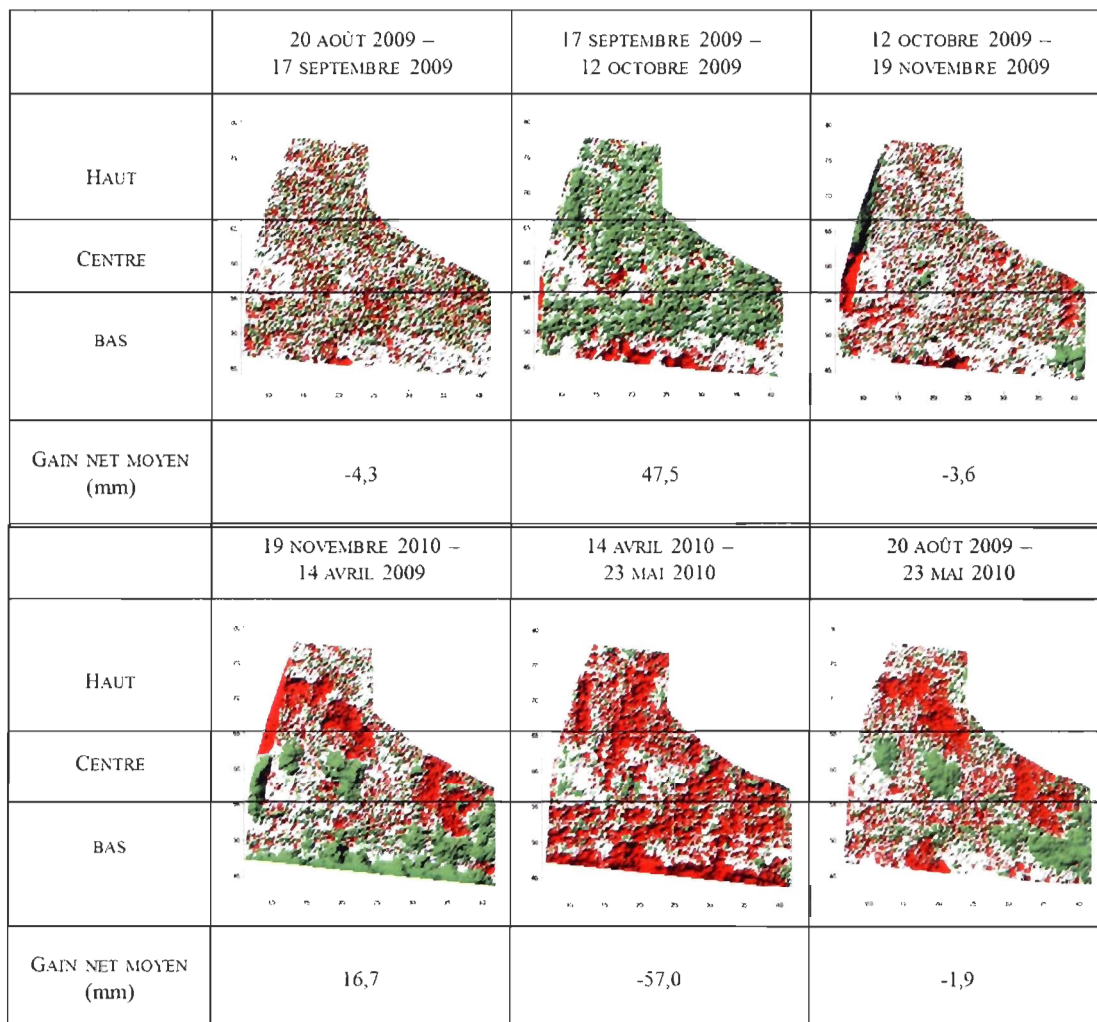


Figure 3.3 - Mouvements subaériens observés sur la berge Saint-Onésime 2009-2010 mis en relation avec la température de l'air et les précipitations à la station météorologique La Pocatière.

Figure 3.3- Subaerial movements observed on Saint-Onésime riverbank in relation with ambient air and precipitations at La Pocatière meteorological station.



LÉGENDE




-  Accumulation
-  Érosion
-  Aucun changement notable

Figure 3.4 - Modèles numériques des différences d'élévation (MNDE) pour le site Saint-Onésime entre août 2009 et mai 2010.

Figure 3.4- Saint-Onésime digital elevation models between August 2009 and May 2010.

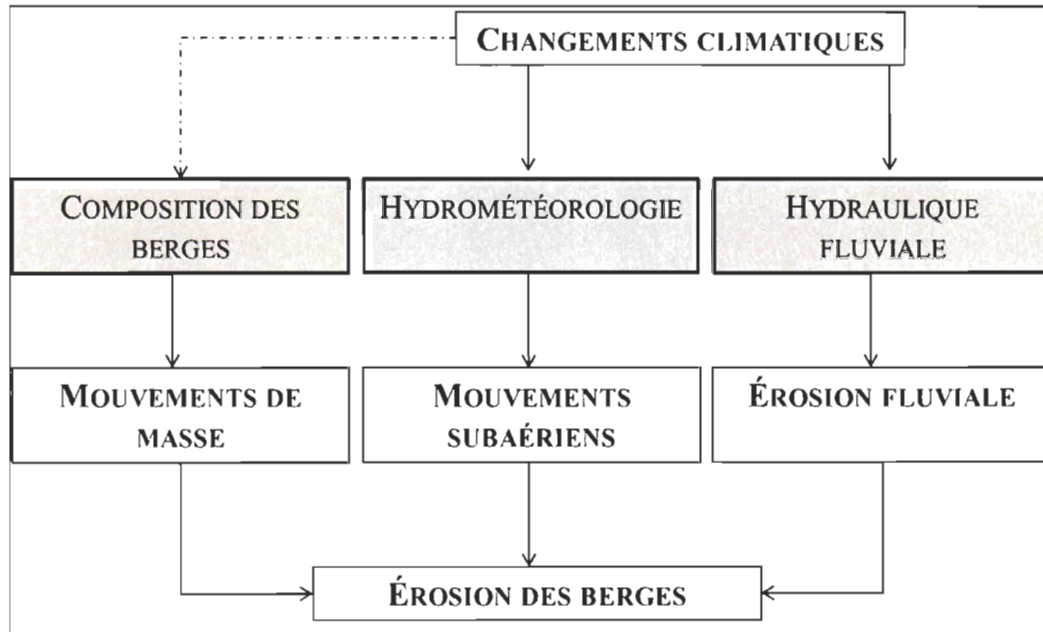


Figure 3.5 - Modèle conceptuel montrant l'influence des changements climatiques sur l'érosion des berges en se basant sur le concept d'équilibre des berges.

Figure 3.5- Conceptual model showing the influence of climate change on riverbank erosion, based on the concept of basal endpoint control.

Tableau 3.1

Les processus subaériens recensés sur la berge Saint-Onésime et leur définition respective

Table 1- Observed subaerial processes and their definition on Saint-Onésime riverbank

Processus	Définition
Ruissellement (C↑)	Fort écoulement de surface lorsque la berge est saturée produit par la fonte accélérée du couvert nival et/ou par de fortes précipitations et transportant des sédiments en bas de pente.
Ruissellement (C↓)	Faible écoulement de surface lorsque la berge est saturée produit par la faible fonte du couvert nival et/ou par de faibles précipitations et transportant des sédiments en bas de pente.
Décrochement	Petite partie de terre se détachant du reste du sol et se dirigeant vers le bas de pente.
Avalanche	Masse de neige se détachant du reste du couvert nival et transportant avec elle des sédiments en bas de pente.
Chute de blocs	Graviers et blocs se détachant de la berge et se dirigeant vers le bas de pente.
Chute d'arbre	Détachement partiel ou complet d'un ou de plusieurs arbres transportant avec eux des sédiments en bas de pente.

Tableau 3.2

Type de mouvements et leur récurrence selon leur position sur la berge et leur amplitude

Table 2- Type of movement and their recurrence according to their position on the bank face and their magnitude

Position Amplitude	Haut		Centre			Bas		Total		
	Élevée	Moyenne	Faible	Élevée	Moyenne	Faible	Élevée		Moyenne	Faible
Ruissellement (C↓)		3	2	3	5	1		2		16
Ruissellement (C↑)		1		2	2	3		1	1	10
Avalanche		3	3	1	3	2		1	1	14
Décrochement	1	1								2
Chute d'arbre	2				1					3
Chute de blocs		5	3		11	15		2	10	46
Total	3	13	8	6	22	21	0	6	12	91

Tableau 3.3

Moyennes des précipitations (mm) et des cycles gel-dégel survenu dans les dernières 24 heures, 48 heures et lors de la dernière semaine pour chacun des processus répertoriés

Table 3- Average rainfall (mm) and freeze-thaw cycles occurred in the last 24 hours, 48 hours and during the last week for each process listed

Processus	Moyenne des précipitations (mm)			Moyenne des cycles gel-dégel		
	Dernières 24 heures	Dernières 48 heures	Dernière semaine	Dernières 24 heures	Dernières 48 heures	Dernière semaine
Ruissellement (C↓)	2,9	7	14,9	0,4	1,6	4,5
Ruissellement (C↑)	9,2	12,2	20,7	0,7	1,6	4,1
Avalanche	7	9,1	16	0,8	1,6	3,8
Décrochement	15,6	27,5	38,4	0	2,5	7
Chute d'arbre	5,8	13,5	61,8	0	0	2,2
Chute de blocs	5,2	8	16,8	0,6	1,5	4,7

Tableau 3.4

Gains nets moyens (mm) provenant des MNDE pour le site Saint-Onésime divisés selon le haut, le centre et le bas de la berge

Table 4- Clear benefits (mm) from DEM divided in top, middle and bottom of the bank face for Saint-Onésime site

	Août- Septembre 2009	Septembre -Octobre 2009	Octobre- Novembre 2009	Novembre 2009- Avril 2010	Avril-Mai 2010	Août 2009- Mai 2010
Haut	-2,9	66,8	3,2	-24,2	-51,9	-26,1
Centre	-5,1	44,1	-10,3	3,9	-36,2	-2,5
Bas	-4,3	35,6	-2,1	70,5	-76,8	18,3
Berge complète	-4,3	47,0	-3,6	16,7	-56,9	-1,9

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les processus responsables de l'érosion des berges des cours d'eau agissent à titre d'acteurs principaux dans la dynamique morphologique des rivières. Ils permettent le développement des méandres, l'ajustement de la largeur des chenaux et la migration latérale et sont par conséquent responsables de la transformation d'une grande partie des plaines alluviales. Ces processus sont généralement divisés en trois grands types : les mouvements de masse, l'érosion fluviale et les mouvements subaériens. Cependant, une incertitude demeure quant à la contribution relative de chacun des processus et, plus spécifiquement, sur l'apport en sédiment de chacun d'eux. Cette incertitude est en partie due au fait que le rôle de chacun des processus est fonction de l'hydrométéorologie du système fluvial et du matériel qui compose les berges. Les mouvements de masse et l'érosion fluviale ont reçu beaucoup d'attention de la part de différents chercheurs au fil du temps. Les mouvements subaériens, pour leur part, sont considérés comme étant des processus préparatoires en affaiblissant la berge pour faciliter l'érosion par les deux autres processus. Ainsi, très peu de données sont disponibles sur les mouvements subaériens et leur contribution relative. Ce mémoire s'est orienté vers la qualification et la quantification des mouvements subaériens en considérant les mouvements subaériens comme des processus érosifs au même titre que l'érosion fluviale et les mouvements de masse. Deux sites d'étude ont été sélectionnés initialement sur la rivière Ouelle : le site Saint-Onésime et le site Fosse de la courbe. Cependant, en raison de l'accès restreint au site Fosse de la courbe, seul le site Saint-Onésime fut retenu pour l'analyse.

La méthodologie utilisée jumelle à la fois une analyse qualitative dans le but de décrire les mouvements subaériens d'érosion des berges et une analyse quantitative pour déterminer leur contribution à l'érosion des berges. Le suivi horaire de la berge en érosion obtenu par la caméra automatisée a mené à l'acquisition de données originales sur les mouvements subaériens. Cette méthode jumelée à la réalisation de multiples MNDE nous permet hors de tout doute d'atteindre un plus grand degré de connaissance sur les processus responsables de l'érosion des berges et leur contribution. Les résultats des deux outils d'analyse indiquent que les mouvements subaériens sont grandement contrôlés par les conditions météorologiques régionales et soulignent le besoin de connaître ces processus davantage dans une optique de changements climatiques. Ils soulèvent d'autant plus l'importance d'étudier les mouvements subaériens sur une longue période temporelle. Leur faible amplitude associée à leur forte fréquence montre qu'ils peuvent contribuer, tout comme les mouvements de masse et l'érosion fluviale, à l'érosion des berges des cours d'eau à titre d'agent érosif et non pas uniquement comme simple processus « préparatoire ». Bien évidemment, des recherches

supplémentaires devront être effectuées en instrumentant les berges de façon à obtenir des informations sur les variations du taux d'humidité et sur le régime des températures à l'intérieur des berges en plus d'intégrer un suivi plus précis sur la glace de ségrégation. En effet, plusieurs mouvements ont été répertoriés alors que la température régionale oscillait autour de zéro degré Celsius.

Cette recherche visait à documenter les mouvements subaériens d'érosion des berges. Malgré tout, la contribution des processus subaériens dans les taux de retrait des berges demeure difficilement quantifiable, surtout lorsqu'ils sont abordés de façon individuelle. Néanmoins, un suivi de neuf mois sur une berge en érosion n'indique aucun mouvement de masse, une mince influence de l'érosion fluviale, alors que de nombreux mouvements subaériens ont pour leur part été répertoriés. De ce fait, nous croyons que pour obtenir des études plus justes et complètes des taux d'érosion des berges, les recherches futures doivent considérer la fréquence élevée des mouvements subaériens et leur amplitude faible et qu'elles doivent ainsi être effectuées sur une plus longue période de temps.

RÉFÉRENCES

- Abernethy, B. et Rutherford, I.D., 1998. Where along a river's length will vegetation most effectively stabilise stream banks? *Geomorphology*, 23 (1), 55-75.
- Allard, G., 2010. Dynamique fluvio-glacielle étude de cas d'une fosse-à-frasil, rivière Mitis, Bas-Saint-Laurent. Mémoire de maîtrise, Université du Québec, 85p.
- Arora, V.K. & Boer, G.J., 2001. Effects of simulated climate change on the hydrology of major river basins. *Journal of Geophysical Research*, 106 (D4), 3335-3348.
- Ashmore, P.E. et Church, M.A., 1998. Sediment transport and river morphology: a paradigm for study. Dans *Gravel-bed rivers in the environment*. Colorado, USA: Peter C. Klingeman, Robert L. Beschta, Paul D. Komar, Jeffrey B. Bradley, 115-148.
- Bernatchez, P. & Dubois, J.-M.M., 2004. Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien. *Géographie physique et Quaternaire*, 58 (1), 45-71.
- BNDT, GéoGratis-Base nationale de données topographiques, Ressources naturelles Canada. [En ligne]: <http://geogratiss.cgd.gc.ca/>. Dernier accès le 15 octobre 2010.
- Brierley, G.J. & Fryirs, K.A., 2005. *Geomorphology and river management: applications of the river styles framework*, John Wiley & Sons.
- Bryan, R.B., 2000. Soil erodibility and processes of water erosion on hillslope. *Geomorphology*, 32 (3-4), 385-415.
- Buffington, J. et Montgomery, D., 1997. A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bedded rivers. *Water Resources Research*, 33 (8), 1993-2029.
- Carson, M.A. et Kirkby, M.J., 1972. *Hillslope Form and Process*, Cambridge University Press, Cambridge, 475 p.
- Casagli, N. *et al.*, 1999. Pore water pressure and streambank stability: results from a monitoring site on the Sieve River, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(12), 1095-1114.
- Chandler, J., 1999. Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24(1), 51-63.
- Charlton, R., 2008. *Fundamentals of fluvial geomorphology*, Routledge, 234p.
- Charlton, M.E., Coveney, S.J., Carthy, T.M.C., 2009. Issues in Laser Scanning Dans *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Wiley-Blackwell, Chichester, George L. Heritage, Andrew R.G. Large, 1-20.
- Chauvin, L., Martineau, G. et LaSalle, P., 1985. Déglaciation of the lower St. Lawrence region, Quebec, Dans *Late Pleistocene History of Northeastern New England and adjacent Quebec*. *Geological Society of America, Special Paper 197*. H.W. Borns *et al.*, 111-123.

- Church, M. et Miles, M.J., 1982. Discussion of processes and mechanisms of bank erosion. Dans: *Gravel-Bed Rivers*. Wiley, Chichester: Hey, R.D., Bathurst, J.C. and Thorne, C.R. (eds.), 259–268.
- CNRT, 2009. Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales. [En ligne]: <http://www.cnrtl.fr/>. Dernier accès le 26 octobre 2010.
- Couper, P.R., 2003. Effects of silt-clay content on the susceptibility of river banks to subaerial erosion. *Geomorphology*, 56(1-2), 95-108.
- Couper, P.R. et Maddock, I.P., 2001. Subaerial river bank erosion processes and their interaction with other bank erosion mechanisms on the River Arrow, Warwickshire, UK. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(6), 631-646.
- Dapporto, S., Rinaldi, M. et Casagli, N., 2001. Failure mechanisms and pore water pressure conditions: analysis of a riverbank along the Arno River (Central Italy). *Engineering Geology*, 61 (4), 221-242.
- Darby, S.E., Gessler, D. et Thorne, C.R., 2000. Computer program for stability analysis of steep, cohesive riverbanks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(2), 175-190.
- Dietrich, W.E. et Gallinatti, J., 1991. Fluvial geomorphology. Dans *Field experiments and measurement programs in geomorphology*. Vancouver B.C.: Slaymaker, O., 169-229.
- Dionne, J., 1988. Note sur les variations du niveau marin relatif à l'holocène, à Rivière-Ouelle, côte sud du Saint-Laurent. *Géographie physique et Quaternaire*, 42 (1), 83-88.
- Dionne, J. et Pfalzgraf, F., 2001. Fluctuations holocènes du niveau marin relatif à Rivière-Ouelle, côte sud du moyen estuaire du Saint-Laurent : données complémentaires. *Géographie physique et Quaternaire*, 55 (3), 289-300.
- Duijsings, J.J.H.M., 1987. A sediment budget for a forested catchment in Luxembourg and its implications for channel development. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12(2), 173-184.
- Edwards, L.M., 1991. The effect of alternate freezing and thawing on aggregate stability and aggregate size distribution of some Prince Edward Island soils. *European Journal of Soil Science*, 42 (2), 193-204.
- Environnement Canada, 2010. Eau - Fleuve Saint-Laurent. [En ligne]: <http://www.ec.gc.ca/stl/default.asp?lang=Fr&n=F46CF5F8-1>. Dernier accès le 15 octobre 2010.
- Florsheim, J.L., Mount, J.F. et Chin, A., 2008. Bank Erosion as a Desirable Attribute of Rivers. *BioScience*, 58 (6), 519-529.
- Furois, V., 2009. *Portrait du bassin versant de la rivière Ouelle*. Comité de Bassin de la rivière Fouquette, 104p.

- Gidas, N., 1985. *Étude sur les inondations causées par les débâcles et la sédimentation (Rivière Ouelle, municipalité de Saint-Pacôme, comté de Kamouraska)*. Ministère de l'environnement. Direction des études du milieu aquatique, 37p.
- Google Earth, 2007. *St-Pacôme*. Logiciel de visualisation terrestre.
- Green, T.R., Beavis, G.S., Dietrich, C.R., Jakeman, A.J., 1999. Relating stream-bank erosion to in-stream transport of suspended sediment. *Hydrological Processes*, 13(5), 777-787.
- Gregory, K., 2006. The human role in changing river channels. *Geomorphology*, 79 (3-4), 172-191.
- Heritage, G.L., Large, A.R.G, 2009. Principles of 3D Laser Scanning. Dans *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Wiley-Blackwell, Chichester, George L. Heritage, Andrew R.G. Large, 1-20.
- Hooke, J., 1979. An analysis of the processes of river bank erosion. *Journal of Hydrology*, 42 (1-2), 39-62.
- Hooke, J.M., 1980. Magnitude and distribution of rates of river bank erosion. *Earth Surface Processes*, 5 (2), 143-157.
- Hubert, C., 1973. Région de Kamouraska, La Pocatière, St-Jean-Port-Joli; Ministère des Richesses naturelles du Québec, Rapport géologique 151, 205p.
- Julian, J.P. et Torres, R., 2006. Hydraulic erosion of cohesive riverbanks. *Geomorphology*, 76 (1-2), 193-206.
- Kersten, T.P, Mechelke, K., Lindstaedt, M. & Sternberg, H., 2008. Geometric Accuracy Investigations of the Latest Terrestrial Laser Scanning Systems. *Proceedings FIG Working Week, Stockholm*, Sweden 16p.
- Knighton, A.D., 1973. Riverbank erosion in relation to streamflow conditions, River Bollin-Dean, Cheshire. *East Midland Geographer*, 5, 416-426.
- Knighton, A.D., 1998. *Fluvial Forms and Processes : A New Perspective*, London, Arnold, 383p.
- Lane, S.N., James, T.D. & Crowell, M.D., 2000. Application of Digital Photogrammetry to Complex Topography for Geomorphological Research. *The Photogrammetric Record*, 16 (95), 793-821.
- Lane, S.N., Westaway, R.M. & Murray Hicks, D., 2003. Estimation of erosion and deposition volumes in a large, gravel-bed, braided river using synoptic remote sensing. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28 (3), 249-271.
- Large, A.R.G. & Heritage, G.L., 2009. Laser Scanning – Evolution of the Discipline, Dans *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Wiley-Blackwell, Chichester, George L. Heritage, Andrew R.G. Large, 1-20.
- Lawler, D.M., 1992. Process Dominance in bank erosion systems. Dans *Lowland floodplain rivers geomorphological perspectives*. John Wiley & Sons Ltd, 117-143.

- Lawler, D.M., 1993a. Needle ice processes and sediment mobilization on river banks: the River Ilston, West Glamorgan, UK. *Journal of Hydrology*, 150 (1), 81-114.
- Lawler, D.M., 1993b. The measurement of river bank erosion and lateral channel change: A review. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18(9), 777-821.
- Lawler, D.M., 1995. The impact of scale on the processes of channel-side sediment supply: conceptual model. Dans *Effects of scale on the interpretation and management of sediment and water quality*. Osterkamp, W.R., 175-184.
- Lawler, D.M., Thorne, C.R., Hooke, J.M., 1997. Bank erosion and instability. Dans *Applied fluvial geomorphology for river engineering and management*. C.R. Thorne, R.D. Hey and M.D. Newson, 137-172.
- Lawler, D.M., Grove, J.R., Couperthwaite, J.S., Leeks, G.J.L., 1999. Downstream change in river bank erosion rates in the Swale-Ouse system, northern England. *Hydrological Processes*, 13 (7), 977-992.
- Leica Geosystems, 2011.[En ligne]: <http://www.leica-geosystems.com>. Dernier accès le 22 janvier 2011.
- Leopold, L., 1973. River channel change with time: an example. *Geological Society of America Bulletin*, 84, 1845-1860.
- Luppi, L., Rinaldi, M., Teruggi, L.B., Darby, S.E., Nardi, L., 2009. Monitoring and numerical modelling of riverbank erosion processes: a case study along the Cecina River (central Italy). *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(4), 530-546.
- Macklin, M.G. et Lewin, J., 2008. Alluvial responses to the changing Earth system. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(9), 1374-1395.
- Martineau, G., 1977. *Géologie des dépôts meubles de la région de KAMOURASKA-RIVIÈRE-DU-LOUP*. Ministère des Richesses naturelles, Service de l'exploration géologique, Division du Quaternaire.
- Matsuoka N., 2001. Solifluction rates, processes and landforms: a global review. *Earth-Science Reviews*, 55, 107-133.
- Millar, R.G., Quick, M.C., 1998. Stable width and depth of gravel-bed rivers with cohesive banks. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 124 (10), 1005-1013.
- Moureau, M. & Brace, G., 2000. *Dictionnaire des Sciences de la Terre*, Editions TECHNIP.
- Nasermoaddeli, M. & Pasche, E., 2008. Application of terrestrial 3D laser scanner in quantification of the riverbank erosion and deposition. Dans *Proceedings of Riverflow 2008*. Turquie, 2407-2416.
- Oppikofer, T., Jaboyedoff, M., Baillifard, F., Pedrazzini, A., Travelletti, J., 2006. Interpretation of laser scanner 3D data used to determine circular failure surface of shallow landslides. *2nd European Optech Seminar, Milan*.

- Osman, A.M. et Thorne, C.R., 1988. Riverbank stability analysis: I: Theory. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114 (2), 134-150.
- Otto, H.-J., (1998). *Écologie forestière*. Unithèque-Nature. 397p.
- OURANOS, 2010. *Savoir s'adapter aux changements climatiques*. Rédaction: C DesJarlais, M. Allard, D. Bélanger, A. Blondlot, A. Bouffard, A. Bourque, D. Chaumont, P. Gosselin, D. Houle, C. Larrivée, N. Lease, A.T. Pham, R. Roy, J.-P. Savard, R. Turcotte et C. Villeneuve, Montréal, 128 p.
- Paul, M., 2005. *Projet de stabilisation des berges et de dragage du lit de la rivière Ouelle sur le territoire de la Municipalité de Saint-Pacôme par la Municipalité de Saint-Pacôme*. Dossier 3216-02-006.
- Piégay, H., Cuaz, M., Javelle, E., Mandier, P., 1997. Bank erosion management based on geomorphological, ecological and economic criteria on the Galaure River, France. *Regulated Rivers: Research & Management*, 13 (5), 433-448.
- Pissart, A., 1987. *Géomorphologie périglaciaire textes des leçons de la chaire Francqui Belge* Université de Liège, Laboratoire de Géomorphologie et de Géologie du Quaternaire.
- Prosser, I.P., Hughes, A.O. et Rutherford, I.D., 2000. Bank erosion of an incised upland channel by subaerial processes: Tasmania, Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(10), 1085-1101.
- Resop, J.P. & Hession, W.C., 2010. Terrestrial Laser Scanning for Monitoring Streambank Retreat: Comparison with Traditional Surveying Techniques. *Journal of Hydraulic Engineering*, 136 (10),794-798.
- Rinaldi, M. et Darby, S.E., 2007. Modelling river-bank-erosion processes and mass failure mechanisms: progress towards fully coupled simulations. Dans *Gravel-Bed Rivers VI: From Process Understanding to River Restoration*. Elsevier, 213-239.
- Rinaldi, M. et Casagli, N., 1999. Stability of streambanks formed in partially saturated soils and effects of negative pore water pressures: the Sieve River (Italy). *Geomorphology*, 26 (4), 253-277.
- Robert, A., 2003. *River Processes: An Introduction to Fluvial Dynamics*, London : Arnold, 214p.
- Robitaille, A. & Allard, M., 2007. *Guide Pratique D'identification Des Dépôts De Surface Au Québec Notions Élémentaires De Géomorphologie 2^e éd.*, Québec : Ressources naturelles et Faune Québec.
- Salo, J., Kalliola, R., Häkkinen, I., Mäkinen, Y., Niemelä, P., Puhakka, M., Coley, P. D., 1986. River dynamics and the diversity of Amazon lowland forest. *Nature*, 322 (6076), 254-258.
- Schürch, P. *et al.*, 2011. Detection of surface change in complex topography using terrestrial laser scanning: application to the Illgraben debris-flow channel. *Earth Surface Processes and Landforms*. Accepted manuscript online: 11 JUL 2011 11:56AM EST | DOI : 10.1002/esp.2206

- Shields, I., 1936. Application of similarity principles and turbulence research to bed-load movement. Dans *Hydrodynamics Laboratory Publication*. Pasadena: Ott, W.P., van Uchelen, J.C. 47p.
- Simon, A. et Hupp, C.R., 1987. Geomorphic and vegetative recovery processes along modified Tennessee streams: an interdisciplinary approach to disturb fluvial system. *International Association of Hydrological Sciences Special Publication*, 167, 251-262.
- Simon, A., 1989. A model of channel response in disturbed alluvial channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, 14, 11-26.
- Simon, A. Curini, A., Darby, S.E., Langendoen, E.J., 1999. Streambank mechanics and the role of bank and near bank processes in incised channels. Dans *Incised Channels: Processes, Forms, Engineering, and Management*. Chichester: Darby SE, Simon A, 123–152.
- Simon, A. Curini, A., Darby, S.E., Langendoen, E.J., 2000. Bank and near-bank processes in an incised channel. *Geomorphology*, 35 (3-4), 193-217.
- Simon, A. et Collison, A.J.C., 2002. Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27(5), 527-546.
- SoftMap Publishing, 2009. CD-ROM topographic Maps Canada.
- Thorne, C.R., 1982. Processes and mechanisms of river bank erosion. Dans *Gravel-Bed Rivers*. R.D. Hey, J.C. Bathurst and C.R. Thorne, 227-271.
- Thorne, C.R., 1988. *Analysis of bank stability in the DEC Watersheds, Mississippi*, Final Technical Report to the US Army European Research Office London, England, Queen Mary College, University of London. 38 p.
- Thorne, C.R., 1990. Effects of vegetation on riverbank erosion and stability. Dans *Vegetaion and Erosion*. J.B. Thornes, 125-143.
- Thorne, C.R. et Lewin, J., 1979. Bank processes, bed material movement and planform development in a meandering river. Dans *Adjustments to the fluvial system*. Dubuque, Iowa : Rhodes, D.D. and Williams, G.P., 117-137.
- Thorne, C.R. et Tovey, N.K., 1981. Stability of composite river banks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 6(5), 469-484.
- Thorne, C.R. et Osman, A.M., 1988. Riverbank Stability Analysis. II: Applications. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114 (2), 151-172.
- Twidale, C., 1964. Erosion of an alluvial bank at Birdwood, South Australia. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 8, 189-211.
- Wolman, G., 1954. A method of sampling coarse river-bed material. *American Geophysical Union*, 35, 951-956.
- Wolman, G., 1959. Factors influencing erosion of a cohesive river bank. *American Journal of Science*, 257, 204-216.

- Wood, A.L., Simon, A., Downs, P.W., Thorne, C.R., 2001. Bank-toe processes in incised channels: the role of apparent cohesion in the entrainment of failed bank materials. *Hydrological Processes*, 15 (1), 39-61.
- Wynn, T. & Mostaghimi, S., 2006. The effects of vegetation and soil type on streambank erosion, Southwestern Virginia, USA. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 42(1), 69-82.
- Yang CS, Kao SP, Lee FB, Hung PS. 2004. *Twelve different interpolation methods: a case study of Surfer 8.0*. Isprs Xx. Symposium, Com. II, Istanbul, 2004.
- Yilmaz, H.M., 2007. The effect of interpolation methods in surface definition: an experimental study. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(9), 1346-1361.

