

Université du Québec
Institut national de la recherche scientifique
Centre Eau, Terre et Environnement

**DÉVELOPPEMENT D'UN CADRE D'ANALYSE POUR
L'ÉVALUATION DE LA SENSIBILITÉ DES BERGES À L'ÉROSION
EN MILIEU FLUVIAL: APPLICATION À LA RIVIÈRE
MONTMORENCY, QUÉBEC**

Par

Pierre-Luc Fortin

Géographe, spécialisé en géographie physique et environnement naturel

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

Jury d'évaluation

Examinatrice externe	Diane Saint-Laurent Université du Québec à Trois-Rivières
Examineur interne	Karem Chokmani INRS – Eau, Terre et Environnement
Directeur de recherche	Michel Leclerc INRS – Eau, Terre et Environnement
Co-directeur de recherche	Didier Perret Commission géologique du Canada

Décembre 2010

© Droits réservés de Pierre-Luc Fortin

REMERCIEMENTS

J'aimerais d'abord remercier mon directeur de recherche Michel Leclerc, dont la rigueur scientifique fut une grande source de dépassement professionnel et personnel. J'aimerais aussi le remercier pour son appui financier indispensable de même que pour la confiance qu'il m'a témoignée tout au long de ce projet. Mes seconds remerciements vont à mon co-directeur de recherche, Didier Perret, de la Commission géologique du Canada, pour ses judicieux conseils, son écoute, sa disponibilité et l'accès qu'il m'a procuré au Laboratoire de cartographie numérique et de photogrammétrie (LCNP). Par la même occasion, je tiens à remercier le directeur de ce laboratoire, Serge Paradis, pour sa flexibilité et Marco Boutin, pour les nombreux conseils qu'il m'a prodigués au niveau de la photogrammétrie numérique.

Je remercie aussi le réseau GÉOIDE et le Fond québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT) pour leur appui financier important.

Ensuite, j'aimerais remercier l'équipe de recherche de Monique Bernier (INRS-ETE), dont notamment Monique Bernier elle-même, Yves Gauthier, Jimmy Poulin et Charles Gignac, qui furent d'une grande aide lors du développement d'outils dans ArcInfo 9.2®. Dans la même lignée, un grand merci aussi à Erwan Gloaguen, pour son aide précieuse sur le plan géostatistique et pour sa disponibilité. Du fait même, merci à Karem Chokmani pour ses conseils au niveau des approches statistiques et à Bernard Long pour m'avoir fait bénéficier de ses vastes connaissances des outils LiDAR. En outre, je remercie mon collègue de bureau, Pascal Matte, pour ses conseils sur le plan mathématique et son sens de l'humour aiguisé, source de plusieurs éclats de rire.

J'aimerais aussi remercier les diverses personnes qui m'ont aidé pour l'obtention de différents jeux de données, notamment André Bouillon de la Communauté métropolitaine de Québec, Pierre Beaubien de la Ville de Québec, Stéfano Biondo de l'Université Laval, Frédéric Messier et Richard Leclair de Pagé Leclair Géolocation, Jean Landry directeur du Conseil de Bassin de la rivière Montmorency et William Larouche du Centre d'expertise hydrique du Québec.

Enfin, la réalisation de ce projet n'aurait pas été possible sans l'appui des personnes qui me sont chères. En ce sens, merci à ma famille Monique, Pierre, Isabelle, René-Olivier pour leur support inconditionnel et les quelques petites tapes dans le dos d'encouragement. Merci à ma copine Amélie Janin, qui, par sa joie de vivre, m'a permis de me reconnecter quotidiennement au réel, mais aussi de m'évader dans des activités à la fois stimulantes et curatives, notamment durant les périodes arides. Finalement, merci à Philippe Naud, Étienne Dubé et Philippe Marchand, pour les bières/steaks autour d'un feu, qui furent une grande source de décompression, et pour leur amitié précieuse.

RÉSUMÉ

Au Québec, le phénomène de l'érosion des berges en rivière n'a été que très rarement pris en compte dans la gestion et l'aménagement du territoire. Or, dans les décennies à venir, les cours d'eau seront vraisemblablement sujets à des modifications majeures, en réponse aux changements climatiques. En effet, une augmentation de la fréquence, de la durée et de l'intensité des événements climatiques extrêmes serait susceptible de générer plus fréquemment des crues de forte magnitude, lesquelles constituent un facteur déclencheur important des phénomènes d'érosion des berges.

Dans cette optique, l'objet de la présente recherche consiste à proposer un cadre d'analyse permettant d'évaluer la sensibilité des berges à l'érosion en milieu fluvial. Ce cadre d'analyse est réalisé dans une optique de modélisation du phénomène de l'érosion des berges et s'implante sur un site pilote correspondant à un tronçon semi-urbain de la rivière Montmorency, dans la région de Québec.

La démarche proposée comprend deux principaux volets, la pré-production et la modélisation. Le premier, constituant le cœur de cette recherche, porte sur : 1) la cartographie diachronique des traits de berges dans le but d'obtenir des données d'érosion; 2) l'élaboration d'un modèle numérique de terrain (MNT) optimal à partir de données topographiques LiDAR; 3) la production de variables représentatives du phénomène de l'érosion à partir d'outils disponibles au sein de systèmes d'information géographique (SIG). Le second volet, la modélisation, vise à établir un indice de sensibilité des berges à l'érosion, via une approche critériologique semi-quantitative. Celle-ci comporte, une critériologie à deux paliers, soit des indices de base décrivant la sensibilité propre à chaque variable descriptive (pente de la berge, pente du lit, rayon de courbure, géologie de la berge et présence d'immunités *i.e.* ouvrages de protection) et un indice global, en l'occurrence une moyenne géométrique pondérée, permettant d'agréger les indices de base entre eux en leur octroyant un poids respectif. Le rendement du modèle est par la suite vérifié *via* une étape de validation. Les diverses étapes caractérisant cette approche nécessitent respectivement l'utilisation de différents jeux de

données d'érosion (présence/absence d'érosion, taux de recul et hauteur verticale d'érosion), lesquels permettent d'assurer l'objectivité de la méthode.

Ultimement, l'application de l'approche développée permet de quantifier la sensibilité des berges à l'érosion du tronçon pilote. Ces résultats sont exprimés en six classes de sensibilité (nulle, très faible, faible, moyenne, élevée et très élevée) et représentés sous la forme de cartes à grande échelle (1:3000). L'analyse de ces résultats permet d'établir que 65% des berges du site d'étude affichent une sensibilité à l'érosion variant de nulle à faible et que la portion restante, soit 35%, affiche une sensibilité plus marquée variant de modérée à très forte.

Au sommaire, les diverses méthodes développées, tant au niveau de la production de données de base que de la modélisation proprement dite, contribuent à former un cadre d'analyse permettant d'évaluer avec précision et efficacité la sensibilité des berges à l'érosion en milieu fluvial. Ce cadre d'analyse pourrait, de ce fait, constituer un outil utile au niveau de la planification et de la gestion préventive des berges, particulièrement dans une perspective d'accroissement de l'intensité des phénomènes d'érosion, en lien avec les changements climatiques.

TABLE DES MATIÈRES

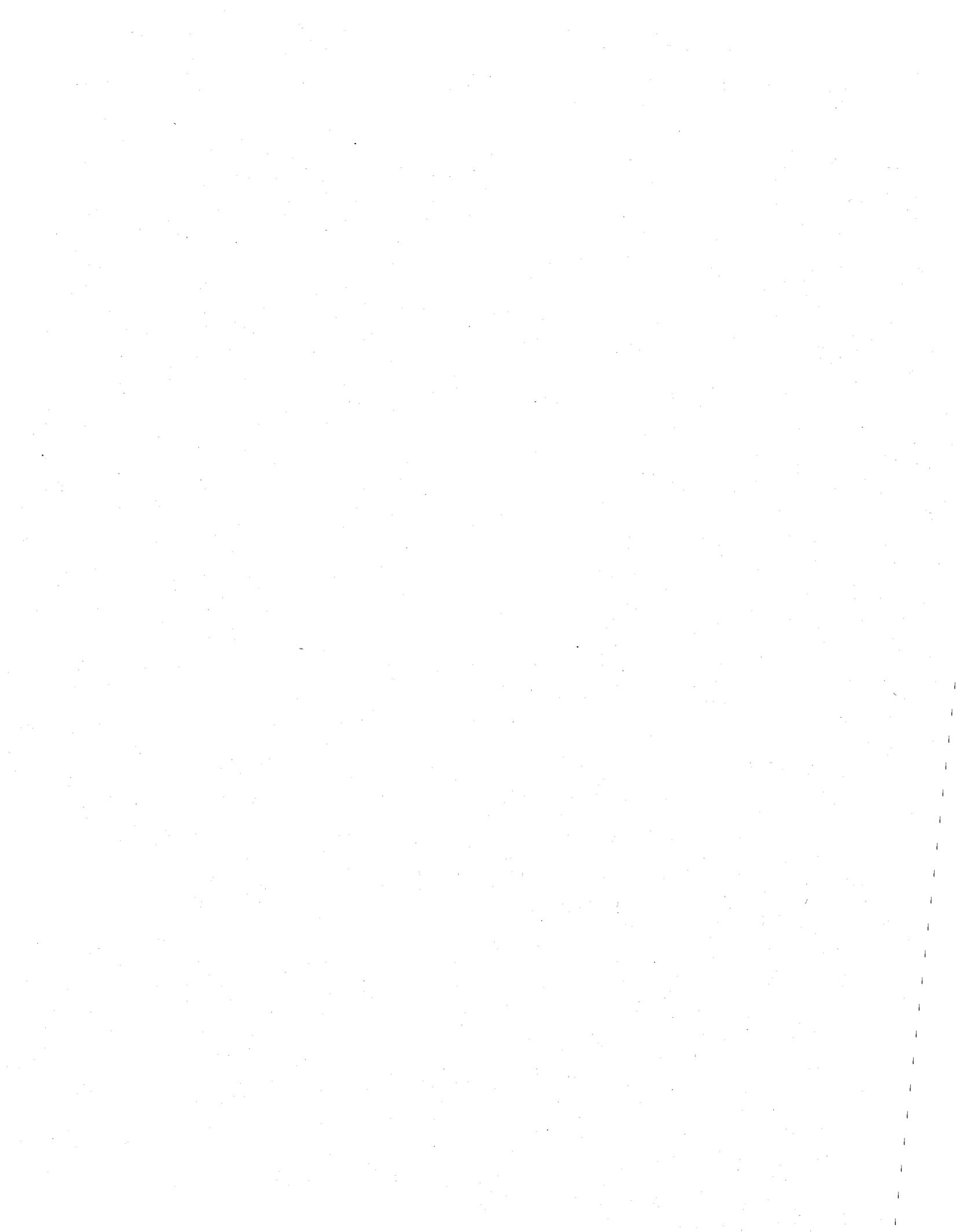
REMERCIEMENTS.....	I
RÉSUMÉ.....	III
TABLE DES MATIÈRES	V
LISTE DES FIGURES	X
LISTE DES TALEAUX.....	XIII
1. INTRODUCTION.....	1
1.1. Problématique	1
1.2. Objectifs	2
1.3. Description du site d'étude.....	2
1.3.1. Physiographie du bassin versant	2
1.3.2. Localisation du site	2
1.3.3. Géomorphologie du cours d'eau	3
1.3.4. Hydrologie et hydrographie	6
1.3.5. Cadre anthropique (vulnérabilité).....	7
2. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE.....	9
2.1. Description de l'aléa « érosion des berges ».....	9
2.1.1. Définition de l'aléa « érosion des berges ».....	9
2.1.2. La notion de l'équilibre naturel du chenal	10
2.1.2.1. L'équilibre dynamique du chenal.....	10
2.1.2.2. La géométrie hydraulique du chenal.....	11
2.1.3. Processus fluviaux.....	12
2.1.3.1. Transport sédimentaire.....	12
2.1.3.2. Composante hélicoïdale de l'écoulement.....	13
2.1.3.3. Abrasion glacielle.....	14
2.1.3.4. Historique de l'écoulement	14
2.1.4. Caractéristiques des événements hydrologiques érosifs	15
2.1.4.1. Puissance et durée des crues	15
2.1.4.2. Rôle de la débâcle printanière	16
2.1.4.3. Origine des crues à l'eau libre.....	16
2.1.4.4. Récurrence des événements érosifs.....	16
2.2. Suivi de l'érosion des berges.....	16
2.2.1. Types de lignes de berge	17
2.2.1.1. Limite eau-terre	17
2.2.1.2. Limite de la végétation.....	17
2.2.1.3. Haut de berge	18
2.2.2. Techniques de suivi de l'érosion des berges	18
2.2.3. Sources d'erreurs.....	19
2.3. Les Modèles Numériques de Terrain (MNT)	20
2.3.1. Données topographiques LiDAR.....	21
2.3.1.1. Principe du LiDAR aéroporté	21
2.3.1.2. Prétraitement du LiDAR	22

2.3.1.3.	Le LiDAR topographique et l'eau.....	23
2.3.1.3.1.	Pénétration/réflexion dans la colonne d'eau	23
2.3.1.3.2.	Discontinuités spatiales (vides) dans les relevés.....	24
2.3.2.	Méthodes d'interpolation appropriées pour les données LiDAR.....	25
2.3.2.1.	L'inverse de la distance (IDW).....	25
2.3.2.2.	Le krigeage.....	25
2.3.2.3.	Autres interpolateurs	26
2.4.	Modélisation de l'érosion des berges : types de modèles	27
2.4.1.	Les modèles numériques/hydrodynamiques	27
2.4.2.	Les modèles hydro-géomorphologiques	28
2.5.	Sommaire	32
3.	MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE ET DONNÉES	37
3.1.	Démarche suivie	37
3.1.1.	Pré-production.....	38
3.1.2.	Modélisation.....	38
3.1.3.	Résultats : représentation et analyse	39
3.2.	Données et outils informatiques.....	39
3.2.1.	Données.....	39
3.2.1.1.	Données hydrologiques et bathymétriques	39
3.2.1.2.	Données topographiques et photographiques.....	40
3.2.1.3.	Données cartographiques décrivant le milieu terrestre	40
3.2.1.4.	Données acquises sur le terrain	40
3.2.2.	Outils informatiques.....	41
4.	PRÉ-PRODUCTION	43
4.1.	Méthodologie pour le suivi de l'érosion des berges.....	43
4.1.1.	Expérimentation de méthodes d'extraction de traits de berge	43
4.1.1.1.	Types de traits de berge testés et sites d'expérimentation	44
4.1.1.2.	Sélection des couvertures d'images	46
4.1.1.2.1.	Inventaire des images disponibles.....	46
4.1.1.2.2.	Critères de sélection des images	46
4.1.1.2.3.	Évaluation des débits associés aux images	47
4.1.1.2.4.	Formation des couples temporels.....	50
4.1.1.3.	Établissement de la plateforme de cartographie et quantification de la précision planimétrique du géopositionnement.	50
4.1.1.3.1.	Étapes d'élaboration de la plateforme de photogrammétrie numérique 50	
4.1.1.3.2.	Quantification de la précision planimétrique	52
4.1.1.4.	Résultats de l'expérimentation des méthodes d'extraction des traits de berge 53	
4.1.1.4.1.	Limite eau/terre	53
4.1.1.4.2.	Limite de la végétation permanente	54
4.1.1.4.3.	Limite du haut de berge.....	55
4.1.1.4.4.	Limite du pied de berge.....	56

4.1.2.	Élaboration d'une méthode composite pour la délimitation de la ligne de berge....	57
4.1.2.1.	Identification et hiérarchisation des critères	58
4.1.2.2.	Application de la méthode	60
4.1.2.2.1.	Tronçon 1 (bornes 0 à 7).....	61
4.1.2.2.2.	Tronçon 2 (bornes 7 à 8).....	62
4.1.2.2.3.	Tronçon 3 (bornes 8 à 9,5).....	62
4.1.2.3.	Estimation de la précision des traits de berge numérisés.....	63
4.1.2.4.	Sommaire	64
4.1.3.	Quantification du déplacement des lignes de berge.....	66
4.1.3.1.	Simplification des lignes de berge	67
4.1.3.2.	Technique de calcul des taux de recul.....	67
4.1.3.2.1.	Calcul des déplacements	67
4.1.3.2.2.	Distinction du sens de déplacement (recul ou avancée).....	67
4.1.3.2.3.	Transfert de l'information aux unités spatiales.....	68
4.1.3.2.4.	Prise en compte des marges d'erreur	68
4.1.3.2.5.	Calcul des taux de recul moyens.....	69
4.1.4.	Résultats du déplacement des berges	69
4.2.	Méthodologie pour la création d'un MNT optimal.....	76
4.2.1.	Caractérisation des données topographiques sources	76
4.2.2.	Analyse de la répartition spatiale des points LiDAR à la surface de l'eau.....	77
4.2.3.	Estimation de la précision verticale des points LiDAR réfléchis par la surface de l'eau à l'aide de données bathymétriques.....	79
4.2.3.1.	Analyse de la concordance des débits.....	80
4.2.3.2.	Quantification des phénomènes de pénétration/réflexion.....	81
4.2.3.2.1.	Technique.....	81
4.2.3.2.2.	Résultats	83
4.2.3.3.	Rôle de la profondeur dans l'occurrence des phénomènes de pénétration/réflexion	83
4.2.3.3.1.	Technique.....	83
4.2.3.3.2.	Résultats	84
4.2.3.4.	Rôle de la rugosité de la surface dans la magnitude des phénomènes de pénétration/réflexion	84
4.2.3.4.1.	Technique.....	84
4.2.3.4.2.	Résultats	85
4.2.3.5.	Sommaire	86
4.2.4.	Expérimentation de méthodes d'interpolation pour les données LiDAR	87
4.2.4.1.	Méthodes d'interpolations testées	88
4.2.4.2.	Procédure de création et de validation des MNT	88
4.2.4.2.1.	Outils et paramètres techniques pour la création des MNT	88
4.2.4.2.2.	Circonscription des points LiDAR situés dans le chenal.....	89
4.2.4.2.3.	Procédures de validation	90
4.2.4.3.	Tests d'interpolation sur tout le domaine.....	91
4.2.4.3.1.	Résultats statistiques	91
4.2.4.3.2.	Résultats graphiques.....	92
4.2.4.3.3.	Sommaire : choix de l'interpolateur optimal	93
4.2.4.4.	Tests d'interpolation sur le sous-domaine du chenal	96

4.2.4.4.1.	Résultat statistiques.....	97
4.2.4.4.2.	Résultats graphiques.....	97
4.2.4.4.3.	Sommaire : choix de l'interpolation optimal	99
4.2.5.	MNT final.....	100
4.2.5.1.	Procédure d'assemblage et de validation	100
4.2.5.2.	Résultats statistiques	100
4.2.5.3.	Résultats graphiques.....	101
4.2.5.4.	Sommaire : rendu final.....	103
4.3.	Méthodologie pour la production des variables	104
4.3.1.	Détermination des variables à produire.....	104
4.3.2.	Établissement des unités spatiales (discrétisation).....	106
4.3.3.	Production des variables	107
4.3.3.1.	Pente de la berge	108
4.3.3.1.1.	Production de la donnée de pente.....	108
4.3.3.1.2.	Transfert de l'information aux unités spatiales.....	108
4.3.3.2.	Pente du lit.....	108
4.3.3.2.1.	Production de la ligne centrale de chenal et extraction du NESE.....	109
4.3.3.2.2.	Calcul de l'inclinaison du plan d'eau.....	110
4.3.3.2.3.	Transfert de l'information aux unités spatiales.....	111
4.3.3.3.	Rayon de courbure de la berge.....	112
4.3.3.3.1.	Segmentation de la ligne de berge et calcul du rayon de courbure.....	113
4.3.3.3.2.	Établissement du degré de généralisation de la ligne de berge.....	114
4.3.3.3.3.	Décalage des segments vers l'aval pour tenir compte du sens de l'écoulement.....	114
4.3.3.3.4.	Transfert de l'information aux unités spatiales.....	115
4.3.3.4.	Géologie de la berge.....	116
4.3.3.4.1.	Données de géologie disponibles	116
4.3.3.4.2.	Observations de terrain	117
4.3.3.4.3.	Établissement des unités géologiques	119
4.3.3.4.4.	Transfert de l'information aux unités spatiales.....	121
4.3.3.5.	Présence d'immunisations en berge.....	121
4.3.3.5.1.	Relevé des zones immunisées	121
4.3.3.5.2.	Transfert de l'information aux unités spatiales.....	122
5.	MODÉLISATION DE LA SENSIBILITÉ DES BERGES À L'ÉROSION	123
5.1.	Méthode proposée	123
5.2.	Critériologie	123
5.2.1.	Établissement des indices de base.....	124
5.2.1.1.	Pente de la berge	125
5.2.1.2.	Pente du lit.....	126
5.2.1.3.	Rayon de courbure de la berge.....	126
5.2.1.4.	Géologie de la berge.....	127
5.2.1.5.	Présence d'immunisation en berge.....	128
5.2.2.	Établissement de l'indice global	133
5.2.2.1.	Attribution de poids.....	133
5.2.2.2.	Agrégation finale des variables.....	133

5.3. Validation	134
5.3.1. Approche.....	134
5.3.2. Données de validation.....	134
5.3.3. Résultats de validation.....	135
6. RÉSULTATS OBTENUS SUR LA RIVIÈRE MONTMORENCY	139
6.1. Résultats statistiques	139
6.2. Résultats cartographiques	140
6.2.1. Présentation des cartes.....	140
6.2.2. Analyse et interprétation des résultats cartographiques.....	151
6.2.2.1. Secteur de la rue des Trois-Saults.....	151
6.2.2.2. Secteur des Îlets.....	152
6.2.2.2.1. Berge ouest.....	153
6.2.2.2.2. Berge est.....	154
6.2.2.3. Secteur de l'Île-Enchanteresse.....	155
6.2.2.4. Secteur de la rue Drouin.....	156
6.2.2.5. Secteur de la rue Parent.....	157
6.2.2.6. Autres segments de berge.....	159
7. DISCUSSION	161
7.1. Suivi de l'érosion des berges	161
7.2. Élaboration d'un MNT optimal	163
7.3. Production des variables	164
7.3.1. Pente de la berge.....	164
7.3.2. Pente du lit.....	165
7.3.3. Rayon de courbure de la berge.....	165
7.3.4. Géologie de la berge.....	166
7.3.5. Présence d'immunisation en berge.....	167
7.3.6. Variables complémentaires.....	167
7.3.7. Sommaire.....	167
7.4. Modélisation de la sensibilité des berges à l'érosion	168
7.4.1. Avantages et limites de l'approche développée.....	168
7.4.2. Position du modèle développé par rapport à la littérature.....	169
7.4.3. Potentiel de généralisation de l'approche développée.....	170
7.5. Retour sur les résultats du tronçon à l'étude et implications en matière de sécurité et d'aménagement du territoire	171
8. CONCLUSION	173
9. BIBLIOGRAPHIE	175
ANNEXES	189



LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Site à l'étude, rivière Montmorency à l'amont du rapide des Trois-Saults.....	4
Figure 2 : Morphologie mixte (tressée et anastomosée) (bornes 0 à 3,5), dans le secteur des Îlets.....	5
Figure 3 : Illustration du principe d'équilibre dynamique du chenal de Lane (1955) entre la puissance de l'écoulement (pente du chenal (stream slope) x débit (discharge)) et l'apport sédimentaire (charge sédimentaire (sediment load) x granulométrie (sédiment size)).....	11
Figure 4 : Diagramme d'Hjulström (1935), illustrant les vitesses moyennes nécessaires à l'arrachement (érosion), au transport et à la déposition de particules de granulométrie croissante.....	13
Figure 5 : Composante hélicoïdale de l'écoulement dans une section courbe de rivière	14
Figure 6 : Puissance et durée des événements hydrologiques capables de générer des changements au niveau du chenal.....	15
Figure 7 : Schéma de la démarche suivie dans la présente recherche.....	37
Figure 8 : Représentation simplifiée d'une berge	44
Figure 9 : Localisation des sites d'expérimentation.....	45
Figure 10 : Sites et couvertures servant à l'estimation du débit de la couverture de 1963..	49
Figure 11 : Écart de positionnement du trait de berge (d) à des débits divergents (Q) en fonction de l'inclinaison de la berge (a).....	54
Figure 12 : Berge déboisée (rive ouest), dans le secteur de la rue Côte du Lac (bornes 3,5 à 4,25), en 1963	54
Figure 13 : Schématisation de la difficulté de détection du vrai haut de berge (1) et cartographie subséquente de la discontinuité située en haut de talus (2) comme étant erronément le haut de la berge	56
Figure 14 : Difficultés associées à l'identification du pied de berge	57
Figure 15 : Méthode composite multi-critères pour la cartographie des traits de berge.....	58
Figure 16 : Exemple de limite cartographiée (ligne bleue) pour le suivi d'érosion des berges dans les secteurs incluant des îles.....	60
Figure 17 : Qualité des couvertures d'images de 2002 (a) et de 2007 (b) dans le secteur situé entre les bornes 8 et 8,25.	61
Figure 18 : Influence des critères de cartographie sur la position de la ligne de berge numérisée en 2D : (a) Image du secteur de la rue Parent (km 8 à 8,5), (b) limite unique eau/terre, (c) méthode multi-critères	66
Figure 19 : Déplacement des berges entre 1963 et 2003, secteur des Îlets.....	72
Figure 20 : Déplacement des berges entre 1963 et 2003, secteur rue de Canteloup.....	73

Figure 21 : Déplacement des berges entre 1963 et 2003, secteur rue du Côte du Lac.	73
Figure 22 : Déplacement des berges entre 1963 et 2003, secteur de L'Île-Enchanteresse ..	74
Figure 23 : Déplacement des berges entre 1963 et 2003, secteur de la rue Drouin	74
Figure 24 : Déplacement des berges entre 1963 et 2007, secteur de la rue Parent	75
Figure 25 : Colmatage d'une anabranch, dans le secteur des îlets (borne 1,25) entre 1963 (a) et 2003 (b) et déportation de la position du trait de berge (ligne jaune) formant une avancée.	75
Figure 26 : Discontinuités spatiales (D) dans le relevé LiDAR au niveau du chenal.	78
Figure 27 : Localisation des sites pour l'étude des phénomènes de pénétration/réflexion du signal LiDAR dans la colonne d'eau.	81
Figure 28 : Répartition des points de mesure LiDAR.....	94
Figure 29 : Résultats graphiques en plan des interpolateurs dans les secteurs de la rue Parent (a, b, c et d) et des Îlets (e, f, g et h).....	95
Figure 30 : Profils en coupe produits à partir des MNT eau illustrant le comportement des interpolateurs inverse de la distance (IDW), krigeage linéaire (LK) et krigeage avec spline (SK) en fonction de la densité des données LiDAR.....	98
Figure 31 : Résultats graphiques des interpolateurs dans le secteur des Trois-Saults	99
Figure 32 : Profils en coupe produits à partir du MNT global et du MNT composite illustrant le comportement de l'interpolateur krigeage linéaire en fonction de la densité des données LiDAR	102
Figure 33 : Visualisation des MNT global (a) et MNT composite (b) dans le secteur des Îlets (borne 2) à l'aide l'affichage avec effet d'ombrage.....	102
Figure 34 : Occurrences de petits escarpements locaux (encadré noir) suite à la fusion des MNT eau et global, secteur de la rue des Deux-Rapides (borne 5).....	103
Figure 35 : Structuration des unités spatiales : exemple de l'Île-Enchanteresse (bornes 6 et 6,5): (a) non chevauchement des unités spatiales dans les zones à forte courbure, (b) chevauchement et agrégation des unités spatiales en raison de la forme de la berge.	107
Figure 36 : Transfert de l'information du centre du chenal vers les unités spatiales en berges (borne 1).....	112
Figure 37 : Application décalée vers l'aval des points d'inflexion séparant les segments concaves et convexes.	115
Figure 38 : Berge constituée de dépôts sableux. Berge est secteur des Îlets (borne 1,5)...	117
Figure 39 : Séquence sédimentaire, illustrant des dépôts grossiers dans la portion inférieure de la berge et des dépôts plus fins dans sa portion supérieure, secteur de la rue Parent (borne 8,75).....	118
Figure 40 : Unités géologiques et sections formées de roche en place > 2m, rivière Montmorency, Québec.....	120

Figure 41 : Section constituée de roche en place d'une hauteur supérieure à 2 m, secteur de la rue Parent (borne 8,5).....	120
Figure 42 : Catégories d'immunités relevées sur le tronçon à l'étude	122
Figure 43 : Étapes d'élaboration de l'indice de base de la variable pente de la berge.....	129
Figure 44 : Étapes d'élaboration de l'indice de base de la variable pente du lit.....	130
Figure 45 : Étapes d'élaboration de l'indice de base de la variable rayon de courbure de la berge	131
Figure 46 : Étapes d'élaboration de l'indice de base de la variable géologie des berges ..	132
Figure 47 : Valeurs de sensibilité à l'érosion enregistrées par chaque catégorie de hauteur d'érosion.....	136
Figure 48 : Valeur moyenne de sensibilité à l'érosion pour chaque classe de hauteur d'érosion.....	136
Figure 49 : Distribution de la sensibilité des berges à l'érosion modélisée sur un tronçon de la rivière Montmorency.....	140
Figure 50 : Sensibilité des berges à l'érosion d'un tronçon de la rivière Montmorency. ..	141
Figure 51 : Érosion des berges et perte de terrain par effondrement de berge, secteur de la rue des Trois-Saults, entre les bornes 0,5 et 0,75.	151
Figure 52 : Inclinaison des pentes du talus ouest dans le secteur des Îlets, rivière Montmorency	154
Figure 53 : Effondrement de la berge et basculement de la végétation arborescente dut à l'érosion, secteur des Îlets, berge est (bornes 1,75 et 2).	155
Figure 54 : Proximité d'une habitation par rapport au haut d'un talus ayant connu un glissement de terrain, secteur de la rue Drouin (borne 7,5 à 8).	157
Figure 55 : Morphologie de la berge longeant la rue Parent (borne 8,5 à 8,75)	158

LISTE DES TALEAUX

Tableau 1: Inventaire des variables employés dans les études sélectionnées	30
Tableau 2 : Caractéristiques des couvertures sélectionnées.....	47
Tableau 3 : Débits associés aux différentes couvertures sélectionnées et paramètres d'évaluation de ces débits.	49
Tableau 4 : Couples temporels des photographies aériennes utilisées pour la cartographie du trait de berge.....	50
Tableau 5 : Précision des stéréo-modèles servant à la numérisation des lignes de berge.....	53
Tableau 6 : Couples temporels utilisés en fonction des secteurs et des différences de débit.....	61
Tableau 7 : Sections de berge ayant enregistré des déplacements	71
Tableau 8 : Quantité et densité des points LiDAR selon les périodes d'acquisition (1999, 2000 et les deux combinés).....	77
Tableau 9 : Caractéristiques spatiales des discontinuités spatiales en fonction des relevés LiDAR	78
Tableau 10 : Débits associés aux différents relevés bathymétriques	80
Tableau 11 : Caractéristiques hydrologiques et effectifs de données aux sites d'analyse	82
Tableau 12: Pénétration enregistrée (en m) aux sites analysés	83
Tableau 13: Dispersion des données de surface (en m) aux sites	83
Tableau 14 : Profondeurs moyennes (en m) et valeur de corrélation entre la profondeur et la pénétration du signal LiDAR aux différents sites	84
Tableau 15: Pénétration moyenne du signal LiDAR (en m) en fonction de la rugosité de la surface de l'eau	86
Tableau 16 : Différences relatives de pénétration entre les sites en eaux calmes et en eaux vives par zone	86
Tableau 17: Résultats statistiques issus de la validation croisée effectuée sur les MNT globaux produits à l'aide de différents interpolateurs	91
Tableau 18: Résultats statistiques issus de la validation croisée effectuée sur les MNT eau à l'aide de différents interpolateurs	97
Tableau 19: Comparaison des résultats issus de la validation croisée des MNT global et composite au niveau du chenal.....	101
Tableau 20: Variables les plus fréquemment utilisées dans l'élaboration des indices de sensibilité des berges à l'érosion.....	105
Tableau 21 : Établissement des poids dans l'indice global.....	133

1. INTRODUCTION

1.1. Problématique

Au Québec, le phénomène naturel de l'érosion des berges en rivière n'a bénéficié à ce jour que de peu d'attention en tant que contrainte à l'aménagement du territoire. En effet, les efforts furent plutôt consacrés à l'étude des inondations à l'eau libre (Environnement Canada, 1994), de l'érosion des berges en milieu littoral (Dubois *et al.*, 2005, Leclerc *et al.* 2008), des glissements de terrain (Gouvernement du Québec, 2005) et occasionnellement des phénomènes d'embâcles-débâcles (Leclerc *et al.*, 2001 et 2006; Morse *et al.*, 2002). Or, en lien avec les changements climatiques, les cours d'eau seront sujets à des modifications morphologiques majeures (Ashmore et Church, 2001). Ces modifications seraient notamment associées à une augmentation marquée des crues de forte magnitude, en réponse à l'augmentation de la fréquence, de la durée et de la magnitude d'évènements climatiques extrêmes (Ashmore et Church, 2001; Bourque et Simonet, 2007; Knox, 2003; OURANOS, 2004). Ces évènements hydrologiques seraient alors susceptibles de générer des phénomènes d'érosion importants, lesquels conduiraient à déclencher et à maintenir des conditions instables au niveau des berges des cours d'eau (Ashmore et Church, 2001).

La présente recherche vise donc à fournir un cadre d'analyse permettant d'établir la sensibilité des berges à l'érosion. En ce sens, les travaux réalisés comportent un important volet méthodologique, lequel s'articule en quatre sous-thèmes, soit le suivi de l'érosion des berges, l'élaboration d'un MNT précis, la production de variables descriptives de qualité et l'établissement d'une méthode de modélisation fiable. La démarche proposée est élaborée et appliquée sur un site pilote, un tronçon semi-urbain de la rivière Montmorency, situé dans la région de Québec.

En somme, le cadre d'analyse développé dans cette recherche se veut un outil pouvant être mis à contribution pour la planification et la gestion des territoires situés en périphérie des cours d'eau. Précisons toutefois que, contrairement aux études de risque, qui prennent en compte à la fois le phénomène naturel (l'aléa) et la présence de vulnérabilité, c'est-à-dire des éléments matériels et humains potentiellement endommageables par le phénomène en question (Leclerc *et al.*, 2001 et 2006; Ledoux,

2006), le présent cadre d'analyse met l'accent sur le volet aléa proprement dit (le phénomène d'érosion). La vulnérabilité n'y occupe en ce sens qu'une place secondaire.

1.2. Objectifs

L'objectif général poursuivi dans cette recherche consiste à élaborer un cadre d'analyse permettant d'établir la sensibilité des berges à l'érosion en rivière. Cet objectif comporte les cinq objectifs spécifiques suivants:

- 1) Effectuer le suivi diachronique de l'érosion des berges à l'aide de critères d'identification du trait de berge constants;
- 2) Élaborer un modèle numérique de terrain optimal à partir de données LiDAR;
- 3) Produire des variables descriptives représentant le plus fidèlement possible la réalité terrain, en lien avec le phénomène de l'érosion;
- 4) Proposer une méthode de modélisation de la sensibilité des berges à l'érosion;
- 5) Produire des cartes de sensibilité des berges à l'érosion pour un tronçon semi-urbanisé à l'aval de la rivière Montmorency.

1.3. Description du site d'étude

1.3.1. Physiographie du bassin versant

Le bassin versant de la rivière Montmorency couvre une superficie de 1150 km² et possède une forme allongée s'étendant sur une longueur de 78 km et une largeur moyenne de 20 km. Cet ensemble hydrographique englobe un territoire essentiellement montagneux et forestier avec des sommets pouvant atteindre 1127 m (CBRM, 2007). La rivière Montmorency s'écoule du nord vers le sud et amorce sa course à une altitude de près de 900 m dans la chaîne des Laurentides. Elle prend fin au pied de la célèbre chute Montmorency d'une hauteur de 83 m (Leclerc *et al.*, 2001).

1.3.2. Localisation du site

Le tronçon de rivière à l'étude se situe dans le territoire de la Communauté métropolitaine de Québec, à environ 15 km de son centre-ville, et couvre une section de 9,5 km de longueur à cheval sur l'arrondissement de Beauport et les municipalités de Sainte-Brigitte-de-Laval et de Boischatel. Ce segment est contenu dans le cinquième inférieur du bassin versant. Sa limite sud (borne kilométrique 0) fut établie à 250 m en amont du

rapide des Trois-Saults et sa limite nord (borne 9,5) à 500 m en amont de la rue Parent (Figure 1).

1.3.3. Géomorphologie du cours d'eau

Sur le plan sédimentologique, la portion nord du tronçon de rivière à l'étude est encaissée dans des dépôts grossiers (sable, gravier, galets et blocs) essentiellement d'origine fluvioglaciaire et alluviale, alors que la portion sud est principalement constituée de sables de nature deltaïque (Bolduc *et al.*, 2003) mis en place lors d'épisodes de transgressions marines postglaciaires (Hudon, 1970; Dionne, 1977, 2001).

Au niveau de la morphologie des chenaux, le secteur à l'étude se caractérise par un cours principal se divisant à de multiples endroits en deux ou plusieurs chenaux, appelés anabranches (Thorne, 1997), contournant des îles le plus souvent colonisées par de la végétation ligneuse arbustive ou arborescente (Figure 1). Aussi, à divers endroits, notamment dans les convexités de son tracé et au sein même du chenal, la rivière est jonchée de bancs alluviaux le plus souvent exempts de végétation.

Dans la portion nord du site (bornes 3,5 à 9,5), cette morphologie correspond essentiellement à un tracé de type tressé (chenaux en tresses), plus précisément à la catégorie "*braided with islands*" (Schumm, 1981). Cette morphologie en tresses s'observe aussi au niveau du tronçon inférieur (bornes 0 à 3,5) sans toutefois y être le type dominant. En effet, dans ce secteur, la présence d'une plaine alluviale significativement plus large ainsi qu'un nombre important d'anabranches très sinueuses et indépendantes révèlent une morphologie davantage de type anastomosé (Figure 2) (Bridge, 2003; Miall, 1977; Smith et Smith, 1980; Thorne, 1997). Ainsi, en ce lieu, comme c'est souvent le cas dans les environnements fluviaux à chenaux multiples, différents types de patron d'écoulement prennent place (Bridge, 2003; 1993; Thorne, 1997), soit une portion en tresses au niveau du chenal principal et une zone anastomosée à l'est de celui-ci (Figure 2). Par souci de simplicité, et par le fait que le caractère anastomosé du tracé d'un cours d'eau reflète généralement un environnement de moindre énergie (Miall, 1977; Nanson et Croke, 1992; Smith et Smith, 1980), la portion située en aval de la borne 3,5 fut classifiée comme étant de type anastomosé.

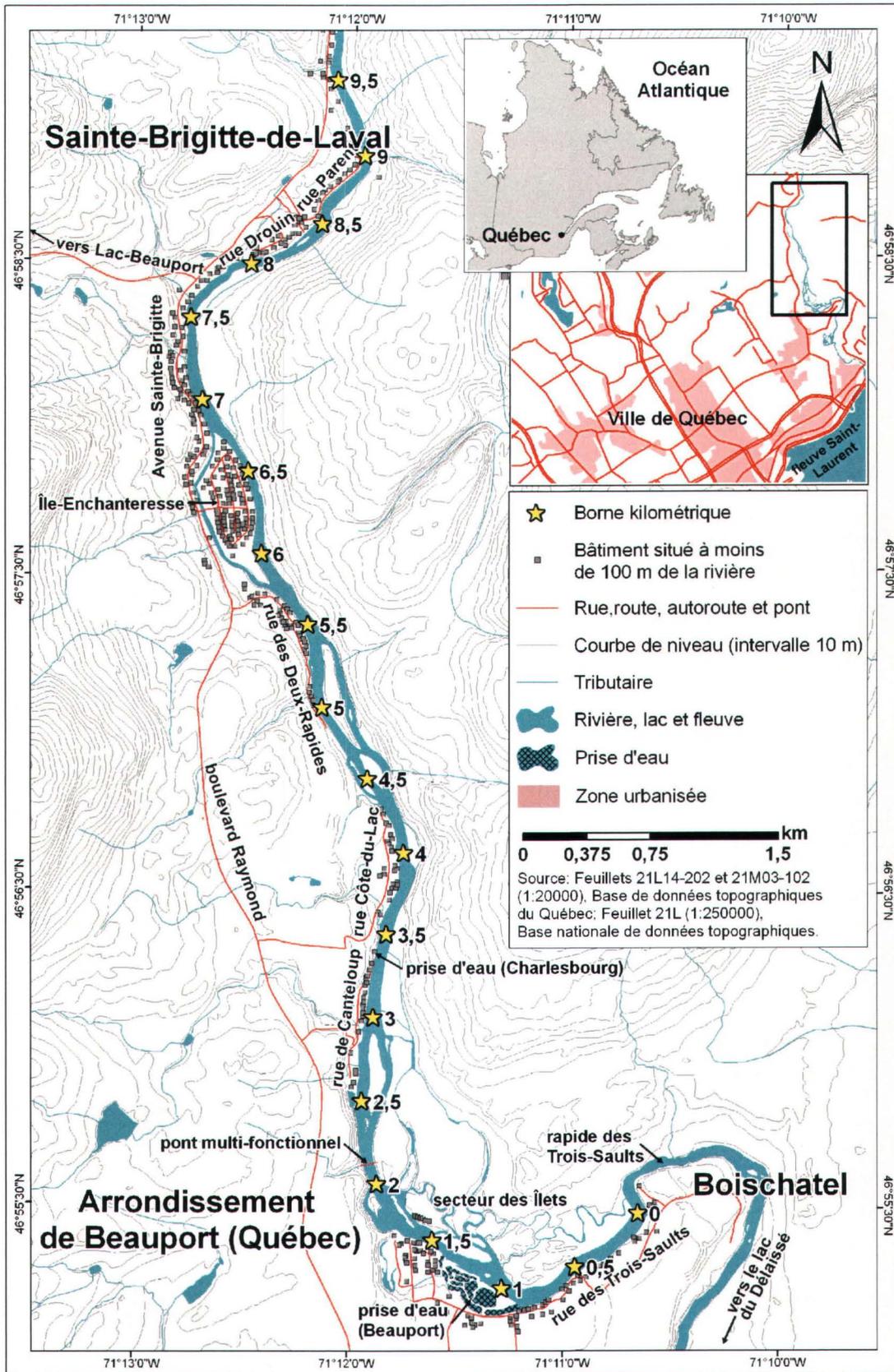


Figure 1: Site à l'étude, rivière Montmorency à l'amont du rapide des Trois-Sauts.

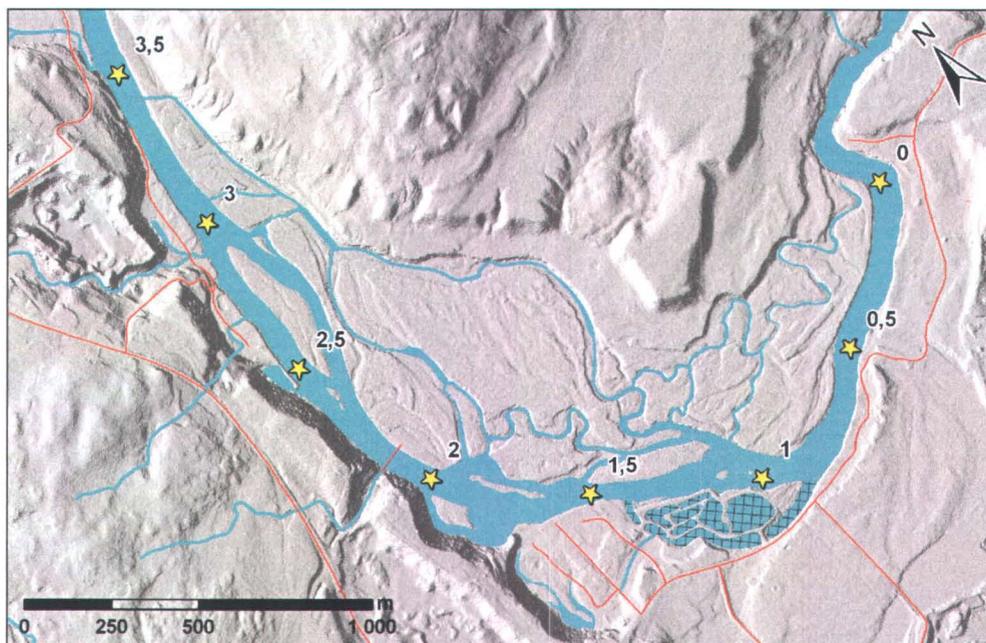


Figure 2 : Morphologie mixte (tressée et anastomosée) (bornes 0 à 3,5), dans le secteur des Îlets. Source : Feuillet 21L14-202 (1 : 20000) (Base de données topographiques du Québec) et modèle numérique de terrain produit à partir de données LiDAR.

Ces deux types de chenaux sont le plus souvent instables et peuvent être sujets à des migrations latérales locales rapides (Leclerc *et al.*, 1998; Schumm 1977; Thorne 1997; Wohl, 2000). Cette instabilité se serait notamment manifestée par des reculs de plus de 70 m (+/- 4m) (Leclerc *et al.*, 1998) dans le secteur des Îlets (Figure 2) et de près de 5 m dans le secteur de la rue Parent entre 1970 et 2008 (Communication personnelle: Albert Boutet, 2008) (borne 8,5, Figure 1).

Dans la portion à l'étude, la rivière s'écoule sur une succession de seuils et mouilles comportant un dénivelé total de 38 m, 190 m et 152 m. Son gradient de pente moyen est de 0,004 (mètre vertical / 1 m horizontal) et varie entre des valeurs minimale et maximale respectivement de 0,0003 à 0,009. La partie amont plus pentue, comporte quelques seuils constitués de roche cristalline (mangérite quartzifère à feldspaths et gneiss rose rubané) propre à la province géologique du Grenville (Castonguay *et al.*, 2002). Ces sections rocheuses, formant aussi par endroits les berges, orientent le tracé du cours d'eau par leur stabilité. La sinuosité légèrement supérieure de la section amont (borne 7 et plus), serait notamment associée à la présence de ces berges résistantes (Figure 1). Par contre, en aval de la borne 2,5, la bifurcation importante du cours d'eau sur sa gauche serait associée à un tout autre phénomène (Figure 1). En effet, selon des études menées entre 1936 et 1970, le

coude que forme la rivière à cet endroit serait associé à une surabondance de dépôts deltaïques mis en place lors d'une ou de plusieurs transgressions marines postglaciaires (Gélinas, 1969; Faessler, 1940; Faessler et Laverdière, 1936; Hudon, 1970; Sabourin, 1962). La rivière, alors incapable de retrouver son cours pré-glaciaire, aurait ouvert un nouveau chenal vers le nord-est. Selon ces mêmes études, la paléo-vallée de la Montmorency serait toujours comblée de dépôts multi-glaciaires et formerait une ligne relativement sinueuse entre le secteur des Îlets (borne 2, figure 1) et l'embouchure de l'actuelle rivière Beauport. De récentes données de forage mettant en lumière des épaisseurs considérables de dépôts dans ce secteur suggèrent la présence d'un canyon enfoui et corroborent ces allégations (Lamarche, en préparation).

1.3.4. Hydrologie et hydrographie

Au niveau des précipitations annuelles, la partie inférieure du bassin versant enregistre en moyenne 1230 mm, dont 26% sous forme de neige (3,20 m) (Environnement Canada, 2010a), alors que dans la partie supérieure du bassin, ces précipitations sont plus abondantes avec 1588 mm annuellement, dont 40% sous forme neigeuse (6,35 m) (Environnement Canada, 2010b).

Au registre de l'écoulement superficiel, la rivière affiche un débit moyen annuel de 36 m³/s⁽¹⁾ et un débit maximum annuel moyen de l'ordre de 341 m³/s⁽²⁾. La valeur du débit plein bord (récurrence d'environ 2 ans) quant à elle correspondrait à une crue de 439 m³/s, alors que les récurrences relatives aux zones inondables de récurrences 20 ans et 100 ans furent établies respectivement à 735 m³/s et 926 m³/s (Heniche *et al.*, 1999). Ces valeurs peuvent toutefois être largement dépassées comme en témoigne la crue exceptionnelle de 1110 m³/s survenue le 3 novembre 1966 (Ministère des Richesses Naturelles du Québec, 1967).

À l'exception de ce dernier événement de crue, le débit maximal annuel correspondrait dans 80% des cas à la période de fonte des neiges, soit aux mois d'avril et mai². Ce phénomène serait en grande partie associé au stockage d'importants volumes d'eau sous

¹ Donnée issue de la compilation des données de débits moyens journaliers du Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ) entre 1965 à 2009, station 051001, secteur des marches naturelles, Beauport.

² Donnée issue de la compilation des données de débits maximums journaliers du CEHQ entre 1965 à 2009, station 051001.

forme de neige et de leur libération lors de la fonte. Lorsque ces événements de fonte surviennent tôt au printemps ou même en période hivernale, au moment où la rivière est encore englacée, ceux-ci sont susceptibles de provoquer la formation d'embâcles, une problématique récurrente sur la Montmorency (Bouillon, 2001; Lallier, 1998; Leclerc *et al.*, 2001; Morse *et al.*, 2002; Robitaille 1983). Ces phénomènes peuvent alors générer des inondations importantes de même que des dommages directs aux bâtiments par la glace (Leclerc *et al.*, 2001; Morse *et al.*, 2002).

Au niveau hydrographique, quatre principaux affluents se jettent dans la Montmorency en amont du site à l'étude, soit les rivières Noire, des Neiges, de l'Île et aux Pins. Le tronçon à l'étude quant à lui ne contient que quelques petits tributaires drainant essentiellement les versants de la vallée, ce qui implique que les variations importantes de débit au sein du site sont essentiellement fonction de l'acheminement de l'eau en provenance de l'amont du bassin. En période estivale, le temps de réaction du bassin, c'est-à-dire le temps nécessaire à ce que des précipitations liquides soient acheminées jusqu'à l'aval, est typiquement de l'ordre de 12 heures (Leclerc *et al.*, 2001). Ce délai serait essentiellement dû à la forme allongée du bassin versant, laquelle prolonge son temps de réaction lors de précipitations (Johnson, 1983).

1.3.5. Cadre anthropique (vulnérabilité)

Bien que le bassin versant ne soit anthropisé qu'à 14% (coupes forestières et urbanisation) (CBRM, 2007), la portion de rivière étudiée consiste en une zone semi-urbaine où les éléments anthropiques sont nombreux. Ainsi, dans une zone de 100 m en périphérie de la rivière, on dénombre près de 400 bâtiments, une douzaine de rues et routes, deux ponts, de même que deux prises d'eau potable, l'une alimentant un sous-secteur de Charlesbourg et l'autre la municipalité de Beauport (Figure 1). Le secteur de l'Île-Enchanteresse (bornes 6 et 7, Figure 1) de même que toute la berge ouest regroupent à eux seuls 98% du nombre de bâtiments mentionné, la totalité des rues et routes de même que les prises d'eau en question. La berge est, quant à elle, regroupe sept habitations dont six se situent dans le secteur des îlets. En ce sens, la vulnérabilité apparaît fortement concentrée en berge ouest, sur l'Île-Enchanteresse et, dans une moindre mesure, en berge est dans le secteur des îlets.

2. REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Cette revue bibliographique s'articule autour de quatre principaux thèmes : le premier consiste à décrire les différents aspects de l'aléa érosion; le second traite du suivi de l'érosion des berges, plus spécifiquement dans un contexte d'évolution historique; le troisième porte sur les modèles numériques de terrain, élaborés notamment à partir de données topographiques de type LiDAR; et le quatrième brosse un portrait des divers types de modèle traitant de l'érosion des berges en milieu fluvial.

2.1. Description de l'aléa « érosion des berges »

Cette section consiste à décrire les caractéristiques hydrologique, hydraulique et géomorphologique à la base des phénomènes d'érosion des berges en rivière. Pour ce faire, l'aspect sémantique de l'érosion des berges sera d'abord présenté. Suivront ensuite : les principes de base régissant l'équilibre naturel des chenaux, les principaux processus fluviaux impliqués dans l'érosion des berges et les conditions hydrologiques favorisant l'occurrence de ce phénomène.

2.1.1. Définition de l'aléa « érosion des berges »

Au sens strict, le phénomène de l'érosion des berges consiste en l'enlèvement de matériel au sein des berges d'une rivière (Thomas et Goudie, 2000). Toutefois, en considérant les diverses constituantes de cet aléa, celui-ci apparaît comme étant le résultat de multiples processus (Charlton, 2008; Goudie, 2003; Lawler, 1992; Lawler *et al.*, 1997; Prosser *et al.*, 2000; Rosgen et Silvey, 1996; Thomas et Goudie, 2000). Charlton (2008) rassemble ces processus en trois groupes : les processus prédisposants et/ou aggravants (*pre-weakening processes*), les processus fluviaux (*fluvial processes*) et les processus de mouvements de masse (*processes of mass failure*). Le premier groupe rassemble les processus « préparant » la berge à l'érosion, dont notamment les cycles gel-dégel, les successions dessiccation/humidification et la perte de cohésion des dépôts par leur saturation en eau (*slaking process*). Le second groupe renvoie essentiellement aux processus d'arrachement et de transport des particules en berges conduisant au sapement du pied de celle-ci (affouillement). Ce dernier serait notamment le plus dynamique des processus d'érosion des berges (ASCE, 1998a; Wohl, 2000) et sera abordé plus en détails

ci-après (section 2.1.3). Le troisième groupe implique les processus de rupture et de glissement associés à la déstabilisation de la berge en réponse à l'affouillement de sa base. À noter le terme effondrement de berge remplacera le terme mouvement de masse (*mass failure*) employé par Charlton (2008), car celui-ci est normalement employé pour définir des phénomènes de mouvements de versant impliquant des talus d'une hauteur supérieure à 5 m (Gouvernement du Québec, 2005). Le type d'effondrement de berge est alors lié à la nature des dépôts (granulométrie, plasticité, propriétés mécaniques et homogénéité), mais aussi à l'angle et à la hauteur de la berge (Charlton 2008; Lawler *et al.*, 1997). Selon les volumes impliqués, le matériel mobilisé peut être rapidement évacué par les processus fluviaux ou, au contraire, demeurer en pied de berge, lui fournissant ainsi une protection temporaire par effet de butée (Charlton 2008). En somme, la diversité des phénomènes impliqués permet de mettre en lumière la complexité d'un phénomène, qui, au départ, apparaissait comme simple.

2.1.2. La notion de l'équilibre naturel du chenal

Plusieurs lois et principes régissent l'équilibre d'un chenal (Hjulström 1935; Lane, 1955; Leopold et Maddock 1953; Leopold et Wolman 1957). Parmi ceux-ci, deux principes fondamentaux permettent notamment d'expliquer avec simplicité comment les phénomènes d'érosion sont induits au sein d'un chenal, soit l'équilibre dynamique du chenal de Lane (1955) et le principe de la géométrie hydraulique du chenal de Leopold et Maddock (1953).

2.1.2.1. L'équilibre dynamique du chenal

Le premier principe, conceptualisé par Lane (1955), prend la forme d'un schéma illustrant l'équilibre dynamique entre la puissance d'écoulement et la géologie des chenaux (Figure 3). La partie gauche de la Figure 3 représente le volume (*sediment load*) et la granulométrie (*sediment size*) des apports sédimentaires entrant dans une section de chenal durant une période de temps donnée. La partie droite de la même figure représente quant à elle la puissance de l'écoulement nécessaire au transport de ces matériaux et est déterminée par le débit (*discharge*) transitant dans la section (durant la même période de temps) et par la pente du chenal (*stream slope*) sur laquelle celui-ci transite. Toutefois, lorsque les deux parties du balancier sont en équilibre, cela ne signifie pas que le chenal

est statique, mais plutôt que, en incluant de légères fluctuations sur une période de temps limitée, ni l'érosion ni la sédimentation ne domine dans la section en question (Charlton, 2008). En ce sens, un phénomène d'érosion interviendrait lorsque la puissance de l'écoulement excéderait celle nécessaire au transport de sédiments dans la section. Le surplus d'énergie serait alors investi dans l'entraînement des particules en partance du lit et des berges du chenal. Dans un cas inverse, un apport accru de sédiments ou une diminution de débit conduirait à une accumulation de sédiments dans la section.

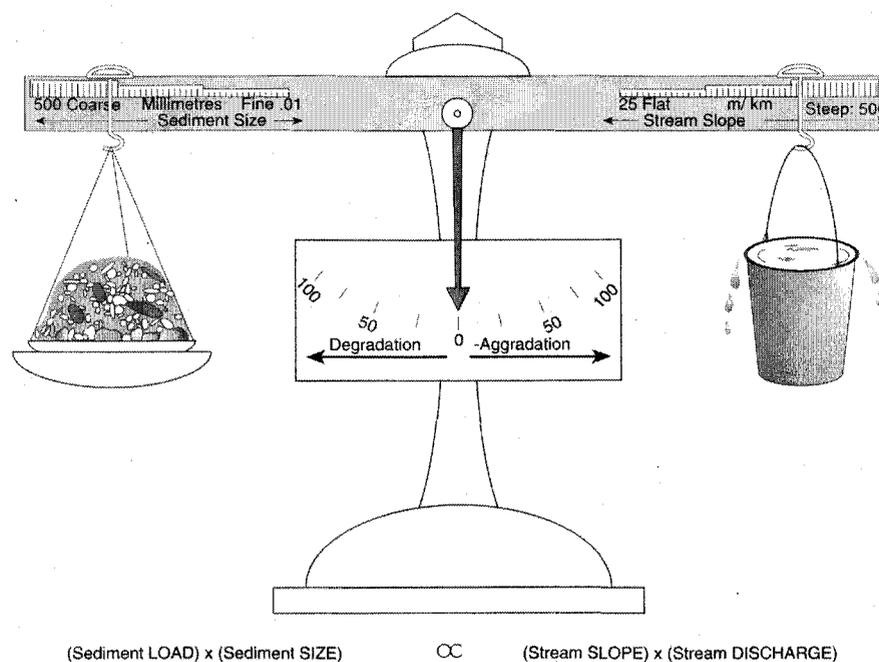


Figure 3 : Illustration du principe d'équilibre dynamique du chenal de Lane (1955) entre la puissance de l'écoulement (pente du chenal (*stream slope*) x débit (*discharge*)) et l'apport sédimentaire (charge sédimentaire (*sediment load*) x granulométrie (*sediment size*)). Source : Brierley et Fryirs (2005) adapté par Charlton (2008).

2.1.2.2. La géométrie hydraulique du chenal

Le second principe, défini par Leopold et Maddock (1953), repose davantage sur des bases hydrauliques et illustre un équilibre mettant en relation le débit, la vitesse d'écoulement, la largeur et la profondeur du chenal. Suite à de nombreuses observations de terrain et expérimentations en laboratoire, les auteurs purent établir que la géométrie des chenaux naturels était ajustée en fonction du débit selon la formule suivante (équation 1).

$$Q = wdv \quad (\text{Eq. 1})$$

Dans cette équation, Q représente le débit, w la largeur, d la profondeur et v la vitesse. Ainsi, d'après ces fondements, les phénomènes d'érosion découleraient d'une hausse du débit selon l'enchaînement suivant : une hausse de débit provoquerait l'accroissement des vitesses d'écoulement, générant ainsi des forces de cisaillement accrues sur le périmètre du chenal, pour finalement conduire à l'ajustement de la largeur et de la profondeur du chenal par l'érosion. L'ampleur de l'érosion serait alors fonction de la magnitude de la hausse des débits, soit de l'amplitude de la crue (Wohl, 2000). Ce dernier aspect sera abordé à la section 2.1.4.

2.1.3. Processus fluviaux

Comme ce fut mentionné à la section 2.1.1, les processus fluviaux sont au cœur des phénomènes d'érosion des berges. Ils agissent notamment *via* l'abrasion des dépôts en pied de berge, mais aussi comme facteurs déclencheurs des processus d'effondrement (Wohl, 2000). Dans cette section, quatre constituantes des environnements fluviaux intervenant dans l'érosion des berges sont décrites : le transport sédimentaire, la composante hélicoïdale de l'écoulement dans un segment courbé, l'abrasion glacielle et l'histoire de l'écoulement.

2.1.3.1. Transport sédimentaire

L'arrachement de particules sur le périmètre du chenal intervient lorsque les forces d'entraînement excèdent la résistance des matériaux à la mise en mouvement (Charlton, 2008). Cette résistance est essentiellement fonction de leur cohésion et de la taille des particules, alors que les forces d'entraînement réfèrent principalement à la vitesse de l'écoulement (Charlton, 2008). Ce principe constituant la base du transport sédimentaire fut schématisé par Hjulström (1935) (Figure 4). Ce diagramme illustre notamment le rôle de la cohésion et de la granulométrie des particules dans la résistance à l'érosion (courbe "*entrainment*", Figure 4). Pour les sédiments de calibre inférieur à 0,1 mm, la résistance à l'érosion augmente de façon inverse à la granulométrie en raison de leur cohésion interne, alors que pour les dépôts possédant une granulométrie supérieure à ce seuil (non cohésifs), la résistance croît en fonction de la taille des particules.

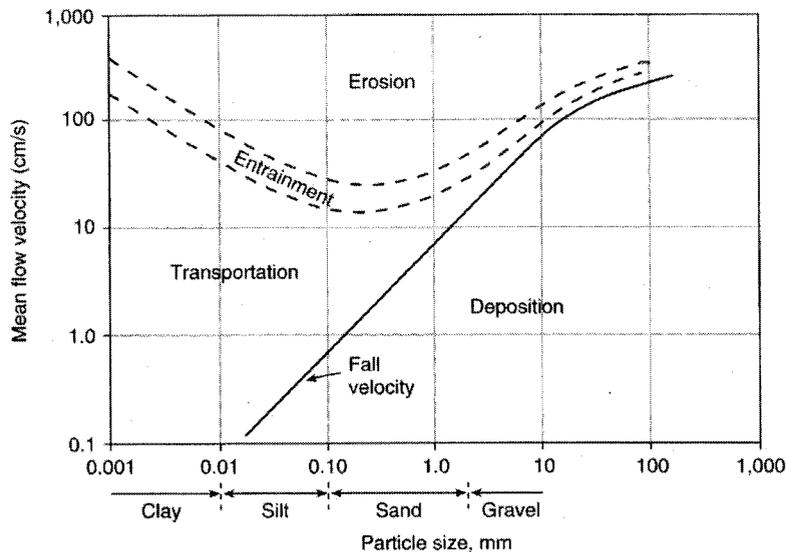


Figure 4 : Diagramme d'Hjulström (1935), illustrant les vitesses moyennes nécessaires à l'arrachement (érosion), au transport et à la déposition de particules de granulométrie croissante. Source : Hjulström (1935), adapté par Charlton (2008).

2.1.3.2. Composante hélicoïdale de l'écoulement

Dans les sections où le tracé du cours d'eau est courbe, les forces d'entraînement se verraient augmenter significativement en raison de l'occurrence d'une composante hélicoïdale au niveau de l'écoulement (Figure 5) (Beck, 2006; Ritter *et al.*, 2002). En effet, l'action de la force centrifuge en réponse à la déviation de l'écoulement dans la courbe causerait une légère surélévation du niveau d'eau dans la partie extérieure de celle-ci. Cette différence de niveau d'eau entre l'extérieur et l'intérieur de la courbe provoquerait un gradient de pression vers l'intérieur de celle-ci mettant alors en marche une cellule circulaire, soit la composante hélicoïdale en question ("*center region cell*", Figure 5) (Hamblin et Christiansen, 2004; Ritter *et al.*, 2002; Thompson, 1986). L'interaction de l'eau avec la berge concave (extérieure) induirait du fait même une seconde cellule tournoyant, cette fois, dans le sens opposé à la première ("*outer-region cell*", Figure 5) (Hamblin et Christiansen, 2004; Markham et Thorne, 1992). La rencontre de ces deux cellules favoriserait l'érosion dans la région du pied berge et ainsi son affouillement (Ritter *et al.* 2002; Franca, 2005).

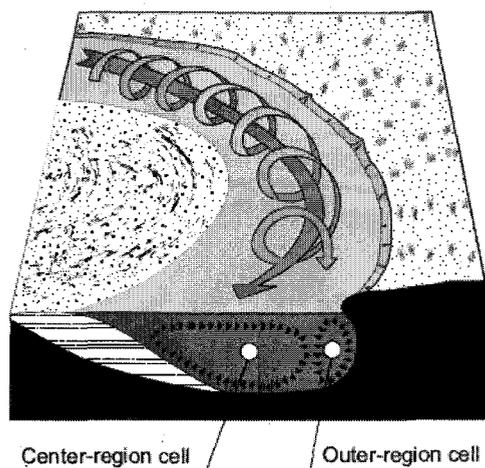


Figure 5 : Composante hélicoïdale de l'écoulement dans une section courbe de rivière. Source : Hamblin et Christiansen (2004), adapté par Beck (2006).

2.1.3.3. Abrasion glacielle

À l'intérieur des processus fluviaux, furent intégrés les processus d'abrasion par les radeaux de glace. En milieux froids, lors de débâcles hivernales ou printanières impliquant un déglacement mécanique de la rivière (rupture du couvercle de glace) (Beltaos, 2003; 1997), le transport de radeaux de glace par l'écoulement pourrait donner lieu à l'abrasion locale des berges (Day et Anderson 1976; Makay et Makay, 1977; Smith et Pearce, 2002). Cependant, la part d'érosion associée à l'abrasion par la glace demeure très peu documentée dans la littérature. Dans des circonstances où les crues glacielles génèrent la formation d'embâcles (Beltaos *et al.*, 1989; Church, 1988; Jasek, 2003; Prowse et Gridley, 1993; Smith et Pearce, 2002), l'ennoiement complet d'une section d'écoulement et le drainage soudain de cette masse d'eau peut donner lieu à des effondrements de berges importants, comme ce fut observé notamment sur la rivière Montmorency en 1957 dans le secteur de la rue des Trois-Saults (Morse *et al.*, 2002).

2.1.3.4. Historique de l'écoulement

Finalement, bien que n'étant pas un processus en soit, l'historique de l'écoulement serait aussi un facteur déterminant dans la magnitude des phénomènes d'érosion des berges en rivière (Wolman et Gerson, 1978), en fixant les conditions morfo-sédimentaires pré-événementielles. Ainsi, une rivière n'ayant pas connu de crues importantes depuis plusieurs années sera davantage sujette à l'érosion, en raison de l'accumulation de sédiments dans son cours, alors qu'une même rivière ayant récemment été soumise à un

évènement hydrologique majeur sera géométriquement calibrée et moins vulnérable à l'érosion (Wohl, 2000).

2.1.4. Caractéristiques des évènements hydrologiques érosifs

À la lumière de ce qui a été avancé précédemment, l'élément déclencheur de l'érosion des berges est essentiellement la crue elle-même. Il convient donc d'identifier quels types d'évènements hydrologiques sont capables d'engendrer de l'érosion. En ce sens, quatre aspects des crues sont abordés dans cette section : la puissance et la durée des crues, le rôle particulier de la débâcle printanière, l'origine des crues à l'eau libre et la récurrence des évènements érosifs.

2.1.4.1. Puissance et durée des crues

Cet aspect fut en l'occurrence abordé par Costa et O'Connor (1995). Ces auteurs développèrent notamment un schéma conceptuel mettant en relation la puissance (watts/m^2) et la durée des évènements hydrologiques pour établir leur capacité à provoquer des changements au niveau du chenal (zones grises ou noires, Figure 6). Ainsi, selon cette étude, les crues impliquant une forte énergie d'écoulement maintenue durant une période moyennement longue seraient celles capables d'accomplir le plus grand travail géomorphologique (type B Figure 6). Les crues de courte durée, mais de forte intensité (*flash flood*) (type C Figure 6) auraient aussi un fort potentiel d'érosion, alors que les crues de longue durée, mais de faible magnitude n'impliqueraient qu'une faible puissance d'érosion (type A Figure 6).

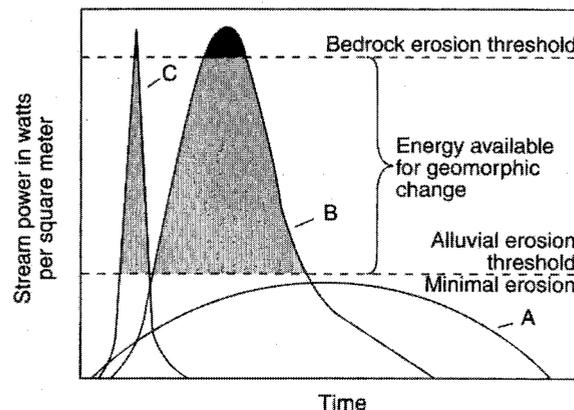


Figure 6 : Puissance et durée des évènements hydrologiques capables de générer des changements au niveau du chenal. Source : Costa et O'Connor (1995) modifié par Ritter *et al.* (2002).

2.1.4.2. Rôle de la débâcle printanière

Pour plusieurs rivières situées dans les environnements froids, la débâcle printanière serait le moment de l'année où la majorité du transport sédimentaire serait effectué. Les sédiments proviendraient alors principalement de l'érosion des berges (Church, 1988). Le volume d'eau issu de la fonte des neiges et de précipitations liquides, souvent responsables de la débâcle, peut alors générer une crue de grande magnitude pouvant s'échelonner sur plusieurs jours, voire sur quelques semaines (Hirschboek *et al.*, 2000).

2.1.4.3. Origine des crues à l'eau libre

En période sans neige, la magnitude et la durée des crues serait fonction de la taille du système dépressionnaire pourvoyeur de précipitations liquides (Hirschboek *et al.*, 2000), du niveau de saturation du bassin versant (Cosandey et Robinson, 2000; Merte, 2000) et des caractéristiques morphométriques de ce dernier soit, sa forme (Johnson, 1983), sa taille (Merte, 2000) et sa densité de drainage (Kochel, 1988).

2.1.4.4. Récurrence des événements érosifs

Au niveau de l'occurrence de changements dans la morphologie du chenal, la majeure partie de l'érosion des berges serait accomplie par des événements ayant des périodes de retour de 1 à 2 ans (Wolman et Miller, 1960) lesquels génèreraient une érosion non pas graduelle, mais bien par à-coups (Consuegra *et al.*, 1999), soit lors des événements de crue. Bien que les crues de moindre magnitude et de récurrence élevée soient plus actives en fréquence au niveau géomorphologique, les crues de grande magnitude et de faible récurrence demeurent néanmoins d'importants agents structurants (Brooks *et al.*, 1997; Costa et O'Connor, 1995; Kochel, 1988; Wohl, 2000), sans doute les plus importants.

2.2. Suivi de l'érosion des berges

Cette section comporte trois parties, une première mettant en lumière la diversité d'appellations et d'objets pouvant correspondre à la définition d'une ligne de berge, une seconde portant sur les techniques de cartographie couramment utilisées pour les suivis d'érosion des berges ainsi qu'une troisième identifiant les principales sources d'erreurs associées au suivi de l'érosion des berges. Cette brève revue de littérature, à la fois

sémantique et technique s'inscrit dans l'optique de réalisation d'une cartographie diachronique à partir d'images à grande échelle (petit territoire).

2.2.1. Types de lignes de berge

Tout d'abord, la ligne de berge en bordure d'un cours d'eau n'apparaît pas toujours comme une forme bien définie dans la littérature (Church, 1996; Chorley et Dale, 1972; Lawler, 1993; Messier, 2007; Osterkamp et Hedman, 1982 et 1977; Riley, 1972; Wharton, 1992). Plusieurs termes sont ainsi proposés pour décrire une forme pouvant être interprétée comme une ligne de berge. Quelques-unes de ces appellations sont présentées ici sous trois catégories basées sur l'objet cartographique désigné par celles-ci, soit la limite eau/terre, la délimitation basée sur la végétation et la limite du haut de berge.

2.2.1.1. Limite eau-terre

Dans cette catégorie, on retrouve les appellations suivantes : niveau normal d'hiver (*normal winter level*) (Lawler, 1993; Gurnell *et al.*, 1994), largeur de l'eau au moment du relevé (*water width at the time of the survey*) (Lawler, 1993) et la ligne bleue (*blue line*) (Scheidegger, 1966; Bryan, 1928). Dans la pratique, cette limite consiste simplement à tracer une ligne séparant l'eau de la terre à partir de photographies aériennes.

2.2.1.2. Limite de la végétation

Dans cette catégorie, on retrouve trois principales expressions : la limite des arbres ou de la canopée (*tree-lined*) (Lawler, 1993; Riley, 1972; Bridge, 2003), la limite de la végétation terrestre (Messier, 2007; Goupil, 2002; Church 1996) et la limite du chenal actif (*active channel*) (Osterkamp et Hedman, 1982 et 1977; Hedman *et al.*, 1974). La première serait utilisée pour la cartographie à petite échelle à partir de photos aériennes (Scheidegger, 1966). La deuxième, plus subtile, correspondrait à une limite séparant la végétation dite aquatique, adaptée à des périodes de submersion récurrentes (2 ans), de la végétation terrestre (Goupil, 2002). Cette limite renvoie à la méthode botanique employée notamment par le Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) pour la délimitation de la ligne des hautes eaux (Goupil, 2002; Messier, 2007). Cette frontière est aussi couramment associée au débit plein bord (*bankfull stage*) lequel correspond à l'écoulement maximum qui peut être contenu dans le chenal sans en sortir (Goudie, 2003; Leopold *et al.*, 1964; Riley, 1972; Thomas et Goudie, 2000) et

généralement considéré comme correspondant à une récurrence de 1 à 2,5 ans (William, 1978; Church, 1996). Cette limite demeurerait toutefois difficilement applicable dans un contexte de cartographie multi-dates par photographies aériennes (Osterkamp et Hedman, 1977 et 1982; Riley, 1972; Wharton, 1992). Pour ce qui est de la troisième appellation, soit la limite du chenal actif, la portion botanique de sa définition correspondrait à la limite de la végétation permanente. Cette végétation s'installerait à l'endroit où la pente, généralement abrupte, de la berge deviendrait plus douce et délimiterait la portion active du chenal en lien avec l'écoulement (Osterkamp et Hedman, 1977).

2.2.1.3. Haut de berge

La limite du haut de la berge (*bank top*) fut mentionnée par Lawler (1993), mais sans fournir de critères permettant de la définir objectivement. Cependant, par déduction, cette limite correspondrait au replat situé en haut de l'inclinaison de la berge. En ce sens, la limite du chenal actif de Osterkamp et Hedman (1982 et 1977) et Hedman *et al.* (1974) pourrait aussi s'apparenter à un haut de berge.

2.2.2. Techniques de suivi de l'érosion des berges

Plusieurs techniques permettant d'assurer un suivi du déplacement des berges existent; Lawler (1993) présente en ce sens un inventaire exhaustif des différentes méthodes disponibles pour ce faire. Toutefois, dans une optique de cartographie diachronique impliquant une période couvrant quelques décennies, le nombre de méthodes applicables se voit considérablement restreint. Parmi celles-ci, les suivis à partir de photographies aériennes apparaissent comme étant les plus couramment utilisés (Beck, 2006; Consuegra *et al.* 1999; Gurnell *et al.*, 1994; Gilvear *et al.*, 2000, Lawler, 1993; Winterbottom et Gilvear, 2000). Cette technique consiste à numériser le trait de berge à partir de couvertures de photographies aériennes correspondant aux années ciblées (Lawler, 1993). L'année cible ancienne peut alors remonter aussi loin que la production des premiers relevés aériens autour de 1920 (Provencher et Dubois, 2007). Pour l'année cible récente, aux photographies aériennes, s'ajoute une diversité d'images satellitaires dont Gilvear et Bryant (2003) font la revue détaillée dans un contexte de cartographie de chenaux. À noter toutefois que, en fonction de l'échelle de cartographie ciblée, ces dernières doivent posséder une grande résolution spatiale (pixels de petite taille) afin de permettre

l'identification des limites du chenal (Gilvear et Bryant, 2003). Les images Quickbird et Ikonos offrirait notamment la meilleure résolution en panchromatique (noir et blanc) avec respectivement des pixels de 0,61 m et 1 m (Boland, 2004).

La cartographie des traits de berge peut être exécutée en planimétrie (2D) ou en stéréoscopie (3D). Le premier type implique la plupart du temps la numérisation préalable des images puis l'importation et le positionnement de celles-ci dans un SIG (Beck, 2006; Consuegra *et al.* 1999; Gurnell *et al.*, 1994; Gilvear *et al.*, 2000, Lawler, 1993; Winterbottom et Gilvear, 2000). Lorsque les changements anticipés au niveau de la position de la berge sont petits, l'étape d'importation devrait être précédée d'une rectification géométrique des images (Gilvear et Bryant, 2003). Ce procédé, couramment appelé orthorectification, permettrait, d'une part, de corriger les distorsions associées à la déformation radiale des images, aux mouvements de l'avion ainsi qu'à la topographie (Lewin et Manton, 1975) et, d'autre part, de positionner les clichés avec une précision supérieure (Agouris *et al.*, 2004; Dixon *et al.*, 1998). Au niveau des images satellitaires, des corrections similaires peuvent aussi s'avérer nécessaires (Le Guellec, 2007). L'utilisation de ce type d'image, en mode multi-spectral, peut permettre l'extraction automatisée de chenaux, notamment *via* la détection de la surface de l'eau (Gilvear et Bryant, 2003). Le second type, la stéréoscopie, nécessite l'utilisation d'un couple de photographies aériennes. Le principe de la stéréoscopie implique un chevauchement entre les images, le plus souvent autour de 60 %. La zone commune aux deux photographies peut alors être visualisée en trois dimensions *via* l'effet de parallaxe. L'effet de parallaxe consiste à visualiser une même zone sous deux angles différents (Gilvear et Bryant, 2003). Cet effet est simulé en utilisant un stéréoscope ou un logiciel de photogrammétrie numérique (Agouris *et al.*, 2003). Ce dernier permettrait notamment de numériser précisément des objets à l'écran en trois dimensions et à différentes époques et échelles. Les objets numérisés avec ces logiciels seraient ensuite exportables vers des SIG permettant alors aisément leur comparaison (Dixon *et al.* 1998).

2.2.3. Sources d'erreurs

Selon Winterbottom et Gilvear (2000), les erreurs pouvant être introduites dans la carte finale de suivi de berge proviendraient de trois principales sources : des critères

d'identification de la berge, de la technique de numérisation employée et de la qualité du géopositionnement des images. À celles-ci, s'ajoutent des imprécisions potentielles associées à la qualité des images employées, tel que mentionné par Provencher et Dubois (2007).

- Contraste des teintes ou tonalités
- Facteurs atmosphériques
- Sensibilité de la pellicule et filtre
- Déformation radiale (en s'éloignant du centre de la photo)
- Distorsion associée aux mouvements de l'avion (roulis et tangage)
- Déformation du négatif
- Échelle (résolution)
- Type d'émulsion (panchromatique ou couleur)
- Période du relevé (stade de feuillaison des végétaux)
- Heure du relevé (ombre)

2.3. Les Modèles Numériques de Terrain (MNT)

Un MNT consiste en une représentation numérique de la topographie formée le plus souvent d'une grille de pixels égaux portant chacun une valeur d'altitude (Chaplot *et al.*, 2006). Les termes MNE (modèle numérique d'élévation), MNA (modèle numérique d'altitude) et MNS (modèle numérique de surface) sont aussi fréquemment utilisés (El-Sheimy *et al.*, 2005). Les MNE et MNA illustrent l'altitude d'une surface indéterminée, les MNT représentent l'altitude du sol, alors que les MNS décrivent l'altitude de toute surface incluant la végétation et le milieu bâti. Depuis la popularisation des SIG commerciaux, les MNT furent couramment utilisés dans le cadre d'études environnementales, notamment en milieu fluvial (Beck, 2006; Charlton *et al.*, 2003; Drouin et Saint-Laurent, 2010; Hilldale et Raff, 2008; Leclerc *et al.*, 2001; Notabaert *et al.* 2009; Saint-Laurent et Schneider, 2004; Winterbottom et Gilvear, 2000). Les données topographiques à la base des MNT peuvent être issues de diverses techniques d'acquisition. Globalement, on retrouve les relevés de terrain par station totale et ou par GPS (*Global Positioning System*), la photogrammétrie ainsi que diverses techniques de télédétection, dont notamment l'interférométrie radar (*interferometric synthetic aperture radar, IFSAR*) et les acquisitions par laser aéroporté LiDAR (Chaplot *et al.*, 2006; Lloyd et Atkinson, 2002). Cette dernière technique, dont l'acronyme signifie Light Detection And Ranging, serait devenue une technologie répandue pour la production de données numériques de terrain (Lloyd et Atkinson, 2002). À noter que le LiDAR existe aussi dans

une version basée au sol (*groundbased* LiDAR) (Kemeny et Turner, 2008) et dans une autre plus récente permettant des acquisitions depuis l'espace (*spaceborne* LiDAR) (Tao *et al.* 2008; Winker et Hunt, 2007). Dans sa forme aéroportée, l'acquisition LiDAR peut être effectuée de façon oblique (Thoma *et al.*, 2005), mais la technique en plan demeure de loin la plus répandue (Beck, 2006; Charlton *et al.*, 2003; Cottin, 2008; Hilldale et Raff, 2008; Leclerc *et al.*, 2001; Notabaert *et al.* 2009; Winterbottom et Gilvear, 2000; Xhardé, 2007). En ce sens, cette section sera dédiée, d'une part, aux fondements du LiDAR aéroporté en plan et à son comportement en milieu fluvial et, d'autre part, aux modes d'interpolation les plus appropriés à ce genre de données pour la production de MNT.

2.3.1. Données topographiques LiDAR

2.3.1.1. Principe du LiDAR aéroporté

Globalement, ce mode d'acquisition de données topographiques consiste à envoyer des impulsions laser à partir d'une plateforme aérienne vers la surface de la terre et à capter le signal de retour. Le temps de parcours de l'impulsion indique alors l'altitude de la surface en question (Jensen *et al.*, 2007; Lillesand *et al.*, 2004). Ce mode d'acquisition de données topographiques implique quatre principales constituantes: 1) l'appareil optique muni d'un émetteur/récepteur acheminant et recevant un signal laser; 2) un système inertiel (*Inertial Measurements Units, IMU*) permettant de prendre en compte les mouvements de l'appareil en vol; 3) un système de positionnement de l'aéronef (*Aircraft Positioning System, APA*), soit un GPS haute précision (KGPS ou DGPS); 4) un système central d'acquisition de données (*System Control and Data Acquisition, SCADA*) couplant les données inertielles aux données laser et aux coordonnées spatiales de l'appareil (*X, Y* et *Z*) en temps réel (Cottin, 2008; Fowler, 2000; Jensen, 2007; USACE, 2002). Deux types de LiDAR aéroportés existent, le LiDAR topographique et le LiDAR bathymétrique. La version la plus connue de ce dernier se nomme SHOALS (Scanning Hydrographic Operational Airborne LiDAR Survey) (Jensen, 2007). Le premier implique une bande du proche infrarouge (PIR) avec une longueur d'onde située entre 1040 nanomètres (nm) et 1060 nm (Boland *et al.* 2004). Le dernier fonctionne avec une bande PIR de 1064 nm et une bande bleu-vert de 532 nm permettant la pénétration de l'eau

(Guenther *et al.* 2000; Mikhail *et al.* 2001). La présente recherche n'impliquant que le LiDAR topographique, l'attention sera centrée sur celui-ci.

La plupart des versions récentes des systèmes LiDAR permettent l'enregistrement de l'intensité du signal de retour (Jensen, 2007). Cette information permet ultimement de discerner les types de surfaces rencontrées (Lillesand *et al.* 2004; Jensen, 2007). Les premières générations, quant à elles, n'enregistraient souvent que l'altitude de la première surface rencontrée (Charlton *et al.*, 2003; Fortin *et al.*, 2002; Leclerc *et al.*, 2001; Ouellet *et al.*, 2003).

Le produit de cette acquisition consiste en un fichier de points portant les coordonnées X , Y , et Z et une donnée d'intensité, le cas échéant. La densité de ces points peut varier de 1 point aux 144 m² à 32 points au m². La précision générale en Z est de l'ordre de 15 à 20 cm (Notabaert *et al.* 2009; Charlton *et al.*, 2003; Fortin *et al.*, 2002; Leclerc *et al.*, 2001; Fowler, 2000; Brinkman et O'Neil, 2000) et de 2 à 5 fois inférieure en X Y (USACE 2002; potentiellement 1999; Xhardé, 2007). Cette précision tendrait toutefois à diminuer dans les environnements au relief très accidenté (Schenk, 1999; Xhardé, 2007).

Parmi les avantages du LiDAR, on compte la possibilité d'acquérir une grande quantité d'information topographique, de façon rapide et économique, sur de vastes étendues, avec une grande précision, dans des zones difficilement accessibles et le résultat se combine facilement avec les applications des SIG (Charlton *et al.*, 2003; Jensen, 2007; Lillesand *et al.*, 2004; Liu *et al.* 2007). En outre, par rapport à la technique alternative, la photogrammétrie, le LiDAR permet de produire des relevés 25 à 33% plus rapidement, il ne dépend pas de l'ensoleillement (peut être fait à la noirceur), il nécessite moins de recouvrement entre les lignes de vol et permet d'avoir des relevés fiables dans les régions boisées (Satale et Kulkarni, 2003).

2.3.1.2. Prétraitement du LiDAR

De par son caractère d'acquisition systématique, le LiDAR relève divers objets ou types de surface, dont notamment la couverture végétale, les objets anthropiques (maisons, ponts, routes, lignes électriques, poteaux, etc.) et la surface de l'eau. Afin d'obtenir les données topographiques proprement dites, les points ne correspondant pas au sol doivent être identifiés et retirés du relevé. Avec les nouvelles générations de LiDAR intégrant un

signal d'intensité, cette classification est grandement facilitée (Jensen, 2007), alors que pour les produits moins récents, cette validation s'effectue de façon plutôt manuelle. L'exclusion des points ne correspondant pas au sol conduit nécessairement à réduire la quantité finale de points (Charlton *et al.*, 2003; USACE 2002). En milieu naturel, la quantité de points rejetés serait fortement liée à la saison du relevé, notamment en lien avec la période de feuillaison (présence ou absence de feuilles dans les arbres et arbustes) (Jensen, 2007).

À cette classification, s'ajoutent des contrôles de qualité visant à corriger ou éliminer certains biais provenant de facteurs environnementaux au moment de l'acquisition. Ceux-ci proviennent principalement de l'atmosphère (nuages, neige, pluie, brouillard, illumination solaire, oiseaux, etc.) et de l'interface air/eau (brume locale, vagues, reflet du soleil sur l'eau, aérosols et eaux vives (« moutons blancs ») dans les zones de rapides en rivière, etc. (Cottin, 2008; Guenther *et al.*, 2000).

2.3.1.3. Le LiDAR topographique et l'eau

Suite au prétraitement des données LiDAR topographiques brutes, notamment celles issues des premières générations, des points réfléchis par la surface de l'eau peuvent être classifiés comme des points "sol" (Ouellet *et al.*, 2003; Fortin *et al.*, 2002; Leclerc *et al.*, 2001). La précision de ces points demeure par contre relativement peu documentée dans la littérature. En effet, il semble que cet aspect du LiDAR topographique ait été éclipsé par la venue du LiDAR bathymétrique lequel détecte l'interface air/eau avec une grande précision, le plus souvent *via* le signal Raman (Guenther *et al.*, 2000; Cottin, 2008; Xhardé, 2007).

2.3.1.3.1. Pénétration/réflexion dans la colonne d'eau

Les biais associés aux impulsions issues des surfaces de l'eau consisteraient notamment en des phénomènes de pénétration/réflexion dans la colonne d'eau (Ouellet *et al.* 2003). L'information sur le sujet y est toutefois fragmentaire et hétérogène comme en font état les quelques références suivantes. D'abord, Notabaert *et al.* (2009) mentionnent que le signal LiDAR PIR ne peut pas pénétrer dans l'eau. Guenther *et al.*, (2000) et Hilldall et Raff (2008) indiquent, quant à eux, que la pénétration n'y est que très faible et que l'erreur lui étant associée y est aussi faible. Ensuite, Leclerc *et al.* (2001) ont observé une

sous-évaluation locale de la surface de l'eau, issue de données LiDAR interpolées, de l'ordre de 20 cm par rapport au niveau du lit. Charlton *et al.* (2003) mentionnent le même genre de phénomènes, mais présentent des écarts moyens plutôt de l'ordre 52 cm. Finalement, Ouellet *et al.*, (2003) indiquent des cas fréquents de pénétration sans toutefois en fournir la valeur.

Concernant les conditions environnementales favorisant ces phénomènes, malgré des informations fragmentaires, la profondeur, la rugosité et la turbidité de l'eau aux sites semblent être des facteurs prédisposants. Ainsi, Leclerc *et al.* (2001) identifiaient ces incohérences aquatiques au niveau d'un seuil présentant des remous; Ouellet *et al.* (2003) associeraient ces phénomènes à des zones calmes et faiblement turbides; Charlton *et al.* (2003) ne mentionnent pas les conditions à la base de ces phénomènes, mais ils indiquent par contre la perte du signal en eaux profondes. En lien avec ce dernier élément d'information, il semble que le signal LiDAR PIR soit dégradé ou absorbé à une profondeur de moins d'un mètre (communication personnelle : Robert Hilldale, 2009), ce qui suggère que les phénomènes en question ne pourraient pas survenir au-delà de cette profondeur.

2.3.1.3.2. Discontinuités spatiales (vides) dans les relevés

L'utilisation du LiDAR topographique en milieu aquatique peut aussi donner lieu à des discontinuités spatiales prenant la forme de vides dans le relevé (Ouellet *et al.*, 2003; Charlton *et al.* 2003). Cette absorption, plus précisément cette rétrodiffusion, serait amplifiée par des eaux claires et des conditions sans vent, générant des surfaces aqueuses lisses (Guenther *et al.* 2000), de même que par l'angle d'incidence du faisceau laser (Ouellet *et al.* 2003) et une profondeur importante (Charlton *et al.*, 2003). Cette disparition de points serait aussi associée aux propriétés intrinsèques du signal LiDAR PIR, lequel tendrait naturellement à être diffusé par l'eau et dont le retour deviendrait insaisissable par le capteur (Jensen, 2007). Ces occurrences de rétrodiffusion pourraient aussi être liées à d'autres facteurs environnementaux, dont notamment la présence de contaminants chimiques flottants à la surface de l'eau, le contenu en chlorophylle, la matière organique dissoute, les micro-organismes en suspension, etc.³

³ Voir Pe'eri et Philpot, (2007) pour plus de détails.

2.3.2. Méthodes d'interpolation appropriées pour les données LiDAR

D'après la littérature, les interpolateurs les plus couramment utilisés pour la création de MNT à partir de données topographiques LiDAR seraient l'inverse de la distance (*Inverse Distance Weight, IDW*) (Ali, 2004; Anderson *et al.*, 2005; Beck, 2006; Chaplot *et al.*, 2006; El-Sheimy *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2007; Lloyd et Atkinson 2002) et le krigeage (Ali, 2004; Anderson *et al.*, 2005; Chaplot *et al.*, 2006; El-Sheimy *et al.*, 2005; Hilldale et Raff, 2008; Lloyd et Atkinson 2002 et 2006; Notabaert *et al.*, 2009). Ces deux types d'interpolations relèvent de la grande catégorie des interpolateurs linéaires. Dans cette même famille, deux sous groupes se distinguent, les interpolateurs géostatistiques et déterministes, auxquels correspondent respectivement le krigeage et IDW (Anderson *et al.*, 2005; Liu *et al.*, 2007).

2.3.2.1. L'inverse de la distance (IDW)

Selon le principe d'IDW, chaque point de mesure exerce une influence locale (poids) laquelle diminue en fonction de la distance par rapport au point calculé (Lloyd et Atkinson, 2002). Cette relation prend la forme suivante: $P(d) = 1/d^x$, où $P(d)$ correspond au poids à une distance d , lequel est déterminé par l'inverse de la distance à une puissance x (Wilson et Galant, 2000). En d'autres termes, la valeur calculée correspond à une moyenne des points dont la valeur est pondérée en fonction d'un poids variant en fonction de la distance (El-Sheimy *et al.*, 2005). IDW serait particulièrement efficace pour les jeux de données constitués de points d'élévation espacés régulièrement (El-Sheimy *et al.*, 2005; Wood et Fisher 1993) et possédant une forte densité (Chaplot *et al.*, 2006). Au niveau informatique, ce type d'interpolation demeure simple et rapide à effectuer (Anderson *et al.*, 2005; Lloyd et Atkinson, 2002 et 2006).

2.3.2.2. Le krigeage

Plusieurs types de krigeages existent⁴. En ce qui a trait à l'utilisation faite du krigeage en relation avec les données LiDAR, deux types sont plus fréquemment rencontrés; le krigeage ordinaire et universel (Anderson *et al.*, 2005; Chaplot *et al.* 2006; El-Sheimy *et al.*, 2005; Hilldale et Raff, 2008; Lloyd et Atkinson, 2002). La structure générale du krigeage mentionnée ici englobe les deux types mentionnés précédemment. Le poids de

⁴ Pour de l'information détaillée sur le sujet, consultez Cressie (1993) et El-Sheimy *et al.* (2005)

krigeage est établi afin de minimiser la variance d'estimation. Le calcul du poids de krigeage implique deux composantes dans l'établissement des poids des points voisins : il tient compte de la position spatiale relative des points de mesure entre eux et avec le point à estimer. La valeur du lien spatial dépend alors du variogramme adopté (El-Sheimy *et al.*, 2005; Chaplot *et al.*, 2006; Lui *et al.* 2007). Plusieurs types de variogrammes (linéaire, gaussien, sphérique, exponentiel, etc.) existent. De par ses prédictions non biaisées et sa variance minimale connue, le krigeage serait considéré comme l'interpolateur optimal (Cressie 1993; Kitanidis, 1997). De plus, la dimension géostatistique du krigeage le rendrait moins sensible aux irrégularités dans l'espacement des points, notamment lorsque la distance entre les points de mesure augmente localement (Anderson *et al.* 2005). Par contre, la technique du krigeage implique une quantité substantielle de calculs, ce qui rend cette approche plus lourde sur le plan informatique.

2.3.2.3. Autres interpolateurs

Parmi les autres interpolateurs moins souvent employés pour l'interpolation des données LiDAR, on note le spline (Charlton *et al.*, 2003; Chaplot *et al.*, 2006), la méthode du plus proche voisin (*Nearest Neighbour, NN*) (Xhardé, 2007) et la triangulation par réseau irrégulier (*Triangulation Irregular Network, TIN*) (Ali, 2004), qui forme un sous-ensemble de la méthode des éléments finis (Dhatt *et al.*, 2005). Aussi, de nouvelles méthodes furent développées par Almansa *et al.* (2002), Chaplot *et al.* (2006) et Shi et Tian (2006), mais ne seront pas expliquées dans le cadre de cette revue de littérature. La fonction spline implique globalement l'ajustement d'une surface polynomiale d'un ordre déterminé à travers les points de mesure ainsi que la détermination des paramètres de tension (dérivées) contrôlant le degré de lissage de la surface produite (Chaplot *et al.*, 2006; Lui *et al.*, 2007). La méthode du plus proche voisin consiste à attribuer au point calculé la valeur du point le plus proche (El-Sheimy *et al.*, 2005). Xhardé (2007) aurait notamment utilisé cette méthode due à sa simplicité et à la forte densité du relevé LiDAR à sa disposition (1 point aux 30 cm). Le modèle TIN basé sur le principe de la triangulation de Delaunay consiste à relier les points de mesure entre eux *via* une série de triangles vectoriels les plus isocèles possible (El-Sheimy *et al.*, 2005) et n'implique aucun lissage (Ali, 2004; Dhatt *et al.*, 2005).

2.4. Modélisation de l'érosion des berges : types de modèles

Il existe dans la littérature plusieurs modèles visant à anticiper la dynamique de déplacement des chenaux de rivière (ASCE, 1998a et 1998b; Beck, 2006; Consuegra *et al.*, 1999; Darby et Thorne, 1996; FEMA, 1999; Gautier *et al.*, 2000; Howard et Knutson, 1984; Lancaster et Bras, 2002; Lance et Consuegra, 1998; Rakotondranaly, 2001; Richardson, 2002; Rosgen et Silvey, 1996; Saint-Laurent et Schneider, 2004; Simon et Downs, 1995; Winterbottom et Gilvear, 2000). Cependant, malgré une littérature foisonnante sur le sujet, il ne semble pas exister une classification couramment acceptée permettant de départager ceux-ci. On y retrouve plutôt quelques essais de classification proposant diverses catégories. Parmi ceux-ci, la FEMA (1999) proposa une classification comprenant trois groupes: les analyses géomorphologiques, les analyses d'ingénierie et les modèles mathématiques. Ensuite, dans ses travaux de doctorat, au cours desquels un inventaire des différents modèles fut effectué, Beck (2006) distingua trois catégories de modèles: les modèles conceptuels, les analyses d'ingénierie, empruntées à la FEMA (1999), et les modèles géofluviaux, provenant du ASCE (1998b). En outre, le document de l'ASCE (1998b), mentionné précédemment, définit plus d'une dizaine de types de modèles.

Ces multiples catégories de modèles décrites par une sémantique toute aussi variée illustrent, en ce sens, la diversité des disciplines scientifiques se recoupant au niveau d'étude des environnements fluviaux et, du fait même, la difficulté que pose l'établissement d'une classification universelle. Ainsi, par souci de simplicité et pour les besoins de la présente recherche, les différents types de modèles seront regroupés sous deux grandes appellations : les modèles numériques/hydrodynamiques et les modèles hydro-géomorphologiques. Dans l'optique où le modèle développé dans cette recherche relève davantage de la dernière catégorie, celle-ci sera abordée plus en détails, alors que la première sera brièvement traitée.

2.4.1. Les modèles numériques/hydrodynamiques

Ces types de modèles reposent essentiellement sur des fondements physiques et mathématiques impliquant le plus souvent un volet hydrodynamique prédominant, lequel demande une grande quantité de données (Consuegra *et al.*, 1999; Simon et Downs,

1995). Ils s'appliquent le plus fréquemment à des sites spécifiques (à grande échelle) (FEMA, 1999) virtuellement reconstitués dans une réalité numérique et visent à quantifier les changements futurs au niveau du chenal (lit et/ou berges) (ASCE, 1998b). Le degré de complexité de ces modèles est variable. Ils peuvent être basés sur des formules empiriques (Howard et Knutson, 1984; Consuegra *et al.*, 1999) et/ou sur des équations de mécanique des fluides (Lancaster et Bras, 2002), ou alors prendre la forme de modèles hydrodynamiques proprement dits intégrant une à trois dimensions (Richardson, 2002, ASCE 1998b). La forme la plus sophistiquée en ce qui concerne la modélisation de l'érosion des berges serait, selon Beck (2006), les modèles géofluviaux. Ceux-ci couplent à la fois des modèles hydrodynamiques et des modèles de transport sédimentaire tout en considérant la mécanique d'ajustement des berges (ASCE, 1998b). Ces modèles renvoient à des variables essentiellement quantitatives et visent à évaluer les probabilités de déplacement incluant les reculs associés à l'effondrement des berges (Beck, 2006).

2.4.2. Les modèles hydro-géomorphologiques

Contrairement au groupe précédent, ces modèles seraient davantage dédiés à l'identification des zones propices à l'érosion qu'à une quantification de la magnitude future des phénomènes de recul. Néanmoins, certains modèles situés à mi-chemin entre la catégorie précédente et la présente peuvent conduire à des taux de recul (Rosgen et Silvey, 1996) ou à des probabilités d'érosion (Winterbottom et Gilvear, 2000). Ces approches impliquent le plus souvent la production d'un indice de sensibilité des berges à l'érosion, lequel découle de la mise en relation de plusieurs variables descriptives. Ces dernières proviennent essentiellement d'une caractérisation géomorphologique et hydrologique du chenal à l'étude. Aussi, en fonction du niveau de complexité du modèle, une composante hydrodynamique peut être intégrée (Rosgen et Silvey, 1996), sans toutefois y occuper le premier rang, par opposition au type précédent. Ces modèles s'appliquent généralement à des échelles de travail plus petites (grands territoires) et couvrent par conséquent de plus longues sections de rivière (Rosgen et Silvey, 1996; Saint-Laurent et Schneider, 2004; Simon et Downs, 1995; Winterbottom et Gilvear, 2000).

Afin d'illustrer les différentes constituantes des modèles de ce type, quatre études furent sélectionnées et résumées ci-après. Leur sélection fut effectuée en fonction de leur structure, mais aussi en fonction du type d'environnement modélisé. Ce dernier critère visait à cibler des modèles élaborés dans des environnements fluviaux analogues à celui du présent site d'étude, à savoir des chenaux à caractère alluvial. À noter aussi que ce choix fut en partie orienté par les travaux de Beck (2006).

1) Saint-Laurent et Schneider (2004)

Le modèle proposé par ces auteurs se distingue notamment par sa relative simplicité. Il ne comporte pas d'étape de calibration ou de validation et implique une pondération manuelle. L'originalité de ce dernier provient du fait que sa structure est grandement inspirée des études de susceptibilité aux mouvements de versant de type heuristique (Aleotti et Chowdhury, 1999; Clouâtre *et al.*, 1996; Guillande *et al.*, 1993; Riopel *et al.*, 2007; Saha *et al.*, 2002). La rivière prise en compte dans cette étude comporte un tracé plutôt sinueux comprenant quelques méandres et des berges essentiellement constituées de dépôts argileux. Le modèle est élaboré à partir de 5 variables (Tableau 1)

Les variables produites furent importées dans un SIG pour former un indice de sensibilité des berges à l'érosion, lequel fut produit par l'addition des variables ayant au préalable fait l'objet d'une critériologie. Cette dernière comportait deux étapes. La première, nommée « pondération intra-critères », consistait à octroyer un poids (en %) à chaque classe à l'intérieur des variables elles-mêmes et la seconde, nommée « pondération inter-critères », consistait à attribuer une importance (aussi en %) à chaque variable. Les résultats de l'indice furent enfin discrétisés en trois classes de sensibilité à l'érosion et représentés sous forme de cartes. Cet indice fut élaboré à des fins d'aménagement du territoire (zonage des risques) et allait servir ultimement à orienter des études de stabilité des berges plus poussées.

Tableau 1: Inventaire des variables employés dans les études sélectionnées

Étude	Variables
Saint-Laurent et Schneider, 2004	Nature des dépôts de la berge Pente berge Hauteur berge Tracé de la rivière Occupation du sol (agriculture, urbains et autres)
Simons et Downs, 1995	Composition du lit (dépôts meubles et roche en place) Immunsation Stade d'évolution du chenal (Simon, 1989) % de rétrécissement en largeur Nombre de pilier(s) de pont dans le chenal Inclinaison des piliers de pont Trace de mouvements de talus près des piliers de pont % de blocage associé à des débris Sévérité de l'érosion des berges Proximité d'un méandre Angle d'approche de l'écoulement en crue % de végétation ligneuse
Winterbottom et Gilvear, 2000	Hauteur de la berge Hauteur d'érosion Pente de la berge Nature des dépôts de la berge Type de végétation Pente du lit Digue de retenue des eaux (<i>flood embankment</i>) Banc alluvial latéral à la berge Bedrock ou immunsation
Rosgen et Silvey, 1996	Ratio hauteur de la berge / hauteur du niveau débit plein bord Ratio profondeur des racines / hauteur de la berge Densité des racines en berge Pente de la berge % de la surface de la berge protégé par des débris ou de la végétation Composition de la berge (dépôts meubles et roche en place) Stratigraphie de la berge

2) Simon et Downs (1995)

Dans cette étude, les auteurs ont développé une méthode multidisciplinaire permettant d'identifier les zones potentiellement instables d'un tronçon de chenal de type alluvial. L'effort fut notamment concentré en périphérie d'infrastructures routières, en l'occurrence de ponts. Pour ce faire, une collecte de données qualitatives et quantitatives fut d'abord effectuée sur le terrain à l'aide d'une grille d'évaluation pour 1100 sites déterminés. Ces données furent ensuite importées dans un SIG sous forme de variables descriptives (Tableau 1). Ces variables furent ramenées à des valeurs situées entre 0 et 3, 0 représentant une instabilité faible et 3 marquant une précarité forte. La somme de ces dernières permet alors d'obtenir un indice d'instabilité du chenal (lit et berges). La valeur de l'indice fut ensuite mise en relation avec des cartes de vulnérabilité pour chaque site

investigué. Cette dernière étape permit d'identifier les secteurs d'interventions prioritaires. Les auteurs suggérèrent, ensuite, quatre différentes approches pouvant être utilisées ultimement pour prédire l'ampleur de l'érosion dans ces mêmes zones à risque. Ces approches sont : 1) les modèles numériques pour chenaux alluviaux, 2) les modèles empiriques basés sur le stade d'évolution du chenal, 3) les équations de régime, et 4) les relations empiriques prenant en compte les processus dominants dans les chenaux. Cependant, aucune d'entre elles ne fut appliquée de sorte qu'aucun résultat n'a découlé de celles-ci. En revanche, au niveau de l'indice d'instabilité du chenal, certains résultats furent présentés en périphérie de quelques ponts. En outre, bien que certains résultats d'instabilité furent comparés à des clichés de terrain, l'indice en question n'a pas fait l'objet d'une calibration ou d'une validation au sens strict.

3) *Winterbottom et Gilvear (2000)*

Cette étude fut menée sur un tronçon alluvial comportant quelques méandres à fort rayon. Le modèle élaboré consistait en une version amendée du modèle originalement développé par Graf (1984). Cette méthode, basée sur une grille uniforme de cellules englobant le cours d'eau et son environnement adjacent, consistait à prédire la probabilité d'une unité (cellule) à être érodée, en lien avec sa distance par rapport au chenal et à la récurrence des crues enregistrées durant la période de calcul. Contrairement à leur prédécesseur, Winterbottom et Gilvear (2000) implantèrent le modèle dans un SIG, afin de minimiser le nombre de manipulations manuelles. Cet outil servit de plus à produire les données de distance et d'érosion nécessaires au modèle, notamment *via* la cartographie multi-dates du chenal effectuée à partir de photographies aériennes. Dans le cadre de leur étude, Winterbottom et Gilvear (2000) ajoutèrent un indice représentant le potentiel d'érosion, lequel fut élaboré à partir de diverses variables descriptives (Tableau 1). Les auteurs ne mentionnent toutefois pas si les relevés de terrain furent effectués de façon systématique sur toutes les berges du site d'étude ou de manière ponctuelle. Néanmoins, l'ensemble des données fut intégré dans le SIG sous forme de couches matricielles, à partir desquelles les probabilités d'érosion furent calculées. Le modèle fut ensuite calibré à l'aide des données de recul et de récurrence de crue, mais ne fut pas, proprement dit, validé. L'approche permit d'attribuer une probabilité d'érosion pour chaque cellule impliquée dans le calcul. Par contre, en lien avec ce qui fut mentionné précédemment, il s'avère impossible

d'établir si ce calcul fut effectué de façon extensive sur la totalité des berges ou sur une partie d'entre elles, ce qui apparaît comme une lacune au niveau de la rédaction, mais qui n'enlève rien à la logique de modélisation développée.

4) Rosgen et Silvey (1996)

Les auteurs développèrent leur modèle pour des cours d'eau situés principalement dans des environnements montagneux. Celui-ci comporte deux éléments fondamentaux : un index de sensibilité des berges à l'érosion (*Bank Erosion Hazard Index*, BEHI) et un indice des forces de cisaillement en périphérie des berges (*Near-bank Stress Indice*, NBS). Le premier fut élaboré à partir de sept variables (Tableau 1). Les cinq premières se virent attribuer des valeurs situées entre 0 et 10, 0 étant une sensibilité nulle et 10 étant une sensibilité extrême, et furent additionnées entre elles. Les deux dernières furent traitées de façon indépendante dans l'indice pouvant faire accroître ou réduire la valeur de celui-ci en fonction de la géologie de la berge (Tableau 1). L'indice des forces de cisaillement en périphérie des berges fut produit à partir de données de vitesses d'écoulement acquises *via* des lignes transversales dans les cours d'eau à l'étude. Celui-ci consiste globalement en un rapport (quotient) entre les forces de cisaillement en berge et les forces de cisaillement moyennes sur le lit. Un suivi d'érosion des berges effectué sur une courte période permit ensuite de valider cet indice en corrélant le recul obtenu à la valeur de l'indice. L'indice en question fut ensuite mis en relation avec l'index de sensibilité des berges à l'érosion *via* une étape de calibration pour ainsi obtenir des taux de recul futurs.

2.5. Sommaire

Cette sous-section vise à faire une synthèse de la littérature en lien avec la démarche préconisée dans cette recherche. Les quatre thèmes développés dans la revue de littérature sont repris individuellement.

L'aléa « érosion des berges »

Le phénomène de l'érosion découlerait d'une combinaison de processus plutôt que d'une cause unique. La morphologie et la granulométrie des chenaux tendraient naturellement à être en équilibre avec les forces d'écoulement. Le paramètre le plus enclin à faire basculer cet équilibre s'avère être l'augmentation des forces d'écoulement en réponse à des événements de crue. Ces forces d'écoulement se feraient particulièrement sentir dans les zones concaves où les courants hélicoïdaux s'ajoutent aux vitesses principales de l'écoulement pour augmenter la capacité d'érosion. L'action récurrente des événements hydrologiques bisannuels et les crues de forte magnitude seraient en somme à l'origine de la plupart des modifications au niveau des chenaux.

Le suivi de l'érosion des berges

Tel que mentionné précédemment, il existe divers types de lignes de berge de même que plusieurs techniques permettant de suivre leur déplacement. Toutefois, dans un contexte de suivi historique, la cartographie à partir de photographies aériennes s'est avérée être la seule véritablement applicable. La photogrammétrie numérique favorisant l'obtention d'un environnement cartographique en trois dimensions et la production de traits de berge en format numérique semble offrir la meilleure précision. Cette technique permettrait notamment de contrôler deux des trois principales sources d'erreur intervenant lors du suivi multi-dates de lignes de berge, soit la technique de numérisation employée et la qualité du géopositionnement des images. La troisième, à savoir les critères d'identification du trait de berge, devra donc faire l'objet d'une attention particulière lors de l'exercice de cartographie.

L'élaboration d'un MNT

Les données topographiques de type LiDAR, acquises en mode aéroporté, sont relativement répandues et offrent une information d'une grande précision couvrant de vastes territoires. En ce sens, ce type de données s'avère une information de qualité pour l'élaboration d'un MNT précis. Les données LiDAR semblent toutefois présenter certaines particularités au niveau de la surface de l'eau, dont notamment des phénomènes de pénétration/réflexion du signal dans la colonne d'eau de même que des discontinuités spatiales dans les relevés. Dans l'optique où il est projeté d'utiliser les points réfléchis par

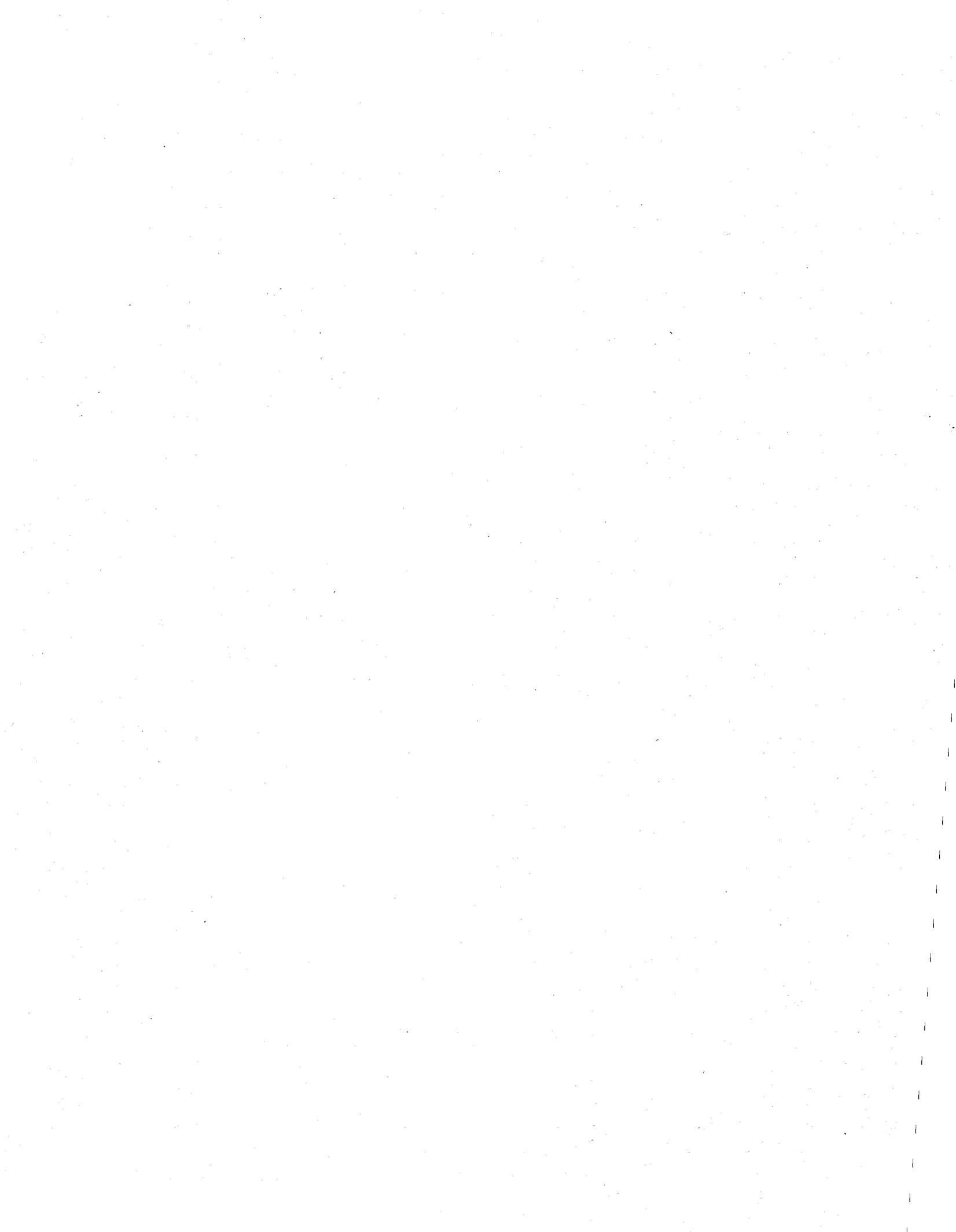
la surface de l'eau dans le cadre de cette recherche, ces phénomènes devront être examinés de plus près afin de s'assurer de la qualité des données. Au niveau de la création du MNT lui-même, les interpolateurs de type linéaire, en l'occurrence l'inverse de la distance et le krigeage, semble offrir les meilleurs résultats pour l'interpolation de données LiDAR. Néanmoins, ces derniers interpolateurs, de même que d'autres moins courants (plus proche voisin, TIN et spline) seront comparés entre-eux, afin de déterminer ceux permettant d'exploiter au mieux les données sources.

Retour sur les types de modèles rencontrés

On a vu qu'il existe une grande diversité de modèles dédiés à l'érosion. Cette variété s'illustre notamment par la structure, le niveau de complexité et la finalité de ces modèles. Ces distinctions s'observent aussi au niveau des quatre études résumées au sein de la catégorie « modèles hydro-géomorphologiques ». Toutefois, malgré cette diversité, aucune de ces approches ne s'avère intégralement applicable dans le cadre de la présente recherche. L'implantation de celles-ci s'avère limitée soit par leur structure particulière (Saint-Laurent et Schneider, 2004; Simons et Downs, 1995), soit par la nature et la disponibilité des données nécessaires à leur réalisation (Rosgen et Silvey, 1996; Winterbottom et Gilvear, 2000).

En effet, l'approche proposée par Saint-Laurent et Schneider (2004) s'avère limitée par l'étape de la critériologie « intra-critère » et « inter-critères », laquelle, bien qu'en bonne partie inspirée de l'étude de Clouâtre *et al.* (1996), présente une certaine subjectivité. De son côté, l'approche suggérée par Simons et Downs (1995) présente une lacune du fait qu'elle prend en compte uniquement les zones ciblées en fonction de la vulnérabilité, alors que l'objectif de la recherche menée ici consiste à établir la sensibilité des berges de façon continue. Par ailleurs, le modèle développé par Rosgen et Silvey (1996) nécessite des données de vitesse d'écoulement, lesquelles exigent une campagne de terrain extensive difficilement réalisable sur un tronçon de rivière aussi vaste que celui ciblé sur la rivière Montmorency. En somme, le modèle mis sur pied par Winterbottom et Gilvear (2000), implique divers jeux de données d'érosion couplées à des événements de crue, lesquels s'avèrent difficiles à obtenir et laborieux à produire.

Au sommaire, bien que présentant une certaine subjectivité, l'approche de modélisation de Saint-Laurent et Schneider (2004) s'avère malgré tout intéressante par sa critériologie à deux niveaux. Cette structure constitue en ce sens une bonne assise à un modèle multi-critères dont la structure pourra être bonifiée à l'aide de méthodes quantitatives au niveau de la critériologie et en y incorporant une étape de validation.



3. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE ET DONNÉES

Le terme « méthodologie générale » est employé afin de distinguer la démarche méthodologique à la base de ce mémoire des diverses méthodes testées et élaborées en réponse aux objectifs spécifiques (section 1.2). Cette section vise donc à illustrer la démarche générale retenue et suivie au cours de cette recherche, de même qu'à décrire les données et le matériel employés pour sa réalisation.

3.1. Démarche suivie

Au niveau de la structure, la démarche s'articule en trois principales étapes, soit la pré-production, la modélisation et les résultats (Figure 7). Les trois premiers objectifs spécifiques, mentionnés à la section 1.2, se regroupent au sein de l'étape de pré-production (section 0), alors que les deux derniers constituent des étapes distinctes (sections 5 et 1). De par cette structure, l'étape de pré-production s'avère une condition préalable à l'étape de modélisation et cette dernière est évidemment essentielle à l'étape d'obtention des résultats. Ces étapes sont ici sommairement expliquées et seront reprises sous la forme de chapitres distincts au cours de ce mémoire.

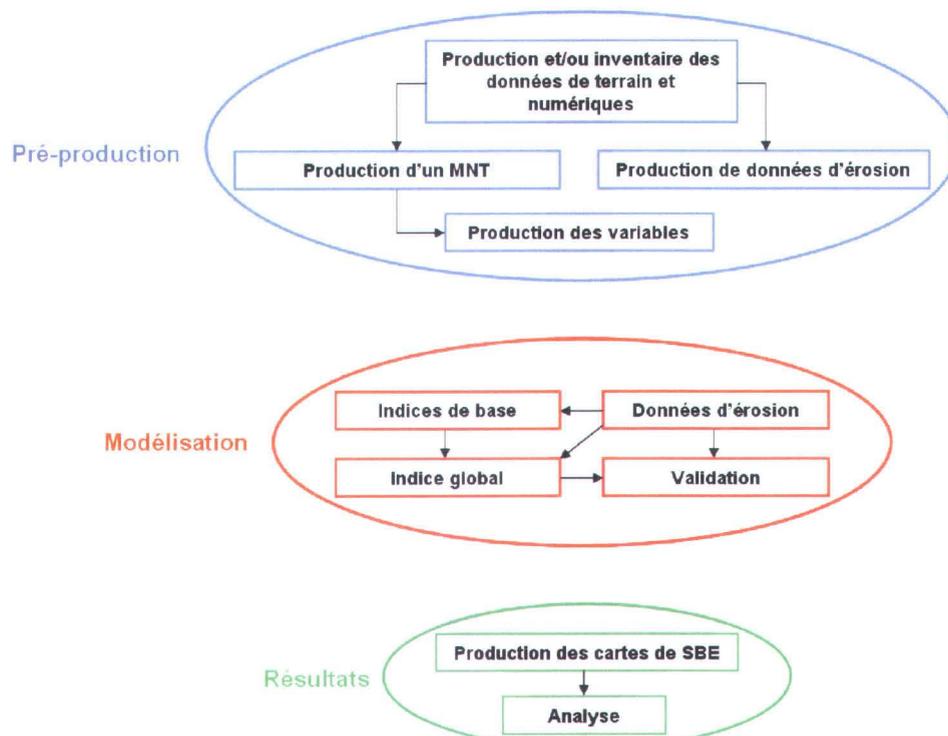


Figure 7 : Schéma de la démarche suivie dans la présente recherche. *SBE* = Sensibilité des berges à l'érosion.

3.1.1. Pré-production

De par le fait que cette étape regroupe trois objectifs spécifiques et qu'elle constitue l'assise du modèle subséquemment produit, elle constitue le cœur de ce mémoire. Les objectifs spécifiques y sont déclinés sous la forme de sections à l'intérieur desquelles plusieurs méthodes sont expérimentées ou développées. Celles-ci comportent notamment un important volet géomatique où les méthodes de production, les outils informatiques et les sources de données y sont analysés. Le fruit de cette étape consiste en une base de données contenant des données d'érosion (présence/absence et taux de recul) et des informations relatives à chaque variable descriptive produite. Les enregistrements de la base de données correspondent à une série d'unités spatiales formant de petits polygones vectoriels établis à partir des lignes de berges sélectionnées pour la modélisation. L'emplacement et le mode de production de ces unités seront précisés aux sections 4.1.2.2 et 4.3.2 respectivement. La base de données ainsi produite fut exportée vers le tableur Microsoft Excel 2003®, à l'intérieur duquel l'étape de modélisation fut réalisée.

3.1.2. Modélisation

Tel que mentionné à la section 2.5, la structure du modèle est en partie inspirée de l'étude de Saint-Laurent et Schneider (2004). Les modifications qui y furent incorporés découlent quant à elles d'une logique mathématique en provenance de la modélisation des habitats écologiques (Bovee, 1978; Leclerc *et al.*, 1995; Morhardt, 1986; Wintle *et al.*, 2005). Ainsi, la méthode préconisée comporte deux étapes centrales, la critériologie et la validation. L'étape de la critériologie consiste à élaborer des indices de base décrivant la sensibilité à l'érosion de chacune des variables et ensuite à agréger ceux-ci au sein d'un indice global en leur attribuant un poids respectif. L'étape de la validation consiste à évaluer l'efficacité du modèle à identifier les sites les plus sensibles à l'érosion. Ces étapes impliquent l'utilisation de trois types de données d'érosion : un premier jeu, décrivant la présence/absence d'érosion, est employé pour la structuration des indices de base, un second, traitant de la magnitude de l'érosion (taux de recul en m/an), est utilisé pour l'établissement des poids respectifs au sein de l'indice de base et un troisième, localisant la présence et la hauteur de l'érosion actuelle (*i.e.* en 2009), est mis à profit à l'étape de validation. À noter que les deux premiers jeux découlent du suivi de l'érosion

des berges présenté à la section 4.1, alors que le dernier fut acquis indépendamment lors d'une campagne de terrain menée à l'automne 2009 (sections 3.2.1.4 et 5.3.2).

3.1.3. Résultats : représentation et analyse

Comme le rendement du modèle aura alors déjà été vérifié *via* l'étape de validation (section 5.3), cette section consiste à visualiser et à analyser les résultats de sensibilité des berges à l'érosion obtenus sur la rivière Montmorency suite à l'application de la démarche développée. À cette occasion, la présence de vulnérabilité sera prise en compte dans l'analyse.

3.2. Données et outils informatiques

Divers types de données et d'outils informatiques furent nécessaires à l'exécution de cette recherche. Ces divers éléments sont résumés ici et seront présentés plus en détails dans les sections où ils ont été mis à contribution.

3.2.1. Données

Les données employées se regroupent en quatre catégories : hydrologiques et bathymétriques, aéroportées, cartographiques et de terrain.

3.2.1.1. Données hydrologiques et bathymétriques

Les données hydrologiques consistent en des données de débits journaliers, horaires et instantanés provenant de la station Montmorency (051001) opérée par le Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ). Ces données couvrent une période s'étendant de 1924 à 1939 et de 1965 à nos jours. Pour une raison inconnue, aucune donnée n'est disponible entre 1940 et 1964 à cette station hydrométrique.

Les données bathymétriques, quant à elles, furent produites par la firme d'arpentage Pagé et Leclair Géolocation, lors de campagnes de terrain antérieures à cette recherche, en 2003 et 2005. Ces relevés couvrent deux secteurs distincts, soit le secteur des Îlets entre les bornes 0,5 et 1,5 pour l'année 2003 et le secteur du lac du Délaiqué, situé à 3 km en aval de la limite sud du site d'étude, pour l'année 2005. Ces jeux de données consistent en une série de points fournissant l'altitude du lit et de la surface de l'eau.

3.2.1.2. Données topographiques et photographiques

Au niveau des images aériennes, vingt-cinq couvertures de photographies et d'orthophotos, couvrant le site d'étude en totalité ou en partie, furent inventoriées (section 4.1.1.2.1 et annexe 1). Parmi celles-ci, sept furent mises à profit dans le cadre de ce projet (sections 4.1 et 4.2.3.2.1).

En ce qui a trait aux données topographiques, le type employé dans ce projet consiste en un jeu de données LiDAR. Une description exhaustive de ces données est formulée à la section 4.2.1.

3.2.1.3. Données cartographiques décrivant le milieu terrestre

Trois cartes furent mises à profit dans cette recherche. La première consiste en une carte topographique à l'échelle du 1 :20000 (feuillet 21L14-202), élaborée par l'organisation gouvernementale Base de Données Topographique du Québec (BDTQ), relevant du Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (MRNF). La seconde correspond à une carte des dépôts meubles de la région de Québec au 1 :50000 (feuillet 21L14), produite en 2003 par la Commission Géologique du Canada (Bolduc *et al.*, 2003). Enfin, la troisième consiste en une carte écoforestière à l'échelle du 1 :20000 (feuillet 21L14-NE), produite en 1994 par le MRNF.

3.2.1.4. Données acquises sur le terrain

Les données de terrain furent acquises lors de deux campagnes de caractérisation menées à l'automne (période sans feuillage) 2008 et 2009. Ces campagnes visaient à relever les sections immunisées (enrochements, muret, gabions, etc.) ou constituées de roche en place (2008), de même qu'à cartographier la portion verticale des berges sujettes à l'érosion (hauteur d'érosion) (2009) (section 5.3.1). Ces données furent acquises sur le terrain, du fait que les images aériennes disponibles ne constituaient pas une source de données suffisamment fiable pour un positionnement précis. Les différents types d'immunisations relevés sont précisés à la section 4.3.3.5.1, alors que les critères de cartographie des berges formées de roche en place sont présentés à la section 4.3.3.4.3. En outre, les critères de cartographie des portions verticales des berges affectées par l'érosion (hauteur d'érosion) sont mentionnés à la section 5.3.2. Ces dernières données visaient notamment à obtenir un portrait des zones en érosion en 2009, à intégrer les

sections en érosion n'ayant pas été détectées en raison du seuil de détection de la méthode du suivi des traits de berge (+/- 3 ou 4 mètres, en fonction des jeux d'images, section 4.1.3.2.4) et à fournir des données pour la validation du modèle.

Ces diverses données furent acquises à l'aide d'un GPS Garmin, modèle Colorado 300 affichant une précision planimétrique de l'ordre de 3 mètres, en positionnant les extrémités des objets cartographiés à l'aide de points de marquage (*waypoints*). Ces points furent ensuite importés dans ArcInfo 9.2®. La position de ces points fut au besoin corrigée à l'aide d'orthophotos haute résolution datant de 2007. Les paires de points marquant les tronçons cartographiés furent par la suite reliées pour donner une polyligne portant l'information relevée.

3.2.2. Outils informatiques

Les différentes étapes mentionnées à la section 3.1 nécessitèrent l'emploi de divers outils informatiques. La pré-production (section 0) impliqua le plus grand nombre de logiciels dont notamment: ArcInfo 9.2®, ISATIS 8.02®, DVP 7.0® et à l'occasion Matlab 7.1® et Microsoft Excel 2003®. La modélisation (section 5), quant à elle, fut effectuée essentiellement à l'intérieur de Microsoft Excel 2003® et ultimement dans ArcInfo 9.2, lors de l'étape de validation. Finalement, pour l'étape des résultats (section 1), la production des cartes fut réalisée dans ArcInfo 9.2® et leur mise en forme finale fut effectuée dans Adobe Photoshop CS2®. À noter que le logiciel ArcInfo 9.2® occupe une place très importante dans cette recherche. Son potentiel en tant que système d'information géographique (SIG), à savoir ses commodités au niveau de la saisie, du stockage, de l'analyse et de la représentation de données spatiales multi-sources (Longley *et al.*, 2005; Maguire *et al.*, 2005; Dai *et al.*, 2001), en fit un outil essentiel à la réalisation de ce type de projet.

4. PRÉ-PRODUCTION

Ce chapitre porte sur la production de données d'érosion (présence/absence et taux de recul) et l'élaboration des variables, soit des composantes essentielles à l'étape subséquente de la modélisation. La démarche suivie pour la production des données d'érosion s'articule à la section 4.1, alors que l'élaboration des variables comporte deux sections, l'une portant sur les méthodes de création d'un MNT optimal (section 1.1) et l'autre traitant des techniques d'élaboration des variables elles-mêmes (section 1.1). Ces diverses sections comportent notamment un important volet expérimental, lequel visait à produire une information de grande précision en fonction des données sources employées.

4.1. Méthodologie pour le suivi de l'érosion des berges

Le suivi de l'érosion des berges a pour objectif de localiser et de quantifier les phénomènes d'érosion sur le site d'étude. Les résultats issus de cette cartographie vont permettre l'établissement de deux types de données qui s'avèrent indispensables à l'élaboration d'un modèle de sensibilité des berges à l'érosion (MSBE), soit la présence/absence d'érosion et les taux de recul (m/an). La technique préconisée consiste en une cartographie diachronique des traits de berge effectuée manuellement à partir de photographies aériennes. Afin d'assurer des résultats optimaux, un effort fut notamment consacré à l'identification des critères de cartographie constants permettant un positionnement précis des traits de berge sur les diverses images sélectionnées. En outre, les lignes de berge positionnées se devaient de circonscrire la partie active du chenal. Une fois les traits de berge anciens et récents positionnés, la technique employée pour le calcul des taux de recul sera présentée de même que les zones les plus dynamiques au niveau du recul des berges.

4.1.1. Expérimentation de méthodes d'extraction de traits de berge

Ces expérimentations visent à tester l'applicabilité des divers types de traits de berge extraits à partir de photographies aériennes. Cette section traite donc davantage des critères de cartographie des traits de berge que des méthodes d'extraction proprement dites. En ce sens, les types de traits de berge testés de même que les sites d'essais sont d'abord présentés. Suivent les étapes de sélection des images et d'élaboration des

plateformes de cartographie servant d'assise aux expérimentations et à la cartographie finale. L'applicabilité des différents types de traits de berge est ensuite abordée dans la section Résultats. Finalement, une méthode synthétique de cartographie est élaborée et appliquée sur l'ensemble du site.

4.1.1.1. Types de traits de berge testés et sites d'expérimentation

Les types de traits de berge testés, appelés ici limites, sont essentiellement inspirés de la section 2.2.1. Ainsi, on y retrouve la limite eau/terre, la limite de la végétation permanente, le haut de berge et un ajout, non mentionné dans la littérature parcourue, le pied de berge. La limite eau/terre est applicable simplement en numérisant la surface de l'eau apparaissant sur les images sélectionnées. La limite de la végétation permanente correspond au critère végétal marquant la limite du chenal actif d'Osterkamp et Hedman (1977), soit la portion dynamique du chenal exempte de végétation en raison d'un écoulement récurrent (ou de l'action de la glace) empêchant sa colonisation. Devant le peu d'information décrivant le type de végétation en question, il fut établi que toute végétation basse non ligneuse serait considérée comme appartenant au chenal actif. Finalement, les limites du haut de berge et du pied de berge sont identifiables par des discontinuités topographiques situées de part et d'autre de la portion généralement inclinée formant la berge (Figure 8).

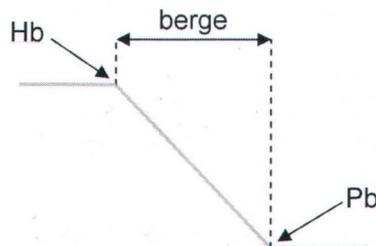


Figure 8: Représentation simplifiée d'une berge. *Hb* : limite du haut de berge, *Pb* : limite du pied de berge.

Les quatre sites d'expérimentation furent sélectionnés de façon à représenter la diversité des conditions géomorphologiques et anthropiques présentes sur les berges du tronçon à l'étude (Figure 9). À noter que par souci de précision, le pas des bornes kilométriques originalement basé sur 500 m fut densifié à 250 m.

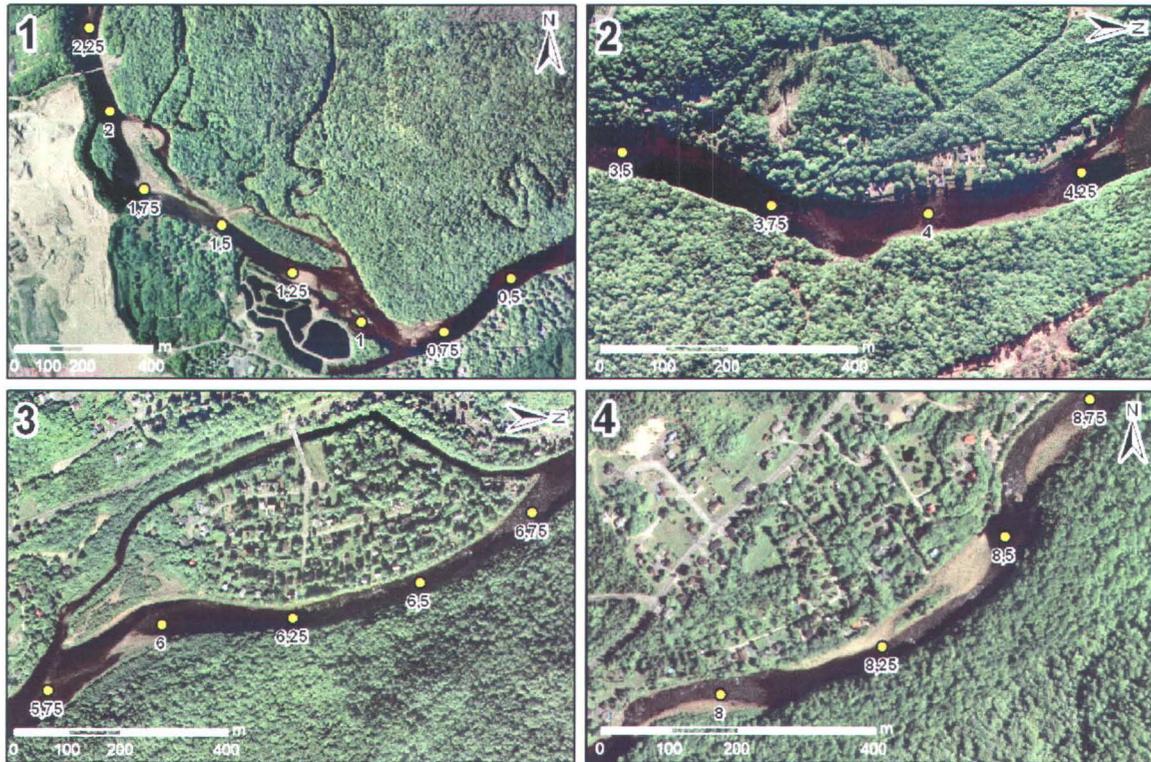


Figure 9 : Localisation des sites d'expérimentation. Source : Orthophotos 2007 Ville de Québec.

Le site 1 d'une longueur de 1,75 km (Figure 9, no. 1), comprend des immunisations (enrochements et murets) et une infrastructure (prise d'eau) en berge ouest entre les bornes 0,5 et 1,75, des talus escarpés d'une hauteur 40 m en berge ouest entre les bornes 1,75 et 2,25 ainsi que plusieurs îles et bancs alluviaux. Ces derniers, décrits brièvement à la section 3.3, correspondent à des amas de dépôts longeant les convexités du cours d'eau ou émergeant au sein du chenal. Ceux-ci se distinguent notamment des îles par le fait qu'ils ne sont pas colonisés par de la végétation permanente (ligneuse) (Bridge, 2003; Schumm, 1981). En outre, ce secteur particulièrement sujet à l'érosion, selon Leclerc *et al.* (1998) et nos observations de terrain, comporte des berges au profil subvertical localisées en rive est. Pour ce site, les deux berges furent numérisées.

Le site 2 d'une longueur de 750 m (Figure 9, no. 2), compris entre les bornes 3,5 et 4,25, fut sélectionné en raison de la présence d'enrochements en berge ouest et aussi pour le niveau de déboisement de cette dernière. Seule la berge ouest fut relevée pour l'expérimentation.

Le site 3 couvre le secteur de l'Île-Enchanteresse (Figure 9, no. 3) caractérisé par des berges escarpées sur le pourtour de l'île ainsi que par la présence de hauts talus dans la partie nord de la berge ouest du chenal ouest. Aussi, le secteur est très habité et est largement déboisé. Tout le périmètre de l'île de même que la berge ouest du chenal ouest furent intégrés dans l'expérimentation.

Finalement, le site 4 (Figure 9, no. 4), d'une longueur de 750 m, fut sélectionné en raison de l'existence d'un important banc alluvial en berge ouest entre les bornes 8 et 8,5, et en raison aussi de la présence de berges subverticales entre les repères 8,5 et 8,75. Seule la berge ouest fut relevée dans ce secteur.

4.1.1.2. Sélection des couvertures d'images

La sélection des images comporta quatre étapes successives dont la dernière permit la formation des couples temporels (diachroniques) pour la cartographie des traits de berges. Les trois phases précédant cette dernière consistèrent en un inventaire des images disponibles, à l'établissement de critères de sélection et à l'évaluation des débits relatifs à ces images.

4.1.1.2.1. Inventaire des images disponibles

Un inventaire fut d'abord effectué auprès des détenteurs de photographies aériennes et d'orthophotos, dont notamment la Géomathèque (propriété du Groupe Alta), la Photothèque nationale de l'air (Ottawa), la cartotheque de l'Université Laval, la Ville de Québec (VQ) et la Communauté Métropolitaine de Québec (CMQ). Le fruit de cet inventaire est présenté à l'annexe 1. Les images satellitaires furent peu investiguées en raison de leur coût d'acquisition et de leur résolution insuffisante par rapport à l'échelle de travail. De plus, ces images n'auraient pas permis d'effectuer de la cartographie en stéréoscopie.

4.1.1.2.2. Critères de sélection des images

Une fois les images répertoriées, une sélection visant à obtenir une vue complète du site d'étude à deux moments, passé et actuel, et à la meilleure qualité disponible fut effectuée. Le choix des couvertures fut basé sur l'échelle, l'étendue, le chevauchement entre les années et l'émulsion des photos (en couleur de préférence). D'après Gilvear et Bryant

(2003), la cartographie d'une rivière d'une largeur variant de 20 à 200 m devrait être effectuée à partir d'images à une échelle au 1 :10000 ou plus grande.

En parallèle à ces critères spatiaux, les images devaient correspondre à certaines exigences relatives aux conditions environnementales au moment de l'acquisition, notamment, de ne pas présenter de glace en berge, idéalement avoir été acquises hors de la période de feuillaison, et présenter des niveaux d'eau normaux (pas en crue).

Cinq couvertures purent alors être sélectionnées, dont trois récentes (2002, 2003 et 2007) et deux anciennes (1963 et 1965) (Tableau 2). À noter qu'en fonction des couvertures disponibles, les critères de sélection établis ne purent pas tous être respectés, de sorte que deux jeux de photos présentent une échelle inférieure à celle recommandée par Gilvear et Bryant (2003) et que trois couvertures sur cinq affichent une végétation en période de feuillaison (1965, 2002 et 2007).

Tableau 2 : Caractéristiques des couvertures sélectionnées

Année	Feuillaison	Type	Échelle	Émulsion	Résolution (cm)	Couverture*
2007	avec feuilles	orthophotos	NA	couleur	10	complète
2003	sans feuilles	orthophotos et orientations 3d	1:8000	couleur	20	incomplète
2002	avec feuilles	photographies papier	1:15000	panchromatique	NA	complète
1965	avec feuilles	photographies papier	1:15840	panchromatique	NA	complète
1963	sans feuilles	photographies papier	1:9600	panchromatique	NA	incomplète

* Précise que la couverture couvre complètement ou non la zone à l'étude.

4.1.1.2.3. Évaluation des débits associés aux images

Les débits associés aux différentes orthophotos furent obtenus en mettant en lien les registres de débit du CEHQ (station 051001) avec la date et l'heure des photographies aériennes sélectionnées. À noter que l'heure n'étant que rarement disponible, celle-ci fut estimée à partir de l'orientation des ombres sur les photos aériennes.

La station hydrologique ayant été fermée entre 1940 et 1964, pour une raison inconnue, le débit de la couverture de 1963 n'était donc pas disponible. Celui-ci fut alors estimé en comparant visuellement les niveaux d'eau présents sur des couvertures de photographies présentant des hauteurs d'eau similaires et pour lesquelles les valeurs de débits étaient disponibles. Ces comparaisons furent effectuées dans des secteurs présentant des berges faiblement inclinées où les différences de débits sont plus facilement discriminées. Ces sites devaient aussi présenter une morphologie stable dans le temps ou alors être comparés à un intervalle temporel rapproché. Ainsi, deux photographies furent mises à

profit, l'une de 1965 couvrant le secteur des îlets (Figure 10 a et b) et l'autre de 1993 englobant le secteur du lac du Délaissé, situé à 2 km en aval de la limite sud du site d'étude (Figure 10 c et d).

La comparaison des images de 1963 et 1965 dans le secteur des îlets permit d'abord d'identifier un niveau d'eau légèrement supérieur sur l'image de 1963 (Figure 10 a et b). Le débit de 1963 apparaissait donc comme étant supérieur à celui de 1965, fixé à $54 \text{ m}^3/\text{s}$, d'après les données hydrologiques. Ensuite, la comparaison des photos de 1963 et de 1993 dans le secteur nord du lac du Délaissé, un site en marge du chenal principal et donc peu sujet à des modifications morphologiques, permit d'observer des niveaux d'eau fort similaires (Figures 10 c et d). Malgré de légères différences entre les étendues d'eau dans la portion est du site, possiblement associées à une végétation aquatique plus dense en 1993, le débit de 1993, chiffré à $98 \text{ m}^3/\text{s}$, semblait correspondre assez bien au débit de l'année 1963. En somme, le débit de 1963 fut estimé à environ $100 \text{ m}^3/\text{s}$.

Ces efforts au niveau de l'évaluation du débit pour cette couverture furent investis notamment en raison de sa grande qualité par rapport aux images de 1965. En effet, les images de 1963 présentaient une échelle significativement plus grande que celle de l'année concurrente, soit 1 :9600 (1963) vs 1 :15840 (1965), une végétation dépourvue de feuilles et une heure d'acquisition garantissant une quasi absence d'ombre en berge. Les débits relatifs aux couvertures sélectionnées de même que leur paramètre de calcul sont présentés au Tableau 3.

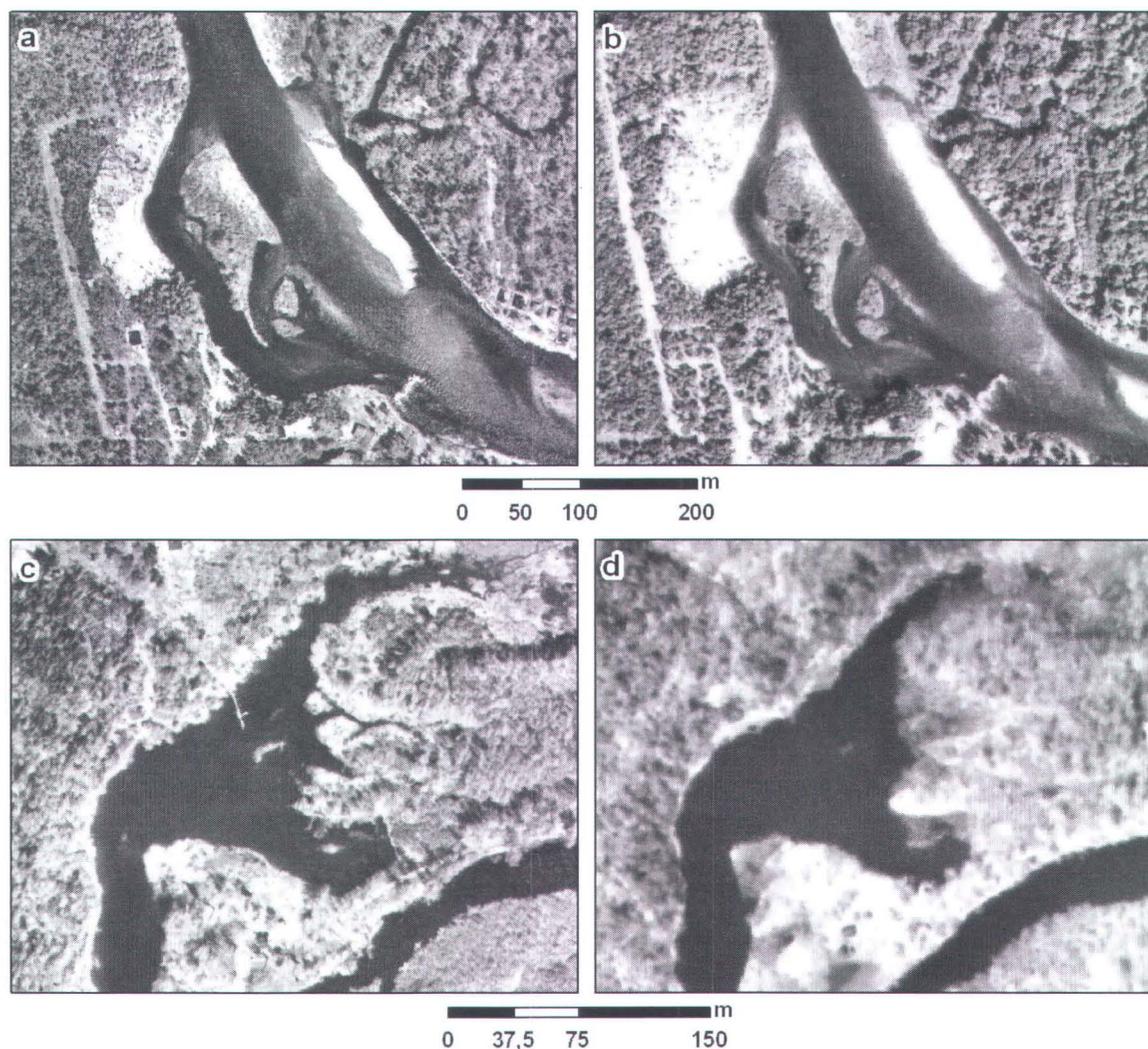


Figure 10 : Sites et couvertures servant à l'estimation du débit de la couverture de 1963. (a) et (b) secteur des Îlets respectivement en 1963 et 1965, (c) et (d) secteur nord-ouest du lac du Délaissé respectivement en 1963 et 1993. Sources : (a) Q63307-202 (1: 9600), (b) Q65347-165 (1: 15840) (c) Q63300-179 (1: 9600) et (d) HMQ-93111-127 (1:15000), Géomatèque (Groupe Alta).

Tableau 3 : Débits associés aux différentes couvertures sélectionnées et paramètres d'évaluation de ces débits.

Année	Date	Heure (locale)		Débit (m ³ /s)	
		Heure	Origine	Q	Origine
2007	13-14-juin-07	7h15 à 16h00	Métadonnées	20	Moyenne débits inst. sur 4 h
2003	11-mai-03	8h00 à 12h00	Estimée	94	Moyenne débits inst. sur 4 h
2002	24-juil-02	15h00	Estimée	33	Moyenne débits inst. sur 4 h
1965	01-sept-65	10h00	Estimée	54	Débit journalier
1963	26-mai-63	11h00 à 13h00	Estimée	≈100	Estimé

4.1.1.2.4. Formation des couples temporels

Les couples anciens et récents furent formés en fonction de leur chevauchement spatial et de leur concordance au niveau des débits. Le Tableau 4 présente les couples créés, la zone couverte par ceux-ci de même que l'écart de débit entre les années impliquées. Les implications des écarts entre les débits seront abordées à la section 4.1.1.4.1. Ainsi 76% du site d'étude est couvert par le couple 1963-2003, 11% par le couple 1965-2003 et 13% par les couples 1965-2002 et 1965-2007. La raison pour laquelle ces derniers couples couvrent le même secteur sera abordée à la section 4.1.2.2.

Tableau 4 : Couples temporels des photographies aériennes utilisées pour la cartographie du trait de berge.

Couple	Localisation*	ΔQ (m ³ /s)
1963-2003	0 à 7	≈ 6
1965-2003	7 à 8	40
1965-2002	8 à 9,25	21
1965-2007	8 à 9,25	34

* Repère par rapport aux bornes kilométriques de chaînage

4.1.1.3. *Établissement de la plateforme de cartographie et quantification de la précision planimétrique du géopositionnement.*

La plateforme de cartographie fut élaboré dans un logiciel de photogrammétrie numérique, soit DVP 7.0 ®. Cet outil permet à la fois la production d'orthophotos et la numérisation d'objets en stéréoscopie (3D) à l'écran. Ce dernier aspect s'est avéré d'une grande utilité dans la reconnaissance des limites du haut de berge et du bas de berge de même que pour la distinction de la hauteur de végétation associée à la limite de la végétation permanente.

4.1.1.3.1. Étapes d'élaboration de la plateforme de photogrammétrie numérique

Les images sélectionnées furent d'abord numérisées La résolution des images, fut établie à 20 cm, soit en fonction de la taille des pixels de la couverture de 2003, dont les modèles stéréoscopiques furent gracieusement offerts par la Ville de Québec. Ainsi les photographies aériennes de 1963, 1965 et 2002 furent respectivement numérisées à une résolution de 1220, 2010 et 1905 PPP (points par pouce), alors que pour 2003 la numérisation avait été effectuée à 1015 PPP.

Une fois la numérisation complétée, l'importation des couples stéréoscopiques dans le logiciel de photogrammétrie numérique put alors être effectuée. Celle-ci comporte trois étapes : l'orientation intérieure, relative et absolue (Agouris *et al.*, 2004; Dixon *et al.*, 1998)⁵. Celles-ci sont brièvement résumées ci-après.

Orientation intérieure :

Cette première étape vise à restaurer les caractéristiques géométriques des photographies à l'intérieur du logiciel en positionnant les quatre coins (marques fiduciaires) des deux images formant le couple, en spécifiant le nombre de pixels séparant ces marques et en spécifiant la distance focale de la lentille de la caméra employée (Agouris *et al.*, 2004; Dixon *et al.*, 1998).

Orientation relative

Cette seconde étape consiste à reconstituer l'environnement stéréoscopique en positionnant un minimum de 6 points communs aux deux images (points de Von Gruber), dans la zone où les images se chevauchent (Agouris *et al.* 2003). Une attention particulière doit être accordée à l'alignement dans l'axe Y afin d'obtenir une vision stéréoscopique optimale (Dixon *et al.*, 1998).

Orientation absolue

Cette dernière étape consiste à positionner spatialement en X , Y et Z les stéréo-modèles préalablement assemblés. Cette opération fut réalisée en utilisant des points d'ancrage stables dans le temps, facilement identifiables sur les différents jeux de photos et situés au niveau du sol (intersections, coins de stationnements résidentiels, trottoirs, etc.). Pour la portion du site comprise entre les bornes kilométrique 0 et 8, la couverture de 2003 fut utilisée comme couverture de référence pour l'extraction des coordonnées X et Y des points, alors que pour la portion située au nord (borne 8 et plus), c'est plutôt la couverture de 2007 qui fut utilisée. Ces deux couvertures d'orthophotos furent sélectionnées en raison de leur grande précision respective de 20 et 80 cm et de leur complémentarité. La coordonnée Z des points d'ancrage fut extraite à partir d'un MNT élaboré à l'aide des données LiDAR⁶. À noter que le faible niveau de développement anthropique des rives de

⁵ Pour plus d'information sur le sujet, consultez Agouris *et al.* (2004) et Dixon *et al.* (1998).

⁶ Le MNT utilisé est le MNT composite présenté à la section 4.2.5

la rivière Montmorency en 1963, notamment dans la partie centrale du site d'étude (bornes 2,25 à 5) ne permit l'identification que d'un faible nombre de points d'ancrage (Tableau 5). Néanmoins, comme nous le verrons ci-après, ce faible nombre n'eut qu'un léger impact sur la précision finale des stéréo-modèles. En somme, sept stéréo-modèles furent construits, soit quatre pour l'année 1963, un pour 1965 et deux pour 2002. À titre informatif, il convient de mentionner qu'une seconde routine, nommée l'aérottriangulation peut aussi être appliquée pour l'orientation des modèles. Celle-ci nécessite toutefois une mise en œuvre plus lourde et s'applique généralement à de grands territoires (plusieurs couples et plusieurs lignes de vol) (Agouris *et al.*, 2004), de sorte qu'il était inutile de recourir à celle-ci étant donné l'étendue du site d'étude et le faible nombre de modèles nécessaires pour couvrir celui-ci.

4.1.1.3.2. Quantification de la précision planimétrique

Le Tableau 5 présente deux types de données d'appréciation de la précision, l'erreur résiduelle et la précision planimétrique. La première donne une indication de la précision relative à l'intérieur des stéréo-modèles et ne représente donc pas la précision réelle du géopositionnement des images⁷. Cette dernière est donnée par les valeurs de précision planimétrique. À noter que les données de précision (erreurs résiduelles et précision planimétrique) portant sur la couverture de 2003 et présentées au Tableau 5 sont celles quantifiées par les producteurs de ces données (équipe d'arpentage de la Ville de Québec).

Afin de quantifier la précision planimétrique des stéréo-modèles, et par conséquent celle des objets numérisés à partir de ceux-ci, ces modèles furent exportés sous forme d'orthophotos. Ensuite, quatre points de contrôle représentant des objets stables dans le temps furent identifiés sur chaque image et sur une couverture de référence possédant une grande précision au niveau de son positionnement. Tout comme pour l'étape de l'orientation absolue, les couvertures de référence correspondent aux orthophotos de 2003 et de 2007, mais contrairement aux points d'ancrage, ces points de contrôle pouvaient provenir d'objets situés au-dessus du sol, ce qui permettait d'obtenir un plus grand nombre de points de validation. Ainsi, les points sélectionnés proviennent essentiellement

⁷ Pour plus de détails concernant la précision à l'intérieur des modèles produits, consulter l'annexe 2 où figurent les rapports d'orientation.

de coins ou d'arches de toitures et de cheminées d'habitations n'ayant pas connu de modification entre les années de référence. L'écart dans la position des points de référence fut quantifié manuellement dans ArcInfo 9.2 ®.

Les valeurs présentées au Tableau 5 correspondent à l'erreur moyenne quadratique (*Root Mean Square Error, RMSE*) calculée à partir des quatre points de contrôle de chaque orthophoto nouvellement produite. Il est possible de constater une précision légèrement inférieure pour les clichés Q63307-179-180 et Q63307-180-181 ayant été positionnés à l'aide de 3 points d'ancrage seulement, mais celle-ci demeure tout de même dans le même ordre de grandeur que les autres clichés produits. En somme, afin de tenir compte de toutes ces imprécisions de positionnement, la marge d'erreur des stéréo-modèles servant à la numérisation des limites de berge fut fixée à 3 mètres.

Tableau 5 : Précision des stéréo-modèles servant à la numérisation des lignes de berge.

Année	Stéréo-modèle	Erreur résiduelle (m)				Précision planimétrique (m)	
		X	Y	Z	n*	moyenne	σ
1963	Q63307-126-125	1,50	1,94	0,38	6	2,16	1,32
1963	Q63307-179-180	1,74	0,62	0,07	3	2,40	0,66
1963	Q63307-180-181	2,19	0,96	0,06	3	2,83	0,53
1963	Q63307-202-201	0,52	0,50	0,39	4	2,06	1,03
1965	Q65347-70-69	1,78	1,93	0,88	6	2,16	0,78
2002	Q02707-18-17	0,35	0,74	0,14	5	2,14	1,45
2002	Q02707-19-18	0,14	0,71	0,12	5	2,75	0,31
2003	2847, 2748, 2747, 2649, 2648, 2549, 2548, 2450, 2449, 2448, 2349, 2348, 2946	0,03	0,05	0,08	na	0,20	na

* Nombre de points d'ancrage utilisés pour l'étape l'orientation absolue
 σ : Écart type (m)

4.1.1.4. Résultats de l'expérimentation des méthodes d'extraction des traits de berge

Les expérimentations furent réalisées entièrement à l'intérieur du logiciel de DVP 7.0 ®. Pour les sites 1, 2 et 3 le couple temporel utilisé est 1963-2003 et présente un écart de débit préalablement estimé à 6 m³/s, alors que pour le site 4 le couple employé est 1965-2002 et présente une concordance de débit de 21 m³/s (Tableau 4).

4.1.1.4.1. Limite eau/terre

Cette limite présente l'avantage d'être facilement identifiable sur les photographies aériennes. Toutefois, comme ce fut anticipé, la limite eau/terre introduit un biais de positionnement lorsque les débits des images employées ne concordent pas (Chorley et

Dale, 1972; Gilvear et Bryant, 2003). Ces biais se feraient particulièrement sentir dans les zones où la rivière est faiblement encaissée, notamment dans les zones présentant des bancs alluviaux (sites 1 et 4). D'après les observations, plus la pente de la berge est faible, plus les différences de débit sont susceptibles de présenter des écarts horizontaux appréciables et *vice-versa* (Figure 11).

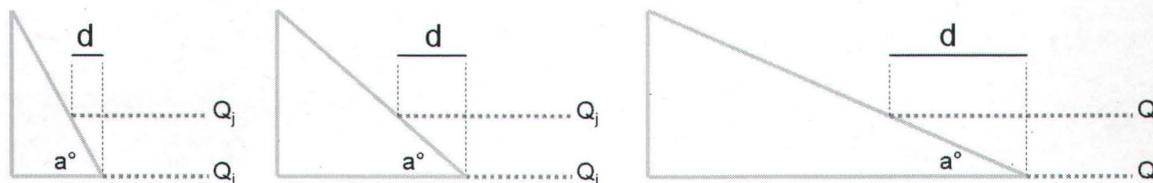


Figure 11 : Écart de positionnement du trait de berge (d) à des débits divergents (Q) en fonction de l'inclinaison de la berge (a).

Il fut aussi observé que la limite tracée par l'eau ne rend pas toujours compte de la portion dynamique du chenal. Ainsi, des bancs alluviaux exondés et non recouverts de végétation peuvent se voir exclus du chenal, alors que l'absence de végétation dans ces endroits indique qu'ils sont couramment empruntés par l'écoulement.

4.1.1.4.2. Limite de la végétation permanente

Cette délimitation a révélé plusieurs difficultés qui la rendent difficilement généralisable. La principale contrainte est relative à l'anthropisation du site cartographié, plus précisément au déboisement des berges pour des fins de développement domiciliaire ou infrastructurel. En effet, l'enlèvement complet de la frange forestière bordant le cours d'eau rend cette limite inapplicable en plusieurs lieux. La berge ouest à la Figure 12 illustre un cas typique de l'inapplicabilité de cette limite dans une zone anthropisée.

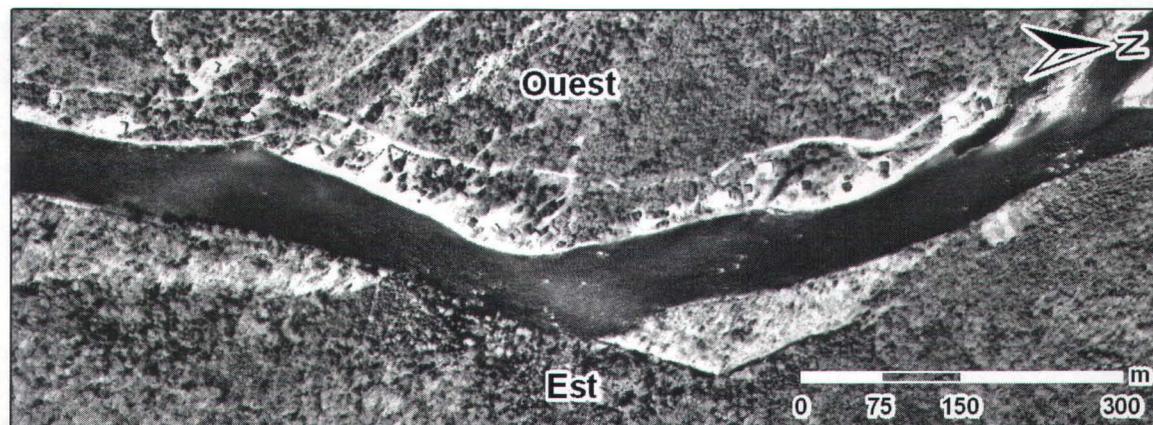


Figure 12 : Berge déboisée (rive ouest), dans le secteur de la rue Côte du Lac (bornes 3,5 à 4,25), en 1963. Source : Q63307-180 (1 : 9600), 1963, Géomathèque (Groupe Alta).

En outre, dans les zones où la frange végétale fut conservée, la distinction entre les types de végétation (ligneuse ou non ligneuse) s'est avérée difficile à effectuer et ce, pour deux principales raisons : 1) la petitesse des échelles des photographies aériennes à la base de certains stéréo-modèles (1965 et 2002) permettant difficilement de faire des distinctions au niveau de la hauteur des végétaux (site 4); 2) l'absence de feuilles sur les autres stéréo-modèles employés (1963-2003) (sites 1, 2 et 3).

4.1.1.4.3. Limite du haut de berge

L'application de cette limite fut grandement limitée par la difficulté de reconnaissance de l'objet cartographié, soit une discontinuité topographique nette marquant le haut de la berge. Cette limite s'est notamment avérée ardue à identifier, d'une part, en raison de l'emploi de stéréo-modèles possédant une résolution native insuffisante et, d'autre part, due à la présence de végétation dense. La résolution native renvoie essentiellement à l'échelle des photographies aériennes et donc à la taille du grain des images, laquelle permet, ou non, un potentiel de grossissement avec netteté à l'intérieur du logiciel de photogrammétrie numérique.

Ainsi, au niveau du couple temporel de 1963-2003 impliquant des images à des échelles respectives de 1: 9600 et 1: 8000, le niveau de grossissement atteint s'est avéré nettement suffisant pour la visualisation des discontinuités topographiques recherchées, à l'exception des zones présentant de hauts talus (sites 1 et 3). En effet, dans ces endroits, la grande résolution native de ces stéréo-modèles et l'absence de feuilles dans les végétaux ne permirent tout de même pas de visualiser le haut de la berge (Figure 13, no. 1), de sorte que la discontinuité située au sommet du versant fut faussement considérée comme le haut de berge (Figure 13, no. 2). En ce qui a trait des stéréo-modèles 1965 et 2002, les échelles respectives de 1:15840 et 1:15000 rendirent fastidieuse et moins précise l'identification de la limite recherchée. La couverture de 2002 dévoila notamment certaines déficiences amplifiant ces difficultés, dont un faible niveau de contraste (images surexposées) et à d'importantes zones ombragées associées à l'heure d'acquisition et à la présence de végétation sur le replat formant le haut de berge.

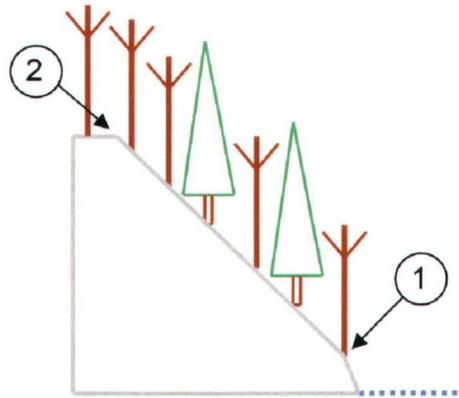


Figure 13 : Schématisation de la difficulté de détection du vrai haut de berge (1) et cartographie subséquente de la discontinuité située en haut de talus (2) comme étant erronément le haut de la berge. La ligne pointillée bleue représente le niveau de l'eau.

Enfin, au niveau de la couverture végétale, l'emploi d'images affichant une faible densité de végétation en raison de l'absence de feuilles (1963-2003) (sites 1, 2 et 3) facilita l'identification de cette limite, mais en contrepartie la présence de végétaux sempervirents s'est révélée être un problème incontournable.

Ainsi, les contraintes que représente la végétation combinée à la résolution native quelques fois insuffisante des modèles, en fonction de l'environnement topographique, concourent à exclure ce type de trait de berge.

4.1.1.4.4. Limite du pied de berge

Cette limite s'est avérée dans l'ensemble généralement facile à repérer et à numériser. Toutefois, comme elle prend place la plupart du temps au niveau du lit actif de la rivière, elle se retrouvait parfois submergée en fonction du débit présent lors de la prise d'image (Figure 14a). Il s'agit de la principale contrainte associée à l'application de cette limite. Aussi, dans une moindre mesure, dans les environnements à faible relief caractérisés par des bancs alluviaux, la détection de la discontinuité marquant le pied de berge s'est parfois avérée ardue, voire fortuite (Figure 14b). En outre, cette limite s'est quelques fois vue masquée partiellement par la végétation riveraine, mais d'après les observations issues des quatre sites testés, le pied de l'escarpement recherché est la plupart du temps exempt de végétation. En somme, tout comme pour le haut de berge, la qualité des stéréomodèles s'est avérée fondamentale dans la visualisation de la topographie pour le positionnement de cette limite. Ainsi, les mêmes limitations associées au couple temporel

1965-2002 rendirent difficile la reconnaissance du pied de berge au site 4, alors que pour les autres sites testés, la résolution native des stéréo-modèles de 1963 et 2003 s'est avérée suffisante.

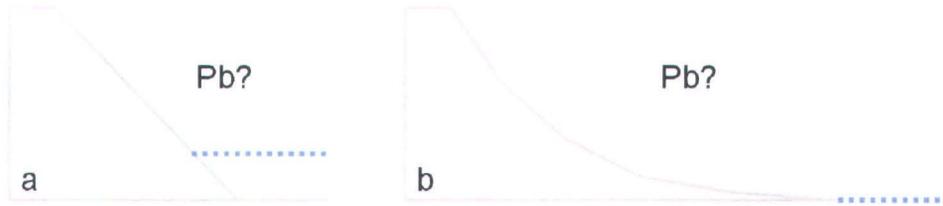


Figure 14 : Difficultés associées à l'identification du pied de berge. (Pb), (a) submersion du pied de berge, (b) absence de discontinuité topographique marquant le pied de berge. La ligne pointillée bleue représente le niveau de l'eau.

Sommaire

Ces expérimentations permettent de mettre en lumière qu'aucun des types de traits de berge testés n'est détectable en toutes circonstances. La limite eau-terre s'avère grandement conditionnée par les niveaux d'eau et peu représentative de la portion active du chenal; la limite de la végétation n'est pas applicable intégralement, notamment en raison du déboisement des berges; la limite du haut de berge ressort comme étant inapplicable en lien avec la présence de végétation dense en sommet de berge et pour des raisons de résolution et de netteté d'image; et, finalement, l'emploi de la limite du pied de berge est, elle aussi, essentiellement limitée par le niveau de l'eau.

4.1.2. Élaboration d'une méthode composite pour la délimitation de la ligne de berge

Les résultats préalablement présentés illustrent la difficulté de cartographier précisément un trait de berge en n'appliquant qu'une seule méthode. Il fut donc proposé de rassembler les critères de cartographie inhérents aux limites eau/terre, végétation permanente et pied de berge, dans le but de mettre sur pied une méthode composite pour la cartographie des traits de berge dont les composantes doivent satisfaire certains critères. Le corollaire de cette approche implique qu'il faut accepter que la position de la ligne de berge soit entachée d'une certaine incertitude, mais celle-ci tendra à être réduite par l'emploi de critères multiples.

4.1.2.1. Identification et hiérarchisation des critères

Les critères identifiés sont les suivants:

- 1) Présence d'une discontinuité topographique marquant le pied de berge;
- 2) Présence de bancs alluviaux;
- 3) Conformité des débits entre les années ancienne et récente;
- 4) Présence d'une démarcation marquant la végétation permanente.

La méthode composite élaborée prend la forme d'un arbre décisionnel dans lequel chaque critère marque une ou des conditions pour la cartographie d'un type de trait de berge donné (limite) (Figure 15). Le principe est tel que, lorsque la réponse au critère de cartographie est positive, le type de trait de berge s'y rapportant peut alors être cartographié manuellement.

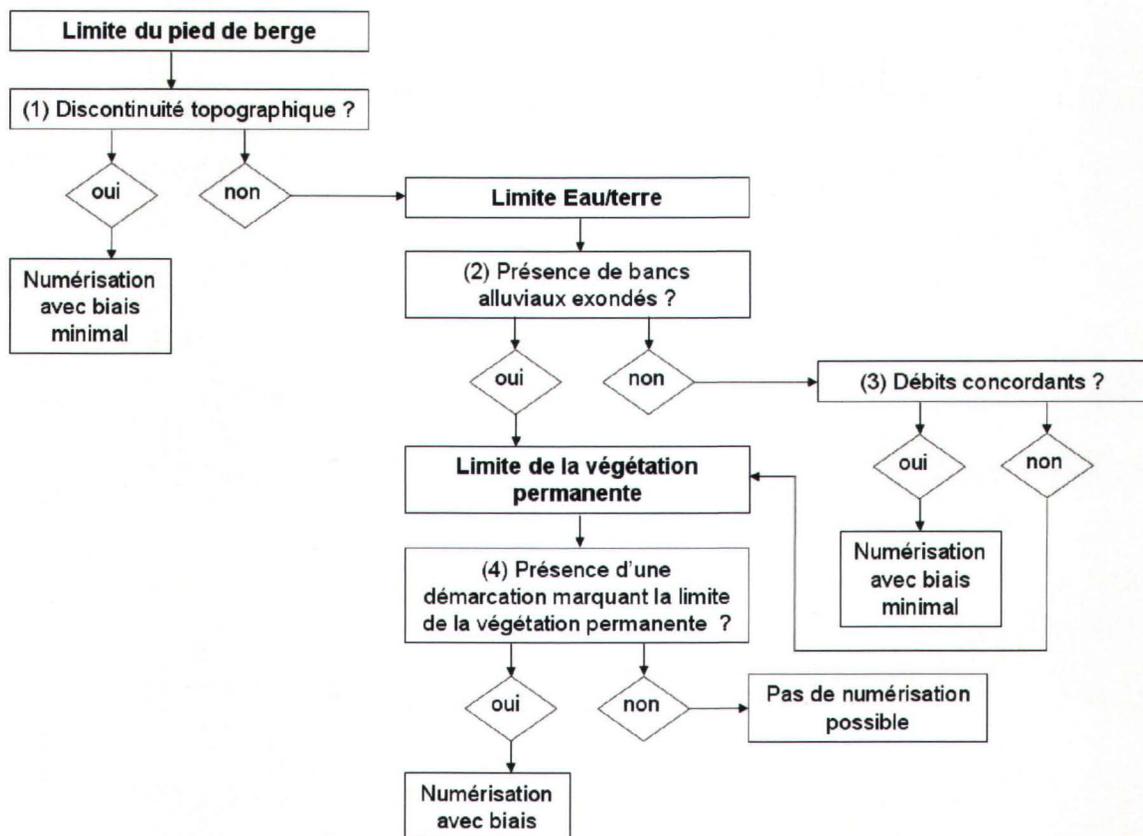


Figure 15 : Méthode composite multi-critères pour la cartographie des traits de berge.

Dans ce cheminement logique, l'ordre de venue des limites indique le niveau de précision attendu. Le premier palier, la limite du pied de berge, impliquant l'identification d'une discontinuité topographique (critère 1), correspond à la meilleure précision. Le critère 2, relatif à la limite eau/terre, fut intégré à l'arbre décisionnel pour assurer le positionnement

d'une limite prenant en compte la portion active du chenal dans les zones formant des bancs alluviaux exondés. L'introduction de ce critère permet de contrôler du fait même les erreurs associées aux différences de débit lesquelles pouvaient conduire à des écarts de positionnement importants en raison du faible encaissement du chenal dans ces zones. Ainsi, lorsque la présence de ces objets est décelée et qu'aucun pied de berge n'est au préalable détectable au-delà de ceux-ci, la limite eau/terre fait alors place à la limite de la végétation permanente. Comme l'arbre décisionnel l'illustre (Figure 15), des débits non suffisamment concordants (critère 3) peuvent aussi conduire à l'emploi de cette limite. Une fois le stade de la limite de la végétation permanente atteint, dans les cas où le critère 4 ne conduit pas à l'identification d'une limite, il est alors conseillé d'utiliser un autre jeu d'images lequel pourrait ultimement correspondre à l'un des critères établis et permettre l'établissement d'une limite précise. En ultime recours, si aucune couverture alternative n'est disponible, il serait alors possible de revenir à la limite eau/terre même si les débits ne sont pas conformes. Dans ce type de contexte, l'utilisation de cette limite irait toutefois à l'encontre de l'objectif de précision maximale et de représentativité de la portion active du chenal.

Au niveau sémantique, les termes « numérisation avec biais minimal » indiquent que la limite numérisée (pied de berge ou eau/terre) implique une précision optimale en fonction des caractéristiques des jeux de données employés, soit l'échelle des images sources, le stade de feuillaison des végétaux et la concordance des débits. L'expression « numérisation avec biais » indique quant à elle l'incorporation d'un léger biais au niveau de la position de la limite relevée (limite de la végétation permanente). Cette dernière se rapporte notamment au fait que le critère de la végétation permanente n'est pas parfaitement stable dans le temps, essentiellement en raison de la croissance des végétaux. La précision des données produites est quantifiée à la section 4.1.2.3.

En résumé, dans sa forme à quatre critères, l'arbre implique une cartographie applicable en trois dimensions (stéréoscopie), alors qu'une fois le premier palier exclu, la méthode peut aussi s'appliquer en deux dimensions.

4.1.2.2. Application de la méthode

La cartographie pour le suivi d'érosion des berges fut effectuée sur les tronçons de berges ciblés pour la modélisation, soit ceux incluant de la vulnérabilité (section 1.3.5). On y retrouve en ce sens, toute la berge ouest du tronçon à l'étude, le pourtour de l'Île-Enchanteresse et la berge est dans le secteur des Îlets. Cette dernière zone fut notamment étendue en amont et en aval des six habitations présentes dans ce secteur, soit entre les bornes 0,5 et 2) (Figure 1), de façon à englober ce secteur où des reculs importants furent observés lors d'une étude antérieure (Leclerc *et al.*, 1998).

Précisons que, dans les secteurs incluant des îles, la ligne de berge cartographiée pour le suivi d'érosion correspond à la limite extérieure des anabranches les plus importantes situées en périphérie du chenal principal (Figure 16). Parallèlement, la cartographie complète des berges de l'année récente fut effectuée sur toutes les berges et îles du site.



Figure 16 : Exemple de limite cartographiée (ligne bleue) pour le suivi d'érosion des berges dans les secteurs incluant des îles. Orthophoto 2003, Ville de Québec.

À la lumière des observations effectuées lors des tests de cartographie, le stéréo-modèle 2002 fut mis de côté. Celui-ci fut remplacé par la couverture d'orthophotos de 2007 présentant une netteté et une résolution native nettement supérieure (Figure 17). Ainsi, le trait de berge récent du tronçon situé entre les bornes 8 et 9,5 fut numérisé en deux dimensions uniquement. Le Tableau 6 présente une mise à jour des couples temporels utilisés pour la cartographie diachronique de même que les écarts de débits s'y rattachant et la période de temps couverte par ceux-ci. Les tronçons de rivière couverts par ces

couples y sont numérotés de 1 à 3. La mise en application de la méthode multi-critères développée est ensuite présentée pour chacun de ces tronçons.

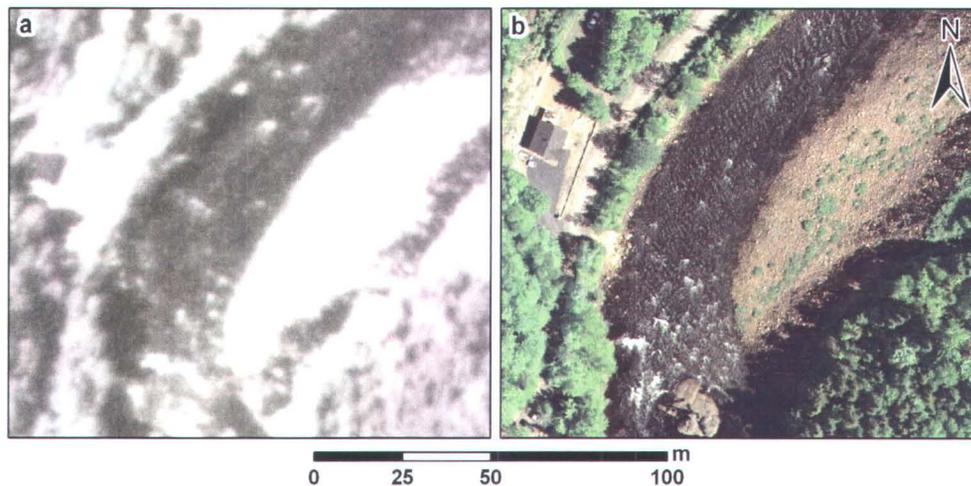


Figure 17 : Qualité des couvertures d'images de 2002 (a) et de 2007 (b) dans le secteur situé entre les bornes 8 et 8,25.

Tableau 6 : Couples temporels utilisés en fonction des secteurs et des différences de débit

Tronçon	Localisation* ¹	Couple temporel	ΔQ (m ³ /s)* ²	Écart temporel (années)
1	0 à 7	1963-2003	≈ 6	40
2	7 à 8	1965-2003	40	38
3	8 à 9,25	1965-2007	34	42

*¹ Par rapport aux bornes kilométriques

*² Différence de débit entre les deux années de référence

4.1.2.2.1. Tronçon 1 (bornes 0 à 7)

La quasi-totalité des traits de berge servant au suivi de l'érosion de ce tronçon furent numérisés à l'aide de la limite du pied de berge et de la limite eau/terre, soit en utilisant les trois premiers critères seulement. Ce fait s'explique par la facilité de reconnaissance de la topographie du pied de berge (critère 1) associée à une végétation dépourvue de feuille pour les deux années de référence, la faible présence de bancs alluviaux exondés (critère 2) et finalement la grande similitude des débits entre eux (critère 3). Seul un banc alluvial (critère 2) situé sur la berge est, dans la partie amont du secteur des Îlets (bornes 2 à 2,25), sur la couverture de 1963 nécessita le recours à la limite de la végétation permanente (critère 4).

Pour la cartographie complète de l'année récente, la démarche fut sensiblement la même avec à l'occasion la mise en application de la limite de la végétation permanente

(critère 4) dans les zones où des bancs alluviaux formaient des îles (critère 2). Dans ces cas, tout comme ce fut observé lors des tests préalablement effectués, l'absence de feuillage dans les végétaux caducifoliés représenta une certaine difficulté pour l'identification de la limite de la végétation permanente, sans toutefois en empêcher l'application.

4.1.2.2.2. Tronçon 2 (bornes 7 à 8)

La limite du pied de berge associée au critère 1 demeura la limite de premier plan dans cette section. Lorsque celle-ci n'était pas applicable, notamment en raison de la submersion du pied de berge, la limite eau/terre fut numérisée. Celle-ci fut mise de l'avant en raison de l'absence de bancs alluviaux exondés (critère 2) du côté de la berge ouest, mais aussi en raison de l'inapplicabilité de la limite de la végétation permanente (critère 4) due au déboisement important de cette même portion de berge. Les débits furent donc considérés comme conformes (critère 3), malgré un léger écart de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ lequel, étant contrôlé par le profil escarpé des berges de ce site, était peu susceptible de générer des erreurs horizontales importantes.

Pour la cartographie complète de l'année récente, sur la rive est, l'absence d'intervention humaine permit l'application de la limite de la végétation permanente (critère 4), notamment dans un secteur où un banc alluvial exondé nécessitait l'emploi de celle-ci (borne 8).

4.1.2.2.3. Tronçon 3 (bornes 8 à 9,5)

Pour l'année ancienne (1965), la logique de numérisation suivie fut essentiellement la même que celle appliquée pour la même année au tronçon précédent, c'est-à-dire, la limite du pied de berge d'abord et, lorsque nécessaire, la limite eau/terre. L'absence d'ombre en berge permit de surmonter la difficulté associée au caractère grossier du grain des images utilisées de sorte que le pied de berge (critère 1) a pu être identifié dans la majorité des cas. Seules les zones où cette forme n'était pas clairement distinguable furent cartographiées à l'aide de la limite eau/terre. Tout comme pour le tronçon précédent, malgré un faible écart de $34 \text{ m}^3/\text{s}$, les débits furent considérés comme conformes (critère 3). L'application de cette limite exclusivement dans les zones exemptes de bancs alluviaux (critère 2), donc dans les secteurs affichant des berges pentues, permit, en

conformité avec la logique mentionnée dans le paragraphe précédent, de minimiser l'erreur de positionnement horizontale associée à une légère différence des niveaux d'eau. La ligne de berge correspondant à l'année récente, à la fois pour la cartographie globale du trait de berge et pour le suivi de l'érosion, fut numérisée uniquement en deux dimensions à partir des orthophotos 2007. L'émulsion couleur, la grande résolution et la clarté supérieure de ces images permirent de numériser avec précision les limites sélectionnées. La limite eau/terre fut appliquée dans les zones ne correspondant pas à des bancs alluviaux exondés (critère 2). Pour les mêmes raisons que celles mentionnées précédemment, les débits des deux années de référence furent considérés comme conformes (critère 3). Dans les secteurs où des bancs alluviaux exondés étaient observables (critère 2), la limite de la végétation permanente fut appliquée. La présence de feuillage et la bonne résolution des images permirent de différencier facilement la végétation permanente (arbres et arbustes) (critère 4) de la végétation herbacée.

4.1.2.3. Estimation de la précision des traits de berge numérisés

La précision des traits de berge ainsi produits fut évaluée d'après la marge d'erreur moyenne associée au géopositionnement des images (section 4.1.1.3.2), soit 3 m. Pour ce faire, dix sections de berge constituées de roche en place, donc possédant une morphologie stable dans le temps, furent identifiées. Ces sections furent relevées au cours des travaux de terrain menés à l'automne 2008. Une zone tampon (*buffer*) de 3 m fut ensuite établie autour de la ligne récente, de façon à vérifier si l'écart entre les lignes anciennes et récentes était en accord avec la marge d'erreur préalablement quantifiée. À noter que la zone tampon en question aurait aussi pu être produite à partir de l'année ancienne pour ainsi parvenir aux mêmes résultats. Sur les dix tronçons testés, totalisant plus de 700 m de longueur, seules deux sections de 35 et 90 m de longueur, localisées entre les bornes 7,75 et 8,75, ont révélé des écarts supérieurs à 3 m. Ceci permit notamment de constater que plus de 82 % des tronçons de validation affichaient une imprécision inférieure à la marge d'erreur de géopositionnement.

Malgré la qualité de ces résultats, il s'avéra nécessaire de quantifier la magnitude des imprécisions identifiées sur les deux sections en question, afin de réajuster la marge d'erreur en conséquence. Pour ce faire, une série de zones tampons à intervalle de 50 cm

furent établies autour de la zone tampon de 3 m, de façon à inclure entièrement les variations de la ligne ancienne en ces lieux. Les écarts purent être englobés à l'intérieur d'une zone tampon de 4 m.

Du fait que ces zones d'erreur se situent au nord de la borne 7 (entre les 7,75 et 8,75), soit dans le secteur où la ligne ancienne fut numérisée à partir des images de 1965, la moins bonne résolution native des images du stéréo-modèle de cette année semblerait la principale responsable de ces écarts accrus. Les différences de débit plus importantes entre les années employées, soit respectivement de 40 et 34 m³/s pour les couples 1965-2003 et 1965-2007, par rapport à une différence d'environ 6 m³/s pour 1963-2003, peuvent aussi être soupçonnées, mais le profil généralement très escarpé des berges constituées de roche en place tendrait normalement à atténuer, voire annuler les écarts horizontaux associés à des différences de niveau de cette ampleur.

Pour assurer un haut degré de signification des déplacements enregistrés dans ce secteur, la marge d'erreur du tronçon couvert par les images de 1965 (bornes 7 à 9,5) fut réajustée à 4 m, ce qui signifie que seules les différences supérieures à cette valeur furent considérées comme des déplacements réels. La marge d'erreur relative à la section comprise entre les bornes 0 et 7 quant à elle fut conservée à 3 m.

4.1.2.4. Sommaire

L'utilisation d'une méthode composite multi-critères pour la cartographie de la ligne de berge permet de déterminer une limite riveraine en lien avec la portion active du chenal. À titre d'exemple, la Figure 18 illustre les résultats de l'application d'une limite unique, en l'occurrence la limite eau/terre (b) et de la méthode multi-critères utilisant à la fois la limite eau/terre et la limite de la végétation permanente, lesquelles impliquent les critères 2, 3 et 4 (c).

De plus, la prise en compte de critères géomorphologiques (critères 1 et 2), hydrologiques (critère 3) et botaniques (critère 4) favorisa un positionnement plus précis compte tenu des caractéristiques de l'environnement cartographié et de la nature des données (échelle et netteté des images) utilisées pour la cartographie.

Néanmoins, la méthode a révélé de légères lacunes, notamment pour l'identification de la limite de la végétation permanente dans les zones déboisées de même que dans les

secteurs où la végétation était dépourvue de feuilles. C'est pourquoi cette limite figura en dernier lieu dans l'arbre décisionnel et qu'il est préférable de recourir aux deux types de délimitation précédant celui de la végétation permanente lorsque cela est possible.

La sélection des images est apparue aussi comme une étape déterminante pour la qualité et la facilité de la numérisation subséquente. La sélection de l'échelle des images devrait donc être effectuée en conformité avec la taille de la rivière étudiée comme l'ont proposé Bryant et Gilvear (2003). L'homogénéité des débits entre les années de référence doit aussi faire l'objet d'une attention particulière dans la sélection des images formant les couples temporels. Dans le cas présent, les couples furent agencés de façon à obtenir un écart de débit minimal pour pouvoir recourir, en fonction de la géomorphologie du tronçon cartographié, à la limite eau/terre sans biais majeur. Ceci eut toutefois comme conséquence d'introduire des différences de débit au sein même des lignes finales ancienne et récente. Ainsi, la ligne récente, produite à partir des images de 2003 (94 m³/s) et de 2007 (20 m³/s), inclut un écart de débit de 74 m³/s, alors que la ligne ancienne, élaborée à partir des images de 1963 (\approx 100 m³/s) et de 1965 (54 m³/s), incorpora un écart d'environ 46 m³/s. Au sommaire, ces écarts ne s'avérèrent pas problématiques, notamment parce que les berges du tronçon à l'étude étaient en général escarpées et que les écarts horizontaux associés à ces différences furent à toutes fins pratiques imperceptibles lorsque les sections cartographiées furent reliées entre elles.

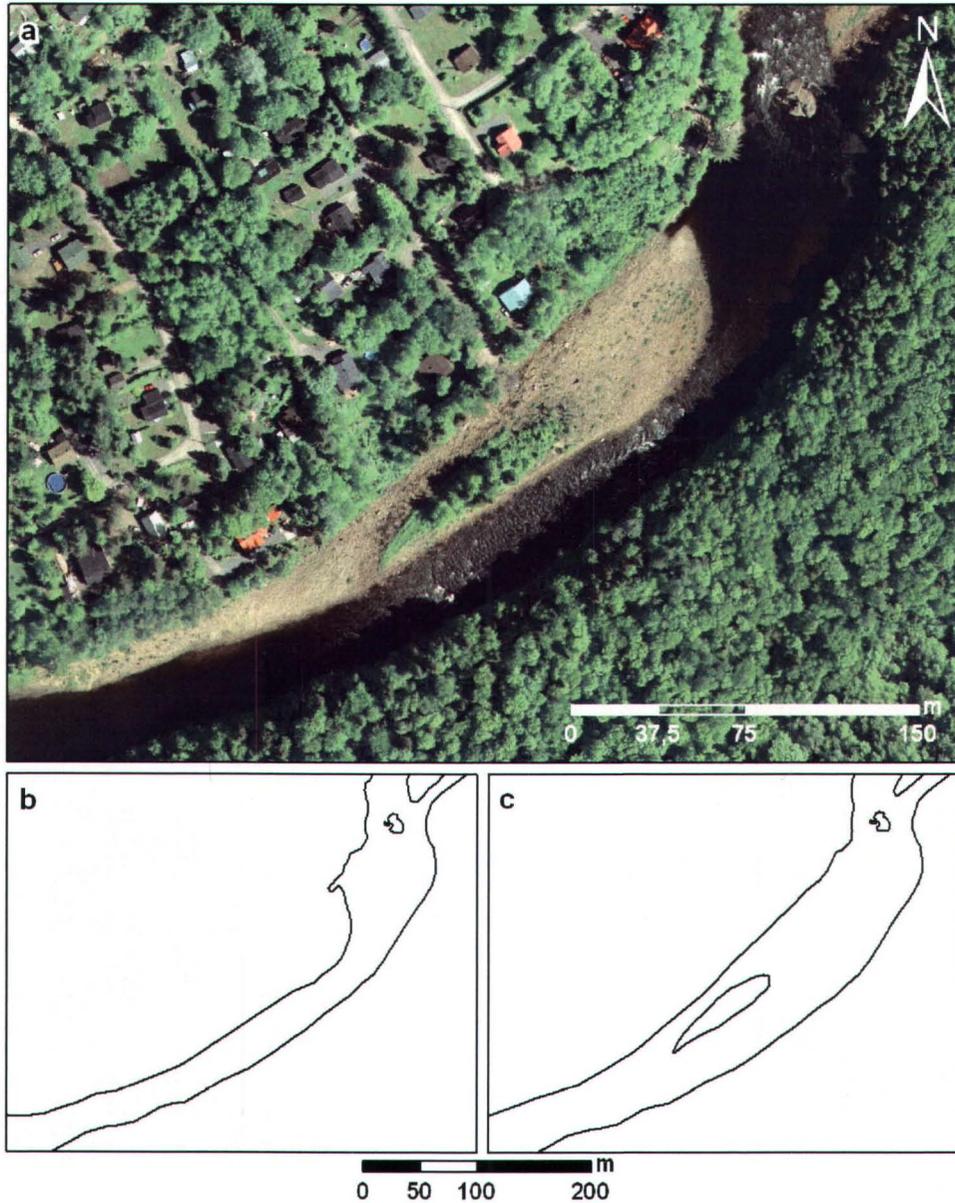


Figure 18 : Influence des critères de cartographie sur la position de la ligne de berge numérisée en 2D : (a) Image du secteur de la rue Parent (km 8 à 8,5), (b) limite unique eau/terre, (c) méthode multi-critères. Source : Orthophoto 2007, no. 5104, Ville de Québec.

4.1.3. Quantification du déplacement des lignes de berge

La quantification du déplacement des traits de berge passa par deux étapes: une première portant sur la simplification des lignes de berges numérisées, dans le but d'éliminer les biais locaux associés à la numérisation manuelle (ligne comportant des portions en dents de scie), et une seconde visant à obtenir des mesures de déplacement ramenées en taux de recul annuels (m/an).

4.1.3.1. Simplification des lignes de berge

La simplification des lignes de berge numérisées visait à prévenir d'éventuelles aberrations dans le déplacement des berges. Ainsi, certains tronçons furent éliminés du suivi d'érosion des berges, dont notamment le secteur de la prise d'eau de Beauport (bornes 1 à 1,5). En effet, comme les îles de ce secteur furent reliées à la berge lors de la création des bassins, une avancée du trait de berge de plus 170 m aurait été enregistrée de façon erronée. Ensuite, la ligne de berge située à la périphérie de petits affluents non pris en compte dans le suivi de l'érosion des berges fut généralisée de façon à ne pas induire de courbure indue dans la ligne de berge. Pour ce faire, une ligne respectant le profil linéaire de la berge en amont et aval de la confluence fut tracée vis-à-vis de celle-ci. Cette structuration visait aussi à produire une ligne continue à partir de laquelle des rayons de courbure allaient pouvoir être calculés (section 4.3.3.3). Finalement, dans le but de filtrer les aspérités anguleuses des tracés produits, associées à la numérisation manuelle, les lignes furent légèrement lissées. Le lissage fut effectué dans ArcInfo 9.2® à l'aide d'un algorithme de type PAEK (*Polynomial Approximation with Exponential Kernel*) (Bodansky *et al.*, 2002) avec une longueur d'action (*tolerance*) de 5 m. Cette longueur d'action permet d'éliminer les angularités non significatives sans altérer la variabilité longitudinale de la ligne.

4.1.3.2. Technique de calcul des taux de recul

La technique de calcul conduisant à la donnée du taux de recul annuel employée ici comporte cinq étapes successives résumées ci-après.

4.1.3.2.1. Calcul des déplacements

Premièrement, pour calculer la distance entre les lignes de berge anciennes et récentes, la fonctionnalité *Euclidean Distance* sous ArcInfo 9.2® fut utilisée. Celle-ci consiste à produire une couche de données matricielle fine (pixels de 25 cm) indiquant la plus courte distance de chaque pixel par rapport un objet donné (Aide intégrée du logiciel ArcInfo 9.2®, 2010). Dans le cas présent, la ligne de berge ancienne fut employée pour ce calcul.

4.1.3.2.2. Distinction du sens de déplacement (recul ou avancée)

Deuxièmement, dans le but d'établir que le déplacement calculé correspondait à un recul ou à une avancée, une polarité (négative ou positive) fut octroyée à la distance calculée.

Pour ce faire, les lignes de berges anciennes furent complétées et transformées en un polygone représentant la totalité du chenal ancien exempt d'îles. L'Île-Enchanteresse fut traitée de façon indépendante selon la même procédure. Le polygone fut transformé en une couche matricielle de la même résolution que celle portant les valeurs de distance (pixels de 25 cm). Ensuite, une étape de reclassification (fonction *Reclassify* sous ArcInfo 9.2®) permit de recréer une couche matricielle où tous les pixels contenus dans ce polygone furent dotés d'une valeur de 1, alors que tous ceux situés à l'extérieur de ce dernier reçurent une valeur de -1. La multiplication de la matrice de distance avec la matrice reclassifiée permit alors de différencier les zones ayant connu un recul (valeurs négatives) de celles ayant connu une avancée (valeurs positives).

4.1.3.2.3. Transfert de l'information aux unités spatiales

Troisièmement, afin que ces résultats soient intégrables au MSBE, ceux-ci devaient être transférés à des unités spatiales (discrétisation) servant de base à l'élaboration du modèle en question. Les tenants et aboutissants de ces unités spatiales seront présentés plus en détails à la section 4.3.2. Pour les présents besoins, celles-ci se résument à une série de 2217 polygones d'une dimension de 6 x 10 m chevauchant la ligne de berge récente à partir de laquelle elles furent élaborées. Ainsi, pour transférer l'information de la matrice de distances polarisées (où les reculs et les avancées furent discriminés) aux unités spatiales, des sous-sections plus étroites de 6 x 1 m, comprenant un chevauchement de 50 cm de part et d'autre de la ligne récente, furent produites. Celles-ci servirent à effectuer une requête spatiale consistant à calculer et à extraire la valeur moyenne des pixels situés sous celles-ci (fonction *Zonal Statistics* sous ArcInfo 9.2®). L'emploi de ces sous-sections plus étroites visait à n'impliquer dans le calcul que les pixels situés à proximité de la ligne récente. Cette information fut ensuite ramenée vers les unités spatiales à l'aide d'une extraction par points (i.e. les centroïdes des unités) et d'un joint spatial entre les points et les unités spatiales.

4.1.3.2.4. Prise en compte des marges d'erreur

Quatrièmement, les marges d'erreur établies à la section 4.1.1.3.2 furent appliquées à leur tronçon respectif. Ainsi, pour la section située entre les bornes 0 et 7, tout déplacement inférieur à 3 m fut ramené à 0 (i.e. non significatif), alors que pour la section comprise entre les bornes 7 et 9,5, la même opération fut effectuée en appliquant une marge

d'erreur de 4 m. De cette façon, les valeurs rabattues à 0 indiquèrent des déplacements situés en deçà des seuils de détection.

4.1.3.2.5. Calcul des taux de recul moyens

Cinquièmement, les valeurs de déplacement furent divisées par l'écart temporel séparant les années de référence employées pour la cartographie (Tableau 6), de façon à obtenir des taux de recul moyens annuels exprimés en mètre par année (m/an).

4.1.4. Résultats du déplacement des berges

Dans cette section, les zones ayant enregistré les déplacements les plus significatifs sont présentées. Parmi celles-ci, se retrouvent à la fois les sections ayant connu un recul et celles affichant une avancée.

Les résultats présentés ici permettent de mettre en perspective la magnitude des mouvements relevés et la longueur des sections de berge impliquées. Ces données sont issues des unités spatiales auxquelles les valeurs de déplacement furent préalablement transférées (section 4.1.3.2.3).

En tout, vingt-et-une sections furent dénombrées, dont neuf correspondent à des occurrences d'érosion et douze à des avancées dans la rivière. Ces tronçons sont représentés sur une série de cartes (Figures 19 à 24), alors que les résultats de la quantification des déplacements sont présentés au Tableau 7. Rappelons que le suivi de l'érosion des berges fut concentré dans les zones présentant de la vulnérabilité (éléments anthropiques potentiellement endommageables), d'où l'absence de données en berge est en amont de la borne 2,25.

Au niveau des zones ayant connu de l'érosion, les observations permirent de constater que les reculs les plus importants se localisent en aval de la borne 3 (Figures 19 et 20). Ainsi, dans ces secteurs, les pertes de terrain peuvent atteindre plus de 60 m (site 6 : Figure 19; Tableau 7) et couvrir des tronçons de berge de plus de 240 m de longueur (sites 2, 6 et 10 : Figures 19 et 20; Tableau 7). En amont de cette même borne, la magnitude de l'érosion est apparue comme étant moindre, mais pouvant tout de même impliquer des reculs de 14 m (site 16 : Figure 22; Tableau 7) et des sections de berge d'une longueur de 168 m (site 19 : Figure 23; Tableau 7). En outre, à la hauteur de la

borne 8,75 (rue Parent) (site 21 : Figure 24), les reculs maximum et moyen, respectivement de 5 m et 4,6 m (Tableau 7), concordent avec les observations d'un riverain du secteur, qui aurait constaté un recul d'environ 5 m entre 1970 et 2008. (Communication personnelle: Albert Boutet, 2008) (section 1.3.3).

Concernant les sections ayant enregistré une avancée dans la rivière, parmi les douze tronçons répertoriés, cinq semblaient résulter d'une sédimentation associée au profil longitudinal convexe de la berge en ces lieux (sites 1, 5, 7, 9 et 20 : Figures 19 et 23). Ces déplacements furent observés sur des tronçons de berge d'une longueur variant de 36 m (site 9 : Figure 19; Tableau 7) à 144 m (site 5 : Figure 19; Tableau 7) et pouvaient atteindre des valeurs de 37,8 m (site 7 : Figure 19; Tableau 7).

Aussi, en lien avec la sédimentation, l'avancée considérable de 52,6 m sur 210 m de longueur enregistrée au site 3 (Tableau 7) viendrait du colmatage d'une anabranch. En effet, le petit chenal secondaire isolant anciennement une île aurait été comblé de sédiments au fil des années liant ainsi l'île en question à la terre pour induire une avancée notable (Figure 25). Le dénivelé actuel de 1,2 m (d'après le MNT), entre le haut de ce bouchon sédimentaire et le niveau du chenal encore actif, permet l'identification d'un escarpement correspondant à un pied de berge d'où l'abandon de l'ancien chenal lors de la cartographie de la berge récente (2003).

En outre, les six tronçons restant pour lesquels une avancée fut relevée (sites 11, 12, 14, 15, 17 et 18 : Figures 20, 21 et 22; Tableau 7) semblaient, quant à eux, relever davantage d'interventions humaines. Le secteur de l'Île-Enchanteresse regroupe quatre d'entre eux (sites 14, 15, 17 et 18 : Figure 22), dont notamment le site 15 qui présente l'avancée la plus importante avec plus de 235 m. Cette avancée en question constitue aujourd'hui la pointe sud de l'île et forme une ligne de berge de 804 m de longueur (Figure 22; Tableau 7). Cette pointe possède une hauteur moyenne établie à 3 m (d'après le MNT) et une granulométrie grossière (galets avec blocs et gravier) d'après les observations de terrain, de sorte qu'il apparaît peu probable qu'elle découle d'une sédimentation naturelle étalée sur les 40 ans séparant les années de référence (1963-2003). En ce sens, il est possible qu'elle soit le résultat d'un stockage de matériaux extraits lors d'importants travaux de dragage et de rectification des berges menés au début des années 70 en réponse à des

embâcles récurrents dans ce secteur (Morse *et al.*, 2002). Dans cette optique, il est aussi plausible que les autres avancées de cette zone soient associées à cet évènement (sites 14, 17 et 18 : Figure 22; Tableau 7). En somme, les sites 11 et 12 (Figures 20 et 21; Tableau 7), au droit desquels on retrouve aujourd'hui des enrochements à fort calibre, semblent le fruit d'un remplissage avec immunisation. Si le gain moyen aux dépends de la rivière demeure relativement modeste avec 15,8 m au site 11 et 7,6 m au site 12, la longueur des tronçons de berge impliqués l'est moins avec respectivement 114 m et 414 m (Tableau 7).

Tableau 7 : Sections de berge ayant enregistré des déplacements

Sens du déplacement	Numéro du tronçon	Longueur du tronçons (m)	Déplacement (m)	
			Moy.	Max.
Recul	2	246	15,3	32,9
	4	60	9,8	12,9
	6	282	25,2	60,6
	8	60	11,5	17,4
	10	270	11,3	20,3
	13	78	7,9	10,7
	16	60	9,4	14,0
	19	168	6,9	8,4
	21	66	4,6	5,0
Avancée	1	84	9,2	12,1
	3	210	29,3	52,6
	5	144	10,8	17,0
	7	180	15,2	37,8
	9	36	14,8	20,6
	11	114	15,8	21,3
	12	456	7,6	12,3
	14	180	29,9	46,5
	15	804	78,7	235,3
	17	252	12,1	24,9
	18	156	6,9	19,0
20	138	6,3	8,2	

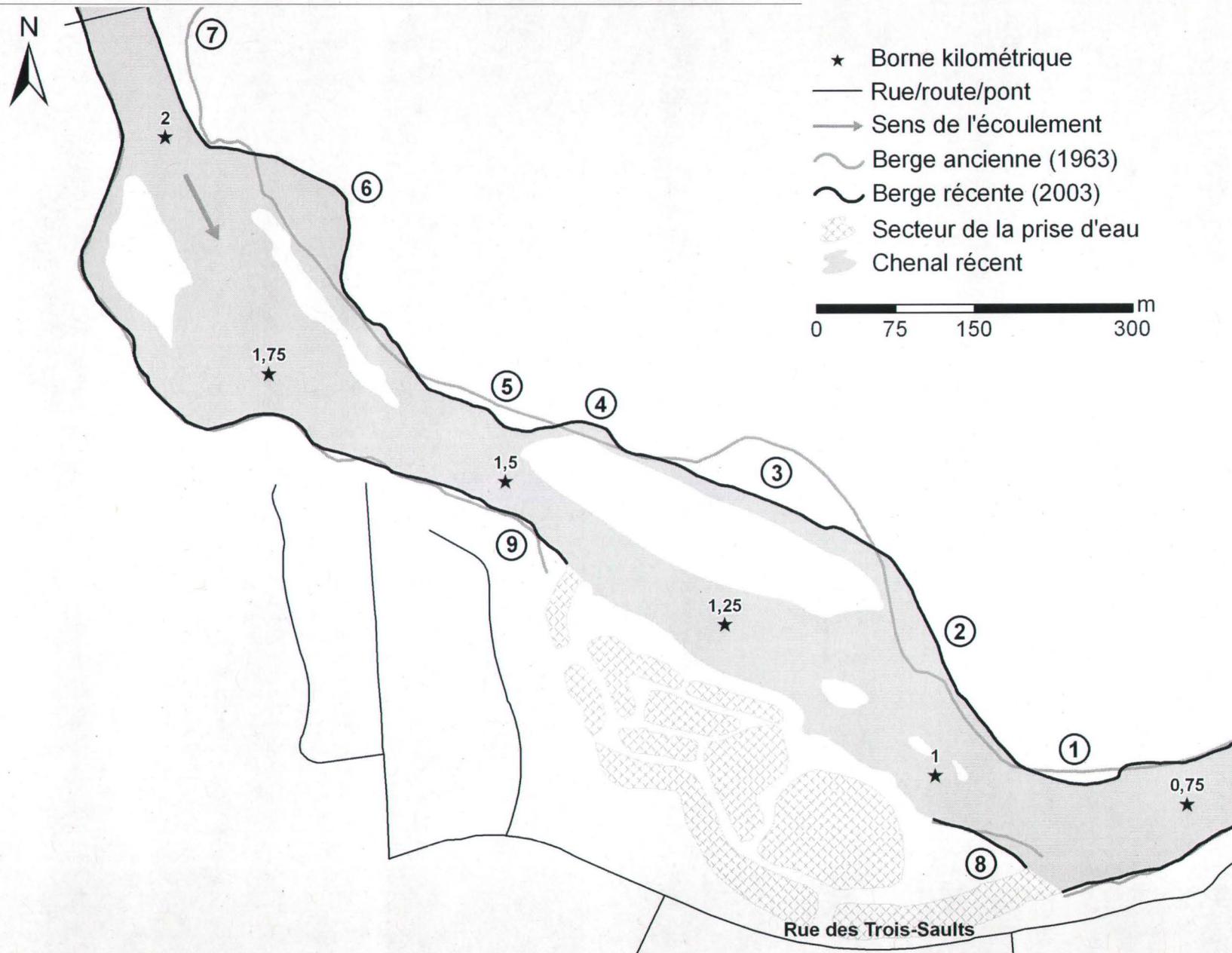


Figure 19 : Déplacement des berges entre 1963 et 2003, secteur des Îlets. Les nombres 2, 4, 6 et 8 indiquent un recul et les nombres 1, 3, 5, 7 et 9 marquent une avancée.

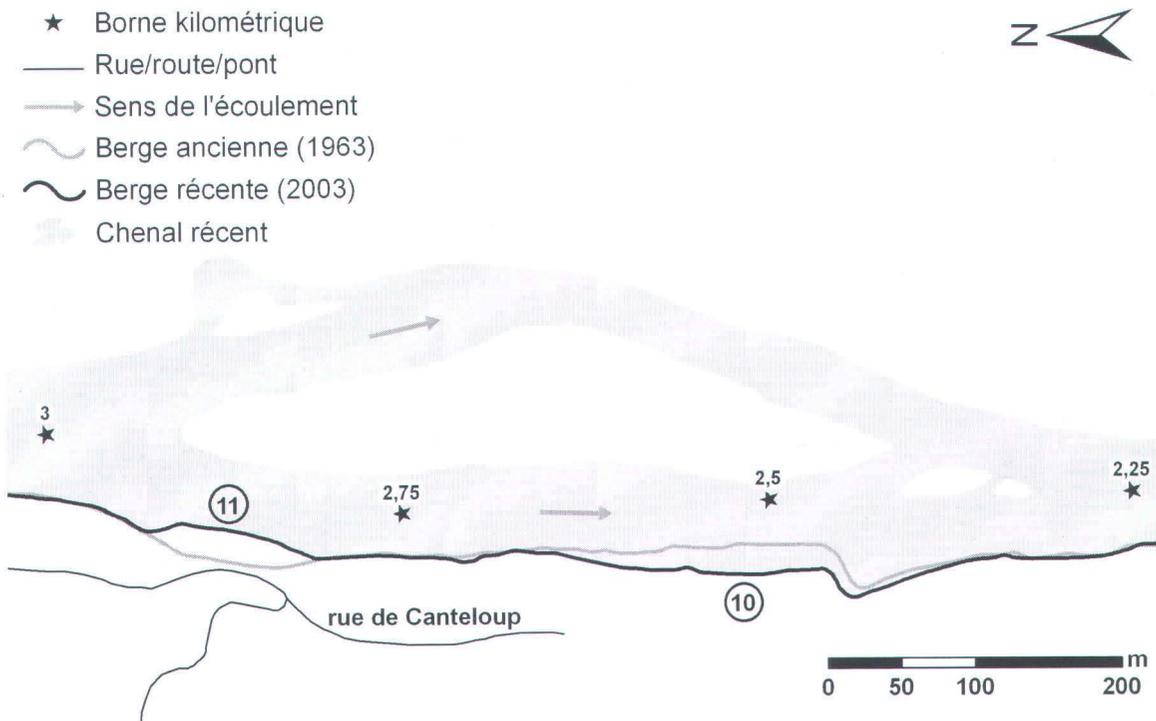


Figure 20 : Déplacement des berges entre 1963 et 2003, secteur rue de Canteloup. Le nombre 10 indique un recul et le nombre 11 marque une avancée.

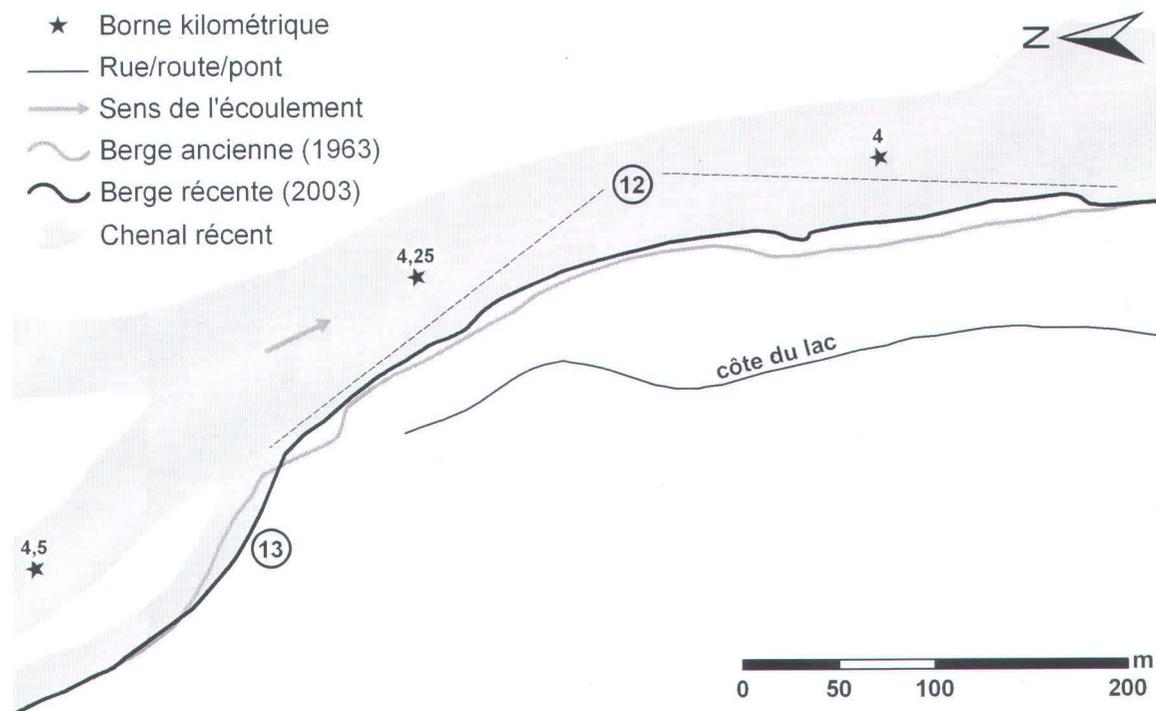


Figure 21 : Déplacement des berges entre 1963 et 2003, secteur rue du Côte du Lac. Le nombre 13 indique un recul et le nombre 12 marque une avancée.

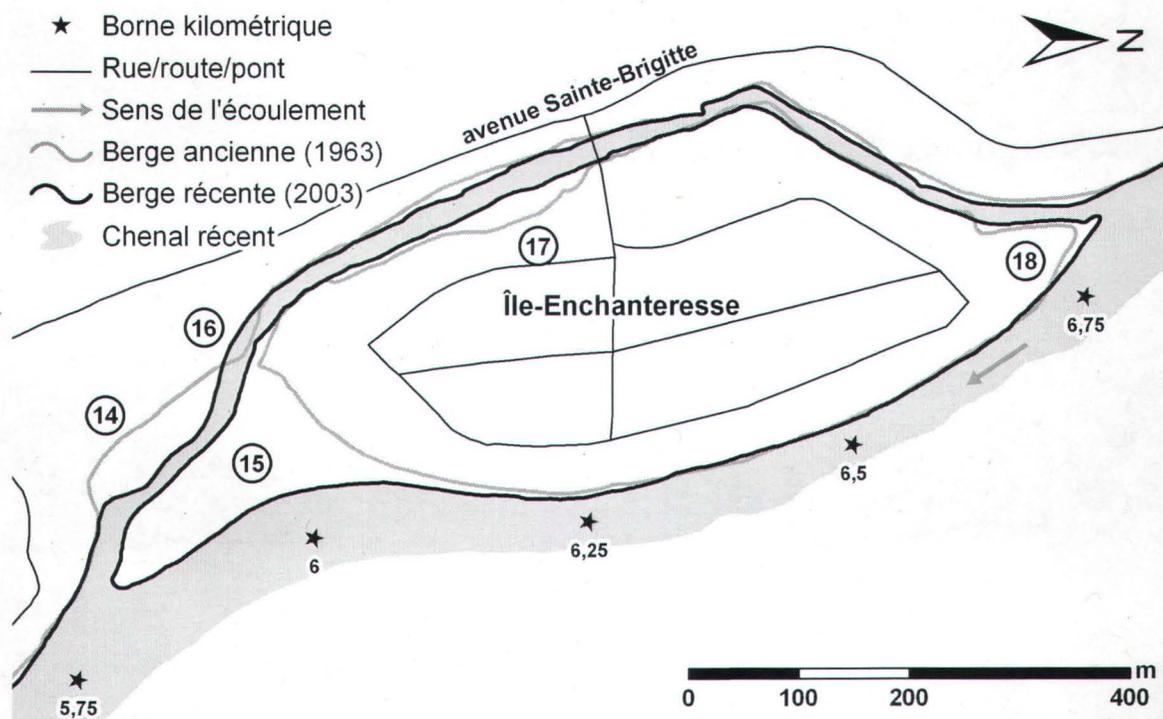


Figure 22 : Déplacement des berges entre 1963 et 2003, secteur de L'Île-Enchanteresse. Le nombre 16 indique un recul et les nombres 14, 15, 17 et 18 marquent une avancée.

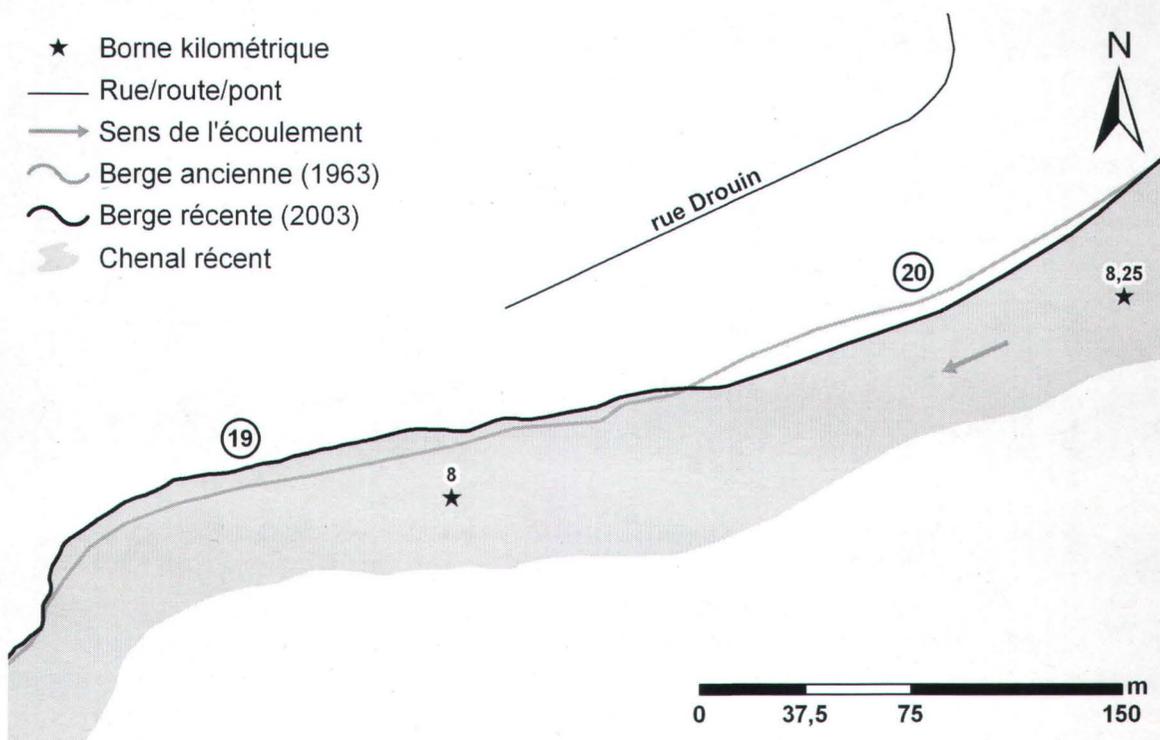


Figure 23 : Déplacement des berges entre 1963 et 2003, secteur de la rue Drouin. Le nombre 19 indique un recul et le nombre 20 marque une avancée.

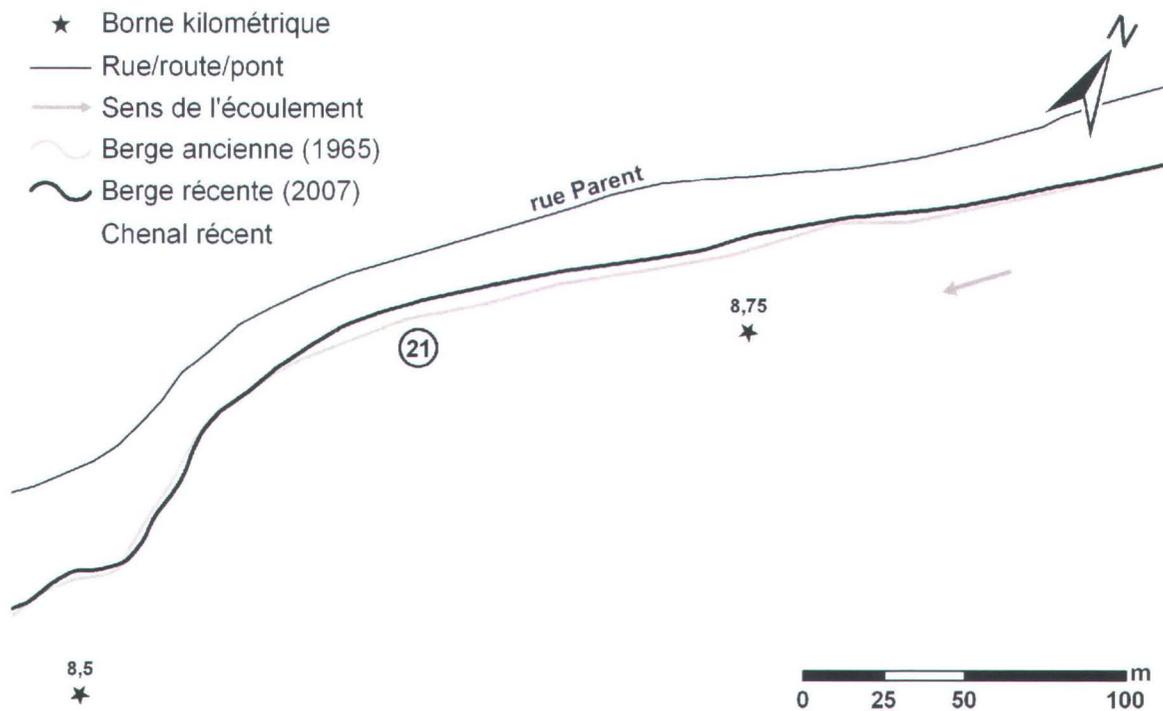


Figure 24 : Déplacement des berges entre 1963 et 2007, secteur de la rue Parent. Le nombre 21 indique un recul.

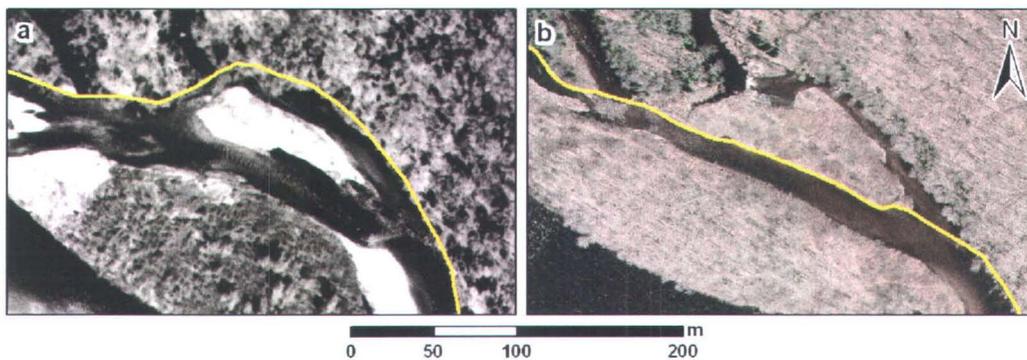


Figure 25 : Colmatage d'une anabranchie, dans le secteur des îlets (borne 1,25) entre 1963 (a) et 2003 (b) et déportation de la position du trait de berge (ligne jaune) formant une avancée. Source : (a) Photographies aériennes Q63307-201 et 200, 1963, 1 :9600, Géomathèque (Groupe Alta), (b) Orthophotos 5298, 2003, Ville de Québec.

4.2. Méthodologie pour la création d'un MNT optimal

Cette section a pour objet l'élaboration d'un MNT représentant le plus fidèlement possible la topographie et la surface de l'eau au site d'étude. La production d'un MNT précis s'avère un élément fondamental pour l'élaboration d'un MSBE, notamment pour la production de variables explicatives (ex : pente de la berge), lesquelles constituent la base du modèle. Pour ce faire, un jeu de données topographiques LiDAR fut d'abord caractérisé pour tout le site avec une attention particulière au niveau du chenal. Ensuite, différents interpolateurs furent testés sur tout le domaine et sur le chenal uniquement, dans le but de déterminer le plus adapté aux données. Finalement, l'examen des résultats issus de ces analyses permet l'assemblage d'un MNT constitué de surfaces numériques interpolées de façon optimale tant au niveau statistique que graphique.

4.2.1. Caractérisation des données topographiques sources

Les données topographiques utilisées dans cette étude consistent en un jeu de données laser aéroportées de type LiDAR. L'acquisition LiDAR fut effectuée en deux vols, un premier le 12 novembre 1999 et un second le 3 juin 2000.

Les paramètres d'appareillage et d'acquisition sont les suivants :

- Capteur ALTM1020 5 kHz, un seul retour (niveau de tolérance non spécifié)
- Fréquence de balayage de 15 Hz
- Angle de balayage de 30° et chevauchement de 30% entre les fauchées
- Altitude locale de 700 m au-dessus du sol
- Vitesse de vol de 70 m/s

La précision verticale de ces données fut évaluée à 20 cm par Leclerc *et al.* (2001). Cependant, d'après la littérature, la précision des relevés effectués à cette époque serait plutôt de l'ordre de 15 cm (Charlton *et al.*, 2003; Fortin *et al.*, 2002; USACE, 2002, Fowler, 2000; Brinkman et O'Neil, 2000). La précision du LiDAR demeure néanmoins difficile à évaluer en raison de la précision du capteur, de l'inertie (mouvement de l'appareil) et de la précision du GPS servant au géoréférencement des données (Brinkman et O'Neil, 2000). Par précaution, la précision verticale retenue fut de 20 cm.

Afin d'optimiser la qualité des points correspondant au sol, une surface de 36 km², soit une bande de 1 km de part et d'autre de la rivière, fut extraite du fichier brut et retraitée

en 2008 à l'aide d'algorithmes de classement plus performant que ceux utilisés en 2000. Ce traitement fut effectué par le producteur des données, la firme LaserMap Image Plus, une division du Groupe BPH. Par la suite, dans le but de limiter le temps de calcul subséquent pour la conception du MNT, une zone tampon de 110 m autour de la rivière, soit de 3,4 km², fut extraite du nouveau fichier de « points sol ». Le nombre de points LiDAR utilisés pour l'élaboration du MNT passa alors de 3 877 811 à 310 754. Le Tableau 8 présente la densité des points LiDAR en fonction des périodes de relevé ainsi que la densité globale.

Tableau 8 : Quantité et densité des points LiDAR selon les périodes d'acquisition (1999, 2000 et les deux combinés).

Relevé	Σ pts	Pt/m ² ^{*1}	Répartition ^{*2}
1999	204268	10,70	3,27
2000	105486	12,69	3,56
Total	310754	11,38	3,37

*¹ 1 point par x m²

*² Indique l'espace moyen (mètres linéaires) entre les points

4.2.2. Analyse de la répartition spatiale des points LiDAR à la surface de l'eau

Sur la rivière Montmorency, 37 218 points LiDAR retournés par la surface de l'eau furent dénombrés⁸. Des observations au niveau de la répartition spatiale de ces points indiquent qu'ils ne sont toutefois pas également distribués. En effet, des regroupements de points très rapprochés furent observés dans certains secteurs, alors que dans d'autres, il était plutôt question de discontinuités spatiales (trous dans le relevé) présentant une quasi-absence de données (Figure 26). Les vingt-quatre discontinuités dénombrées dévoilent un patron de distribution fort différent en fonction des périodes d'acquisition LiDAR 1999 et 2000 (Tableau 9).

⁸ La technique d'extraction des points situés dans le chenal sera présentée à la section 4.2.4.2.2.



Figure 26 : Discontinuités spatiales (D) dans le relevé LiDAR au niveau du chenal.

Tableau 9 : Caractéristiques spatiales des discontinuités spatiales en fonction des relevés LiDAR

Éléments décrivant les discontinuités	Zone relevée	
	Nord (2000)	Sud (1999)
Nombre	9	15
Nombre/km	2,25	2,5
Localisation: Seuil	9	1
Interface seuil/mouille	0	3
Mouille	0	11
Degré de disparité*	Moyen	Très fort
Dimension maximale (m)	275	400

* Le degré de disparité correspond au degré d'absence de points dans la discontinuité spatiale.

La limite entre les deux jeux de données se situe à la hauteur de la pointe sud de l'Île-Enchanteresse de sorte que la partie nord (2000) couvre un tronçon de 4 km et la partie sud (1999) 6 km. Par conséquent, d'après le Tableau 9, le nombre de discontinuités par kilomètre serait à peu près le même. Cependant, pour ce qui est du degré d'absence de points (degré de disparité), des dimensions et de la localisation des discontinuités spatiales, les deux jeux de données se différencient significativement (Tableau 9). Cette répartition spatiale fort divergente serait attribuable à des caractéristiques hydrologiques différentes au moment des relevés et à des dissemblances morphologiques entre les deux zones couvertes par ces relevés.

Ainsi, en amont (vol de 2000), la localisation des discontinuités sur les seuils serait associée à une inclinaison du lit plus prononcée et à un débit supérieur ($49 \text{ m}^3/\text{s}$ en amont

vs 24 m³/s en aval) induisant des surfaces ponctuées d'eaux vives (moutons blancs) causant la diffraction des impulsions laser en ces lieux (Tableau 9) (Cottin, 2009). Le degré de disparité moindre serait associé à une turbidité et/ou à une rugosité de surface accrue permettant une réflexion d'un plus grand nombre de points. Par opposition, ceci concorde avec Guenther *et al.* (2000) et Ouellet *et al.* (2003) qui mentionnent que les conditions d'eau calme (faiblement rugueuse) et claire (sans matière en suspension) seraient propices à l'absorption des impulsions LiDAR. Il semblerait donc que la rugosité favoriserait la réflexion des impulsions LiDAR, mais pour des conditions d'écoulement en deçà de la formation d'eaux vives (turbulences). La dimension maximale plus faible des discontinuités serait associée à une pente plus forte induisant une succession seuil/mouille plus courte (Ritter *et al.*, 2002).

Ensuite, en aval (1999), la localisation au niveau des mouilles de la majorité des discontinuités et la forte disparité des points en ces lieux s'expliqueraient par une inclinaison plus faible du lit et un débit moindre produisant des surfaces lisses et claires favorisant l'absorption d'une grande partie des impulsions LiDAR (Tableau 9) (Guenther *et al.*, 2000; Ouellet *et al.*, 2003). La dimension maximale plus grande des discontinuités serait associée à une pente du lit plus faible favorisant dans ce cas un enchaînement seuil/mouille plus long (Church, 1996).

D'autres facteurs pourraient aussi expliquer une partie de ces divergences, dont notamment des paramètres d'appareillage différents entre les deux moments de collecte et des facteurs environnementaux liés à l'interface air/eau aux moments des acquisitions (section 4.3.1.2). Néanmoins, les patrons de répartition spatiale des points semblent assez bien concorder avec la littérature, de sorte qu'il semble raisonnable d'affirmer que les caractéristiques hydrologiques et morphologiques respectives des sites survolés expliquent en bonne partie l'occurrence et la répartition des discontinuités spatiales observées.

4.2.3. Estimation de la précision verticale des points LiDAR réfléchis par la surface de l'eau à l'aide de données bathymétriques

D'après ce qui a été préalablement présenté dans la revue de bibliographique, il semble que le signal LiDAR PIR puisse être sujet à des phénomènes de pénétration/réflexion

dans la colonne d'eau (section 4.3.1.3). Les analyses menées ici visaient à vérifier l'occurrence de ces phénomènes dans le jeu de données LiDAR utilisé, d'en quantifier la magnitude le cas échéant, puis de vérifier si la rugosité de la surface et la profondeur pouvaient agir comme facteurs favorisant l'occurrence de ceux-ci. L'approche consiste à comparer l'altitude de la surface de l'eau issue des données LiDAR à celle acquise lors des relevés bathymétriques. La cote du plan d'eau issue de ces dernières données fut nommée ici niveau d'élévation de la surface de l'eau (NESE).

4.2.3.1. Analyse de la concordance des débits

Les deux jeux de données bathymétriques produits en 2003 et 2005 respectivement dans les secteurs des îlets et du lac du Délaiqué (section 5.2.1.1) furent mobilisés dans cette analyse. Selon les producteurs des données (Pagé et Leclair Géolocation), le NESE proviendrait d'un positionnement par GPS RTK et comporterait une erreur altimétrique inférieure à 5 cm. Afin d'assurer la comparabilité des niveaux des surfaces LiDAR et NESE, le débit présent lors de ces relevés bathymétriques devait concorder le plus possible avec celui présent lors du relevé LiDAR. Le Tableau 10 présente les débits quantifiés pour les différentes périodes de relevé bathymétrique. Ces débits furent obtenus en associant la date et l'heure de chaque relevé aux données de débits (section 5.2.1.1). Afin d'éviter les biais associés au temps de parcours de l'eau entre les sites des relevés et la position de la station en aval, les valeurs instantanées de débit furent moyennées sur une journée.

Tableau 10 : Débits associés aux différents relevés bathymétriques

Données bathymétriques	Lieu	Débit (m ³ /s)
Relevé 2003 jour 1	îlets	20
Relevé 2003 jour 2		54
Relevé 2005 jour 1	Lac du Délaiqué	10
Relevé 2005 jour x		na

En respect du débit des données LiDAR 1999 couvrant ces deux zones dont la valeur fut préalablement estimée à 24 m³/s, seuls les relevés 2003 jour 1 et 2005 jour 1 furent retenus pour l'identification et la quantification des phénomènes de pénétration/réflexion dans la colonne d'eau de même que pour l'évaluation du rôle de la profondeur comme facteur aggravant. Les données de 2003, jour 2, présentant un écart trop important pour

permettre une quantification, seront utilisées dans l'étape de caractérisation du rôle de la rugosité de la surface. Cette dernière, prenant la forme d'une analyse relative entre les zones en eaux vives et en eaux calmes à chaque site, ne nécessitait pas l'utilisation de mesures absolues (cet aspect sera abordé à la section 6.2.2.4). En ce qui a trait au second jour du relevé 2005, la date n'étant pas disponible, celui-ci a dû être mis de côté.

4.2.3.2. Quantification des phénomènes de pénétration/réflexion

4.2.3.2.1. Technique

i) Choix des sites :

Pour mener à bien ces comparaisons altimétriques entre les données LiDAR et bathymétriques sélectionnées, des zones cibles durent être identifiées. Celles-ci devaient notamment comporter un chevauchement entre les deux sources de données de même qu'une densité suffisante pour permettre une comparaison. Ainsi, deux zones correspondant aux conditions de chevauchement et de densité furent retenues (Figure 27). La première inclut les sites 1,1 et 1,2 et se situe dans le secteur du lac du Délaissé alors que la seconde contient les sites 2,1, 2,2 et 2,3 et est localisée dans le secteur des Îlets. À noter que, pour cette dernière zone, seul le site 2,1 sera utilisé dans la présente analyse.

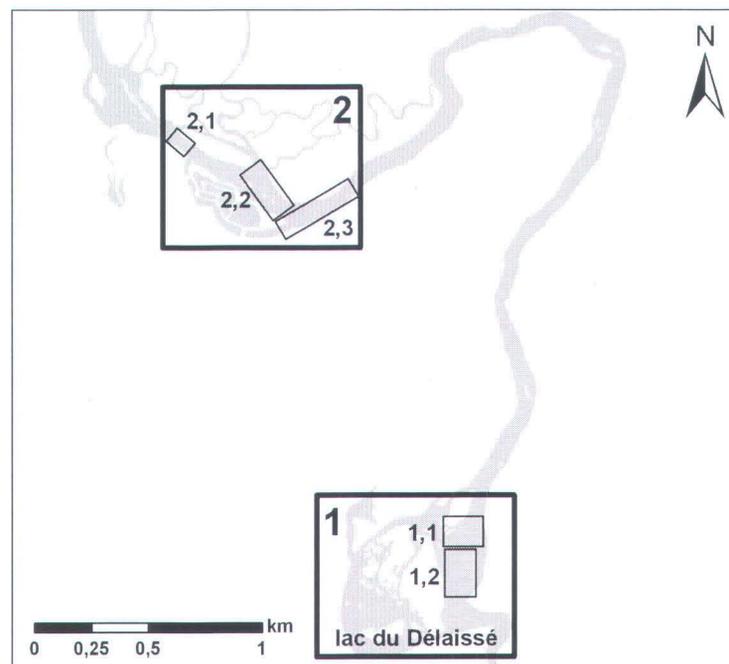


Figure 27 : Localisation des sites pour l'étude des phénomènes de pénétration/réflexion du signal LiDAR dans la colonne d'eau.

ii) Description des sites

Les sites 1,1 et 1,2 sont formés d'un même ensemble de points dont un sous-ensemble correspond aux eaux vives entrant dans le lac du Délaissé et l'autre aux eaux calmes du lac lui-même. Le site 2,1 quant lui, correspond à une mouille calme située entre deux seuils en eaux vives prenant place dans un tronçon parsemé de bancs alluviaux. Les caractéristiques hydrologiques de surface, soit « eaux calmes » et « eaux vives », présentées au Tableau 11 furent établies d'après la couverture d'orthophotos de 2006, présentant un débit semblable ($23 \text{ m}^3/\text{s}$) aux données de l'étude (bathymétrie et LiDAR).

Tableau 11 : Caractéristiques hydrologiques et effectifs de données aux sites d'analyse

Site	Surface	Δ débit (m^3/s)* ¹	N pts NESE* ²	N pts LiDAR* ³
1,1	Eaux vives	-14	1142	1453
1,2	Eaux calmes	-14	516	2243
2,1	Eaux calmes	-4	1061	> 289

*¹ : Écart de débit par rapport au débit du relevé LiDAR de $24 \text{ m}^3/\text{s}$.

*² : Nombre de points correspondant au niveau d'élévation de surface de l'eau utilisés pour l'analyse.

*³ : Estimé du nombre de points LiDAR utilisés pour créer les surfaces interpolées. Pour le site 2,1, étant donné que l'interpolation fut effectuée avec un rayon d'action de 375 m, le nombre de points utilisés pour générer la surface interpolée est supérieur au nombre de points contenu dans la zone analysée.

iii) Méthode d'analyse spatiale

L'analyse consista simplement à extraire l'altitude d'une surface interpolée à partir des points LiDAR en utilisant le semi de points NESE comme objet d'extraction. Cette requête fut effectuée à l'aide de la fonction *Extract values to points* sous ArcInfo 9.2®. Cette approche est semblable à celle utilisée par Hildall et Raff (2008). Au secteur 2,1, l'analyse fut effectuée à l'aide du MNT composite, dont nous verrons les étapes d'élaboration à la section 6.2.4.1 alors que pour le secteur 1, situé hors du site d'étude, une surface numérique fut produite à l'aide d'un interpolateur simple, *Inverse Distance Weight* (IDW), disponible dans le logiciel. Afin de s'assurer que des interpolations différentes n'allaient pas induire de biais dans l'analyse, celles-ci furent comparées en deux lieux sur la rivière. Ces analyses ont révélé des différences altimétriques de l'ordre de 5,2 et 4,1 mm, ce qui confirme la comparabilité des deux zones sélectionnées.

4.2.3.2.2. Résultats

Selon le Tableau 12, les sites testés présenteraient un niveau de pénétration moyen variant de 24 cm (site 1,1) à 44 cm (site 1,2). La valeur inférieure du site 1,1 (24 cm) serait possiblement liée à la dispersion altimétrique des données LiDAR interpolées à ce site (Tableau 13). Cette dispersion serait associée à une zone où la surface est légèrement surélevée par rapport au reste des données et se localise dans ce qui semble être une zone de recirculation. Il n'est donc pas impossible que de la matière en suspension (écume, matière organique, frazil ou autre) ait localement limité la pénétration du signal dans la colonne d'eau dans ce secteur. Il faut aussi mentionner que le débit associé aux sites 1,1 et 1,2 est inférieur au débit présent lors du relevé LiDAR (Tableau 11), ce qui induit une légère sous-estimation de la pénétration pour ces sites. Les valeurs maximales enregistrées pour chaque site indiquent quant à elles une relative homogénéité en se situant entre 52 et 61 cm et ne dépassent pas 1 m de profondeur.

Tableau 12: Pénétration enregistrée (en m) aux sites analysés

Site	Moyenne	σ	Min.	Max.
1,1	0,24	0,091	0	0,52
1,2	0,44	0,070	0,28	0,61
2,1	0,39	0,056	0,19	0,58

σ : Écart type (m)

Tableau 13: Dispersion des données de surface (en m) aux sites

Site	σ_Z surf.		Δz surf.	
	LiDAR	NESE*	LiDAR	NESE
1,1	0,086	0,027	0,48	0,16
1,2	0,055	0,035	0,24	0,18
2,1	0,054	0,018	0,37	0,21

σ : Écart type (m)

Δz : Soustraction de la valeur maximale et de la valeur minimale (m)

* NESE: Niveau d'élévation de la surface de l'eau (m)

4.2.3.3. Rôle de la profondeur dans l'occurrence des phénomènes de pénétration/réflexion

4.2.3.3.1. Technique

Cette analyse fut effectuée à partir des mesures obtenues des trois mêmes sites mentionnés précédemment. La mesure de la profondeur fut obtenue en soustrayant la cote

du fond de celle du niveau de surface à partir des données bathymétriques. Par la suite, les données de profondeur furent croisées avec les données de pénétration pour obtenir un coefficient de corrélation pour chaque site.

4.2.3.3.2. Résultats

Les valeurs de corrélation présentées au Tableau 14 n'indiquent pas une tendance générale. Ainsi, pour les sites 1,2 et 2,1, la pénétration augmenterait avec la profondeur, comme l'indiquent les valeurs de corrélation respectives de 0,56 et 0,13, alors que pour le site 1,1, il semblerait plutôt que la pénétration diminuerait en fonction de la profondeur, comme l'indique la corrélation de -0,63.

Tableau 14 : Profondeurs moyennes (en m) et valeur de corrélation entre la profondeur et la pénétration du signal LiDAR aux différents sites

Site	Prof. Moy.	σ Prof.	Coeff. Corr.
1,1	2,26	1,14	-0,63
1,2	3,48	1,07	0,56
2,1	1,03	0,55	0,13

σ : Écart type (m)

Corr. : Coefficient de corrélation

Il est possible que cette dernière valeur ait été biaisée dans une proportion indéterminée par l'incongruité de la surface LiDAR à ce site, comme ce fut mentionné précédemment (section 4.2.3.2.2). Ces contradictions statistiques semblent néanmoins indiquer que la profondeur n'est pas un paramètre clef dans l'intensité des phénomènes de pénétration/réflexion dans la colonne d'eau.

4.2.3.4. Rôle de la rugosité de la surface dans la magnitude des phénomènes de pénétration/réflexion

4.2.3.4.1. Technique

Ces analyses consistent à comparer le degré de pénétration relative enregistré au niveau des surfaces rugueuses (eaux vives) et lisses (eaux calmes) dans une même zone.

i) Choix des sites

Deux zones furent sélectionnées pour cette analyse. La première (1) inclut les sites 1,1 et 1,2 préalablement mentionnés et la seconde (2) englobe deux nouveaux sites (2,2 et 2,3) positionnés dans le secteur des Îlets. Tout comme ceux déjà établis (section 6.2.2.2), ces nouveaux sites furent positionnés en fonction du chevauchement spatial entre les données

bathymétriques et LiDAR et de façon à rencontrer des effectifs de points suffisants pour permettre des comparaisons. Malgré une différence importante de débit par rapport au relevé LiDAR 1999, le relevé bathymétrique de 2003, jour 2, fut préféré à celui effectué au jour 1 pour cette zone (Tableau 10). La raison de ce choix repose sur la grande étendue de celui-ci par rapport à l'étendue très restreinte de celui produit au jour 1. L'utilisation de jeux de données impliquait cependant que les valeurs de pénétration extraites à partir de celui-ci ne puissent pas être interprétées comme des valeurs réelles, d'où l'idée de les utiliser de façon relative, soit en établissant la différence entre le niveau de pénétration dans un site en eaux vives et d'un site en eaux calmes dans une même zone.

ii) Description des sites

Les sites 1,1. (eaux vives) et 1,2 (eaux calmes) sont les mêmes que ceux utilisés à la section 6.2.2.3. Les sous-zones 2,2 (eaux vives) et 2,3 (eaux calmes) quant à elles se situent respectivement 400 m et 600 m en aval du site 2,1. La première prend place sur un seuil moyennement incliné où se retrouvent quelques petits bancs alluviaux et la deuxième se localise à la sortie du secteur des Îlets, en bordure de la rue des Trois-Saults, où l'écoulement est très lent.

iii) Méthode d'analyse spatiale

La méthode d'analyse spatiale visant à mesurer la pénétration relative dans ces sous-zones relève de la même technique que celle présentée à section 6.2.2.2.

4.2.3.4.2. Résultats

Le Tableau 15 indique le niveau de pénétration moyen extrait des sites de chaque zone d'analyse ainsi que le nombre de points NESE utilisés pour l'extraction. Il est important de rappeler que les mesures de pénétration enregistrées à la zone 2 sont surestimées en raison d'un débit plus important ($54 \text{ m}^3/\text{s}$) que celui associé au relevé LiDAR 1999 ($24 \text{ m}^3/\text{s}$) et qu'elles ne doivent pas être interprétées comme des valeurs absolues.

Tableau 15: Pénétration moyenne du signal LiDAR (en m) en fonction de la rugosité de la surface de l'eau

Zone	Site	Surface	Péné. moy.	σ péné.	n
1	1,1	Eaux vives	0,239	0,091	1142
	1,2	Eaux calmes	0,439	0,070	516
2	2,2	Eaux vives	0,603	0,080	789
	2,3	Eaux calmes	0,707	0,057	441

σ : Écart type (m)

En revanche, les valeurs de pénétration relative présentées au Tableau 16 indiquent que la pénétration serait de 14,6 % (zone 2) à 45,6 % (zone 1) plus importante dans les zones à surface lisse (eaux calmes). Bien que la valeur de 46 % associée à la zone 1 soit possiblement gonflée par l'occurrence de facteurs environnementaux tels que mentionnés précédemment (section 6.2.2.2.2), les sites en eaux calmes, présentant des surfaces lisses, sembleraient en effet amplifier la pénétration du signal dans la colonne d'eau. Sur ce point, ces observations corroborent celles de Ouellet *et al.* (2003).

Tableau 16 : Différences relatives de pénétration entre les sites en eaux calmes et en eaux vives par zone

Zone	Diff. (%)	Diff. (m)	n total
1 (1,1 et 1,2)	45,6	0,20	1658
2 (2,2 et 2,3)	14,6	0,10	1230

4.2.3.5. Sommaire

Les observations effectuées précédemment permettent de mettre en lumière l'occurrence de phénomènes de pénétration/réflexion du signal LiDAR dans la colonne d'eau au sein du relevé LiDAR utilisé pour cette étude. Le faible nombre de sites ayant permis la vérification de l'occurrence de ces phénomènes, ne permet toutefois pas de préciser si ces biais de détection de la surface de l'eau sont systématiques ou non.

La magnitude moyenne de ces phénomènes fut estimée à 41,5 cm ($\sigma = 6,3$). Cette valeur fut obtenue en excluant les mesures de pénétration absolue du site 1,1 et en moyennant les valeurs des sites 1,2 et 2,1. La valeur moyenne du site 1,1 fut exclue en raison de certains biais possiblement associés à des facteurs environnementaux conduisant à sous-estimer la pénétration en ces lieux. Il est important de mentionner que la valeur proposée de 41,5 cm peut inclure certains biais difficilement quantifiables, notamment un certain degré de

généralisation associé au faible nombre de sites de validation, des fluctuations du niveau du lit entre le moment du relevé LiDAR et les relevés bathymétriques ainsi que divers facteurs environnementaux associés à l'interface air/eau (section 2.3.1.2). C'est pourquoi cette donnée ne doit pas être interprétée comme étant une valeur incontestable ou définitive, mais plutôt comme une indication sur l'ordre de grandeur des phénomènes de pénétration/réflexion pouvant survenir dans les données LiDAR couvrant le site d'étude.

Quant aux facteurs favorisant l'occurrence des phénomènes de pénétration/réflexion dans la colonne d'eau, la profondeur ne semble pas déterminante, alors que, en revanche, la rugosité de la surface de l'eau semble intervenir dans leur amplitude. Ainsi, selon ce qui a été observé, les zones en eaux calmes favorisaient une pénétration plus importante. Les mouilles seraient par conséquent plus propices à une pénétration profonde. Or, comme ce fut illustré précédemment, dans le cas du relevé LiDAR couvrant la Montmorency, beaucoup de points LiDAR tendraient à être absorbés dans ces environnements (section 4.2.2). Ceci suggère en ce sens que l'occurrence de ces phénomènes de pénétration/réflexion serait en partie limitée par les phénomènes d'absorption dans les zones en eaux calmes et que ces erreurs seraient alors plus fréquentes, mais d'une magnitude moindre, au niveau des seuils.

En définitive, bien que la précision verticale des points LiDAR réfléchis par la surface de l'eau puisse être entachée d'une incertitude, ceux-ci demeurent utilisables moyennant la prise en compte de ces imprécisions.

4.2.4. Expérimentation de méthodes d'interpolation pour les données LiDAR

Cette section consiste à évaluer l'efficacité de certains interpolateurs utilisés en lien avec les données LiDAR. Les analyses effectuées ici sont à la fois d'ordre quantitatif (statistique) et qualitatif (graphique). Les différents interpolateurs furent d'abord testés sur l'ensemble du jeu de données LiDAR circonscrit au site d'étude, puis sur un sous-ensemble de données constitué de points correspondant au chenal de la rivière (surface de l'eau). Les MNT découlant de ces interpolations furent nommés respectivement MNT globaux et MNT eau. La création d'un MNT eau indépendant visait à accroître la fiabilité du MNT final au niveau du chenal, notamment dans les zones présentant des

discontinuités spatiales dans le relevé LiDAR. Les MNT offrant les meilleurs résultats furent ultimement assemblés pour donner le MNT final, nommé MNT composite. Comme ces analyses allaient conduire au choix de méthodes d'interpolation optimales, les résultats des analyses sont présentés au sein même de cette section.

4.2.4.1. Méthodes d'interpolations testées

Quatre méthodes d'interpolation furent évaluées. Les noms français et anglais de celles-ci figurent ci-après. Dans le but de simplifier la lecture, leur abréviation anglophone sera utilisée dans le texte. Ces quatre interpolations sont disponibles dans le logiciel ISATIS 8.02®, un outil informatique dédié aux géosciences.

- Krigeage avec spline (*Spline Krigging*) (*SK*)
- Krigeage linéaire (*Linear Krigging*) (*LK*)
- Inverse de la distance (*Inverse Distance weight*) (*IDW*)
- Méthode du plus proche voisin (*Nearest Neighbour*) (*NN*)

L'interpolateur SK est basé sur une méthode de krigeage ordinaire utilisant une fonction intrinsèque aléatoire (*Intrinsic Random Function*) d'ordre 1 et une fonction spline généralisée (*thin plate spline*). L'interpolateur LK basé aussi sur le krigeage ordinaire utilise un variogramme linéaire (Manuel d'utilisateur d'ISATIS 8.02®, 2009). Pour IDW, la puissance associée à la distance est de 2, soit l'inverse de la distance au carré. La méthode NN ne présente quant elle aucune spécificité particulière.

À noter que l'interpolateur spline proprement dit fut exclu d'entrée de jeux, suite à une analyse visuelle effectuée *via* Spatial Analyst sous ArcInfo 9.2®. En effet, pour éviter des artefacts majeurs dans les zones à faible densité de points, le niveau de tension du spline devait être augmenté, ce qui conduisait à atténuer certains reliefs, notamment par endroits, le profil des berges. Il en fut de même pour l'interpolateur TIN (type Delaunay) qui produisit des résultats graphiques trop grossiers dans les zones à faible densité et des surfaces d'allure chiffonnée (trop de facettes) dans les zones à forte densité.

4.2.4.2. Procédure de création et de validation des MNT

4.2.4.2.1. Outils et paramètres techniques pour la création des MNT

Les quatre interpolations furent testées à l'intérieur du logiciel ISATIS 8.02®. Le fonctionnement du logiciel impliquait l'utilisation d'une grille d'interpolation constituée

d'un semis de points à intervalle régulier. Considérant la densité moyenne du jeu de données LiDAR (1 point au 3,37 m), l'intervalle des points de la grille fut fixé à 1 m. La finesse de la grille permettait ainsi de capter la pleine densité des données sans générer trop d'information interpolée entre les mesures proprement dites.

Les paramètres utilisés furent les mêmes pour chaque interpolation, soit un rayon de recherche de 400 m, un nombre de 6 cadrans ainsi qu'un nombre minimum et maximum respectivement de 1 et 10 points par cadran. La longueur du rayon de recherche fut fixée par rapport à la longueur de la plus grande zone sans point de mesure. Le nombre de cadrans fut établi à 6 pour assurer un balayage spatial bien réparti des valeurs servant à l'interpolation. Ainsi, le nombre de points LiDAR considérés dans le calcul d'un point de grille pouvait varier de 6 à 60. La grille de points portant les valeurs interpolées fut ultimement exportée dans le logiciel ArcInfo 9.2® et transformée en une surface matricielle continue. Ainsi, chaque point de la grille fut transformé en un pixel d'un mètre linéaire.

4.2.4.2.2. Circonscription des points LiDAR situés dans le chenal

La création du MNT eau nécessita l'extraction des points LiDAR se trouvant dans le chenal. Pour ce faire, un polygone servant à extraire les données fut élaboré à partir d'images aéroportées précises. Afin d'assurer la concordance spatiale entre la limite du chenal retrouvée sur les images et la limite eau/terre des données LiDAR, les images devaient présenter un débit conforme à ceux enregistrés au moment des acquisitions LiDAR 1999 et 2000, soit respectivement 24 m³/s et 49 m³/s. La couverture d'orthophotos couleur de 2007 présentant un débit constant de 22 m³/s et des pixels de 10 cm fut notamment mise à profit dans cette opération.

Une étape de restructuration manuelle des limites du polygone en question fut subséquemment effectuée à proximité des pieds de berges afin d'éviter d'incorporer des points situés en berge, ce qui aurait ultimement faussé localement l'interpolation. Cette tâche fut effectuée en affichant l'altitude des points LiDAR et en amendant localement la limite du polygone. Cette approche fut notamment utile dans les zones présentant d'importantes discontinuités au niveau des données LiDAR. En ces lieux, la moyenne altimétrique des points situés respectivement en amont et en aval de la zone sans données

fut localement effectuée. Les points situés immédiatement en pied de berge et dont l'altitude se situait dans l'intervalle de ces valeurs (entre l'altitude moyenne de l'amont et le niveau moyen en aval) étaient incorporés aux valeurs LiDAR « eau » *via* l'amendement de la limite du polygone. Cette technique permettait de sélectionner les points en fonction de leur altitude, et non seulement en fonction de leur localisation sur terre ou sur l'eau d'après les images aéroportées. En somme, cette approche permit d'extraire 37 218 points LiDAR situés dans le chenal.

4.2.4.2.3. Procédures de validation

La validation statistique des MNT fut effectuée à l'aide d'une technique courante de validation croisée (Anderson *et al.*, 2005; Chaplot *et al.*, 2006; Charlton *et al.*, 2003). Celle-ci consiste à extraire la valeur Z de la surface interpolée à partir de points LiDAR préalablement mis de côté avant l'interpolation et à comparer statistiquement les deux cotes. Pour ce faire, un échantillon de 10000 points témoins fut extrait aléatoirement du relevé LiDAR recouvrant tout le site. Cette étape fut effectuée dans Matlab 7.1 *via* l'attribution aléatoire de 0 et de 1 et compléter dans ArcInfo 9.2® à l'aide d'une requête d'extraction portant sur ce champ. Le nombre de points LiDAR utilisés pour la création des MNT globaux, passa en définitive de 309753 à 299753, soit une légère réduction de 1,03%. Pour les MNT, cette attribution aléatoire conduisit à donner 1218 points de validation pour faire passer le nombre points d'interpolation de 37217 à 35999.

Les analyses statistiques effectuées à partir des points témoins furent basées sur les différences obtenues en soustrayant la cote du point LiDAR de la cote de la surface interpolée (MNT-LiDAR), et aussi sur la corrélation entre ces deux mêmes cotes altimétriques (coefficient de corrélation). Pour exprimer les différences altimétriques entre la valeur LiDAR et la valeur du MNT, les descripteurs statistiques utilisés furent la moyenne absolue, *i.e.* la différence positive ou négative entre les deux mesures, et les valeurs minimale et maximale brutes. En complément, une requête visant à déterminer le nombre de points présentant une erreur absolue supérieure ou égale à une valeur de 1 m (MNT global) et de 20 cm (MNT eau) fut effectuée.

Les analyses statiques ne fournissant qu'une indication de la précision des MNT et ne garantissant pas systématiquement des résultats graphiques en accord avec la réalité

terrain, un second type de validation fut effectuée. Celui-ci consistait en des analyses graphiques prenant la forme d'observations en plan. Ces observations s'avérèrent très utiles pour identifier certains artéfacts d'interpolation et incohérences spatiales indétectables par la validation croisée. Pour les MNT eau, une méthode de visualisation en coupe fut ajoutée aux observations en plan. Celle-ci consistait à extraire la cote des MNT « eau » à partir de points espacés aux 2 m correspondant à une ligne située au centre du chenal principal⁹. Les données ainsi extraites permirent de produire des profils sous forme de graphiques dans le logiciel Microsoft Excel 2003®.

4.2.4.3. Tests d'interpolation sur tout le domaine

4.2.4.3.1. Résultats statistiques

D'après le Tableau 17, les valeurs des moyennes absolues révèlent que les interpolations par krigeage (SK et LK) donnent les meilleurs résultats. Cette tendance se reflète par ailleurs dans les autres paramètres statistiques. Ainsi SK semble la méthode la plus précise suivie de près par LK. IDW présente des résultats statistiques moins bons que SK et LK, alors que NN termine dernière. La performance relative des interpolateurs est notamment bien illustrée *via* le nombre de points présentant une différence altimétrique supérieure ou égale à un mètre. Spatialement, ces erreurs importantes se localisent dans des secteurs localement accidentés, tels des pieds de versant ou de berge, et dans les zones à faible densité.

Tableau 17: Résultats statistiques issus de la validation croisée effectuée sur les MNT globaux produits à l'aide de différents interpolateurs

Interpolateur	Différences altimétriques* ¹ (m)			Nbr. pts. avec erreur absolue >= 1 m	Coeff. Corr.* ²
	Moyenne absolue	Min. brute	Max. brute		
SK	0,12751	-2,42	3,07	39	0,999907
LK	0,12755	-2,46	3,23	41	0,999905
IDW	0,21348	-3,15	5,07	222	0,999713
NN	0,23620	-4,68	5,01	452	0,999581

*¹ : Les différences altimétriques furent obtenues en soustrayant la valeur du MNT de la valeur LiDAR (MNT-LiDAR).

*² : Coefficient de corrélation

⁹ La technique d'élaboration de la ligne centrale du chenal sera présentée à la section 4.3.3.2.1

4.2.4.3.2. Résultats graphiques

Les sites d'observations graphiques sélectionnés représentent des zones distinctes au niveau de leur morphologie locale et de la répartition spatiale des données LiDAR s'y retrouvant.

i) Secteur de la rue Parent

Le secteur de la rue Parent (borne 8,5) présente un chenal relativement encaissé où la pente du lit y est assez inclinée (eaux vives). La quantité et la distribution spatiale des points sont grandement contrôlées par la présence d'une végétation dense en période de feuillaison au moment de production du relevé dans ce secteur (juin 2000). Ceci expliquerait la faible quantité de points de mesure LiDAR présents en berge est (Figure 28a). En revanche, au niveau du chenal, on retrouve une quantité acceptable de points avec une répartition relativement homogène (Figure 28a).

Visuellement, dans ce secteur, IDW (Figure 29c) et NN (Figure 29d) offrent des résultats graphiques divergents des autres interpolateurs, alors que LK (Figure 29) et SK (Figure 29b) indiquent des similitudes importantes. Cependant, au contraire de son homologue LK (Figure 29a), SK (Figure 29b) affiche quelques petites cavités asymétriques en pieds de berge ouest ainsi que de petits bombements d'allure étirée en rive est. Ces imperfections se situent notamment dans des secteurs présentant une densité localement plus faible. Les irrégularités particularisant IDW (Figure 29c) prennent la forme de plusieurs petits bombements et creux dont les plus visibles se situent à l'est de la rivière et en pied de berge ouest. La présence de points réfléchis par des arbres ou arbustes ne permettrait pas d'expliquer toutes ces formes étant donné qu'elles ne sont pas seulement constituées de pointes, mais aussi de creux tout aussi pointus. Elles sembleraient donc provenir de l'amplification locale d'inégalités présentes dans les données sources. L'interpolateur NN (Figure 29d) quant à lui se distingue par des formes saccadées prenant la forme d'échelons incongrus par rapport à la réalité terrain.

ii) Secteur des Îlets

Le secteur des Îlets (borne 2) présente une topographie beaucoup plus douce avec un chenal moins encaissé et une faible inclinaison du lit (eaux calmes). La répartition spatiale des points de mesure LiDAR y est toutefois fort hétérogène. Ainsi, la densité est forte en

berge est, faible en berge ouest et nulle au niveau du chenal principal (Figure 28b). La très faible quantité de points en berge ouest s'expliquerait par la densité de la végétation et l'inclinaison du talus en ce lieu, alors que la discontinuité majeure au niveau du chenal proviendrait de phénomènes d'absorption.

Graphiquement, en plus de retrouver globalement les mêmes difformités que celles préalablement identifiées dans le secteur de la rue Parent, des artéfacts majeurs sont observables au niveau du chenal (Figure 29 e, f et g). IDW (Figure 29g) semble offrir les meilleurs résultats au niveau de la surface de l'eau, mais sa partie située en pieds de berge présente toujours de petites incongruités (cavités pointues). La quasi-absence de points de mesure dans le chenal apparaît donc déterminante dans l'occurrence de défauts d'interpolation.

4.2.4.3.3. Sommaire : choix de l'interpolateur optimal

Au niveau statistique, SK ressort comme étant le meilleur interpolateur. Cependant, au niveau graphique, ce dernier a manifesté certaines lacunes prenant la forme de petits bombements étirés en berge, de petites cavités anguleuses et d'incongruités importantes au niveau du chenal. En tenant compte de ces dernières observations graphiques, LK ressort comme l'interpolateur le plus approprié. LK présente en outre sensiblement le même nombre (37) de points aberrants (erreur supérieure à 1 m) que SK (36), ce qui indique une sensibilité moindre aux variations topographiques locales mentionnées ci-avant. Par contre, tout comme les autres méthodes d'interpolation, LK présente une lacune au niveau du chenal, notamment dans les discontinuités spatiales du LiDAR. Dans cette optique, il convenait d'isoler les points LiDAR correspondant à la surface de l'eau afin de mieux contrôler le comportement de l'interpolateur dans les zones problématiques.

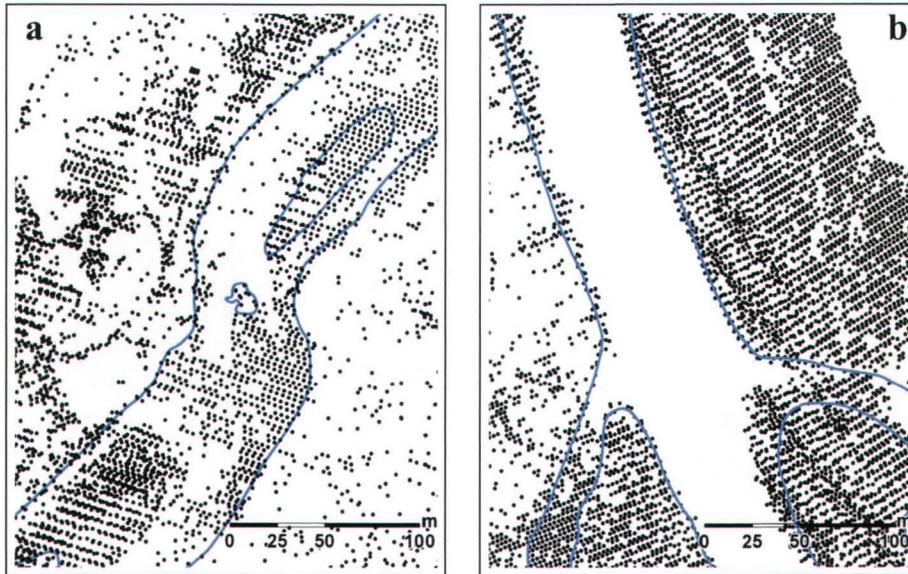


Figure 28 : Répartition des points de mesure LiDAR. (a) secteur de la rue Parent (borne 8,5), (b) secteur des Îlets (borne 2).

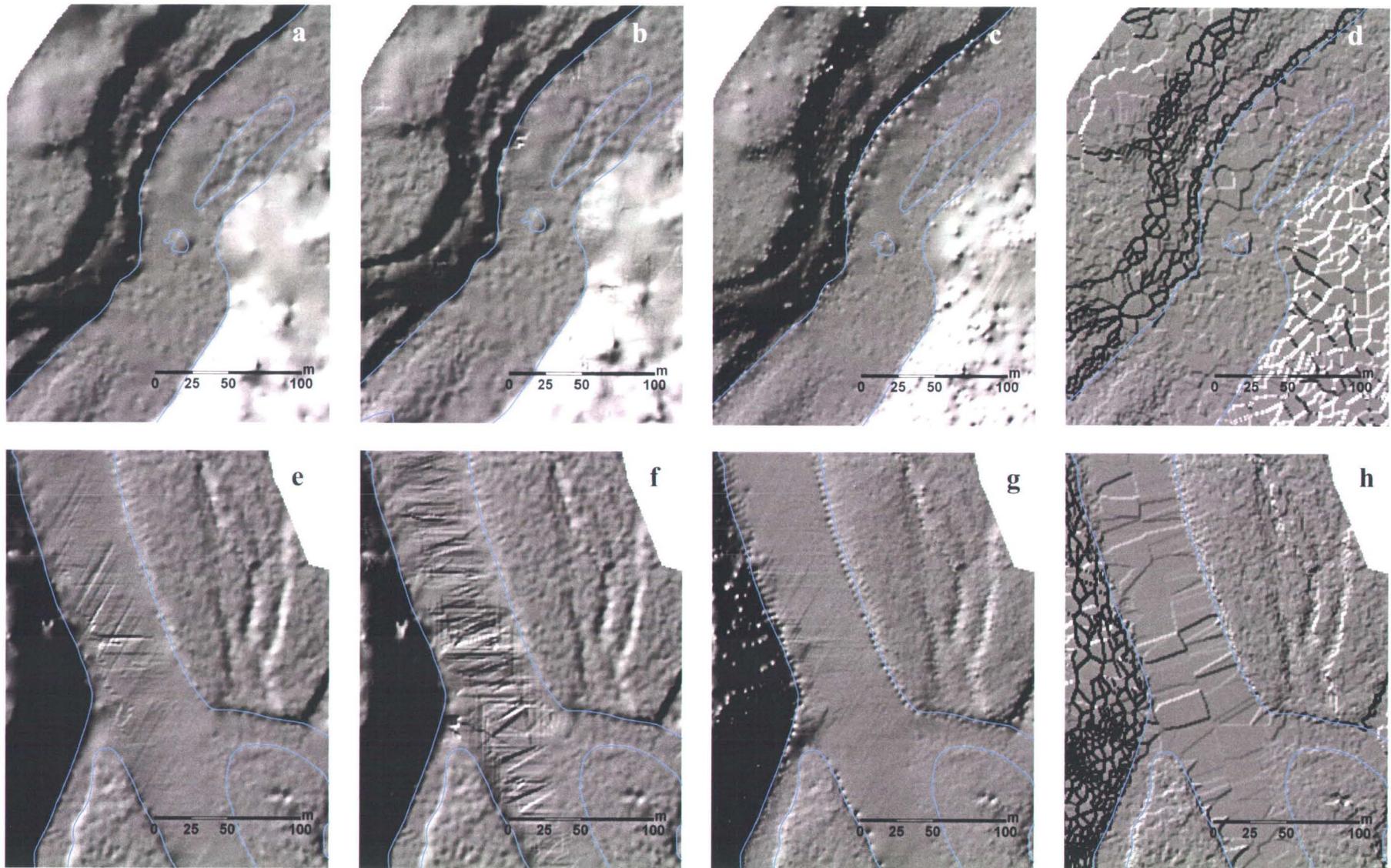


Figure 29 : Résultats graphiques en plan des interpolateurs dans les secteurs de la rue Parent (a, b, c et d) et des Îlets (e, f, g et h). Krigeage linéaire (LK): (a) et (e), Krigeage avec spline (SK): (b) et (f), Inverse de la distance (IDW): (c) et (g), Plus proche voisin (NN): (d) et (h).

4.2.4.4. Tests d'interpolation sur le sous-domaine du chenal

Comme il fut mentionné précédemment, les interpolateurs testés présentaient tous des difficultés au niveau du chenal, particulièrement dans les zones correspondant à des discontinuités dans les données LiDAR.

Ainsi, la technique présentée ici visait à exclure les points situés sur terre pour permettre aux interpolateurs d'utiliser un voisinage plus homogène spatialement (faible dispersion en Z) centré uniquement sur le chenal et pour favoriser la production de surfaces plus lisses représentant mieux l'aspect de l'eau. La réduction de la dispersion altimétrique des points serait particulièrement efficace pour les interpolateurs basés sur le Krigeage (Chaplot *et al.*, 2006). Dans l'éventualité où le comportement des interpolateurs risquait de diverger dans ce nouveau contexte topographique LK, SK et IDW furent testés. NN fut exclu en raison de ses piètres performances illustrées précédemment.

À noter que l'incorporation d'une limite spatiale d'interpolation, en l'occurrence une ligne de berge, aurait pu être envisagée pour contourner ce problème. Cette fonction, courante dans les SIG commerciaux, permettrait de contraindre l'interpolation à des zones données *via* l'incorporation de barrières spatiales sous forme de polylignes. L'expérimentation préalable de cette technique dans ArcInfo 9.2® a toutefois révélé que des ruptures de pente entre les domaines situés de part et d'autre de la ligne en question pouvaient ultimement induire des biais au niveau de la variable d'inclinaison de la berge. De plus, en termes informatiques, le temps de traitement associé à cette technique est considérable. À titre d'exemple, un calcul impliquant IDW, un interpolateur simple (non géostatistique) effectué sur une machine de puissance convenable (Intel Pentium 4, 3,4 GHz possédant deux gigaoctets de mémoire vive) a pris plus de 80 heures. Le krigeage significativement plus lourd sur le plan informatique (Lloyd et Atkinson, 2002, 2006) aurait alors nécessité plus d'une centaine d'heures de calcul. Il fut donc décidé d'aller de l'avant avec un sous-modèle centré essentiellement sur les points LiDAR renvoyés par la surface de l'eau.

4.2.4.4.1. Résultat statistiques

D'abord, fait intéressant, les performances respectives des interpolateurs les font se classer à l'inverse des résultats présentés pour les MNT globaux (Tableau 18). Ainsi, IDW passe au premier rang et SK se retrouve en dernier, alors que LK demeure bon deuxième. Tout comme pour les MNT globaux, les différences ne sont que minimales statistiquement (Tableau 18). En complément à la statistique déterminant le nombre de points présentant une erreur altimétrique supérieure 0,2 m, soit plus grande que l'erreur altimétrique du jeu de données, il est intéressant de mentionner que IDW, LK et SK regroupent respectivement 67%, 74% et 75% de ces erreurs dans la portion du relevé acquis en 2000. Ceci illustre bien la rugosité supérieure de la surface de l'eau dans ce relevé en lien avec les conditions hydrologiques plus dynamiques présentes au moment de l'acquisition et l'inclinaison plus prononcée du lit de ce secteur.

Tableau 18: Résultats statistiques issus de la validation croisée effectuée sur les MNT eau à l'aide de différents interpolateurs

Interpolateur	Différences altimétriques* ¹ (m)			Nbr. pts. avec erreur (abs) >= 0,2 m	Coeff. Corr.* ²
	Moyenne absolue	Min. brute	Max. brute		
IDW	0,078	-0,725	0,448	68	0,999958
LK	0,081	-0,708	0,442	76	0,999957
SK	0,088	-0,717	0,533	100	0,999949

*¹ : Les différences altimétriques furent obtenues en soustrayant la valeur du MNT de la valeur LiDAR (MNT-LiDAR).

*² : Coefficient de corrélation

4.2.4.4.2. Résultats graphiques

i) Profils en coupe

Les résultats des profils en coupe figurent en totalité en annexe 3. Un patron net se dégage de ces analyses. En effet, dans les zones présentant une forte densité de points, les interpolateurs produisent des résultats forts similaires (Figure 30a). Par contre, dans les zones de très faible densité, leur comportement tend à être fort différent (Figure 30 a et b). Ainsi, on constate que le krigeage avec spline offre de piètres résultats dans ces environnements (Figure 30 a et b), alors que l'inverse de la distance de même que le krigeage linéaire offrent des résultats de beaucoup supérieurs (Figure 30a). Toutefois, bien que ces deux interpolateurs performant bien dans les zones à faible densité, IDW

peut donner lieu à quelques phénomènes de surestimation locale des cotes altimétriques (flèches Figure 30 a et b).

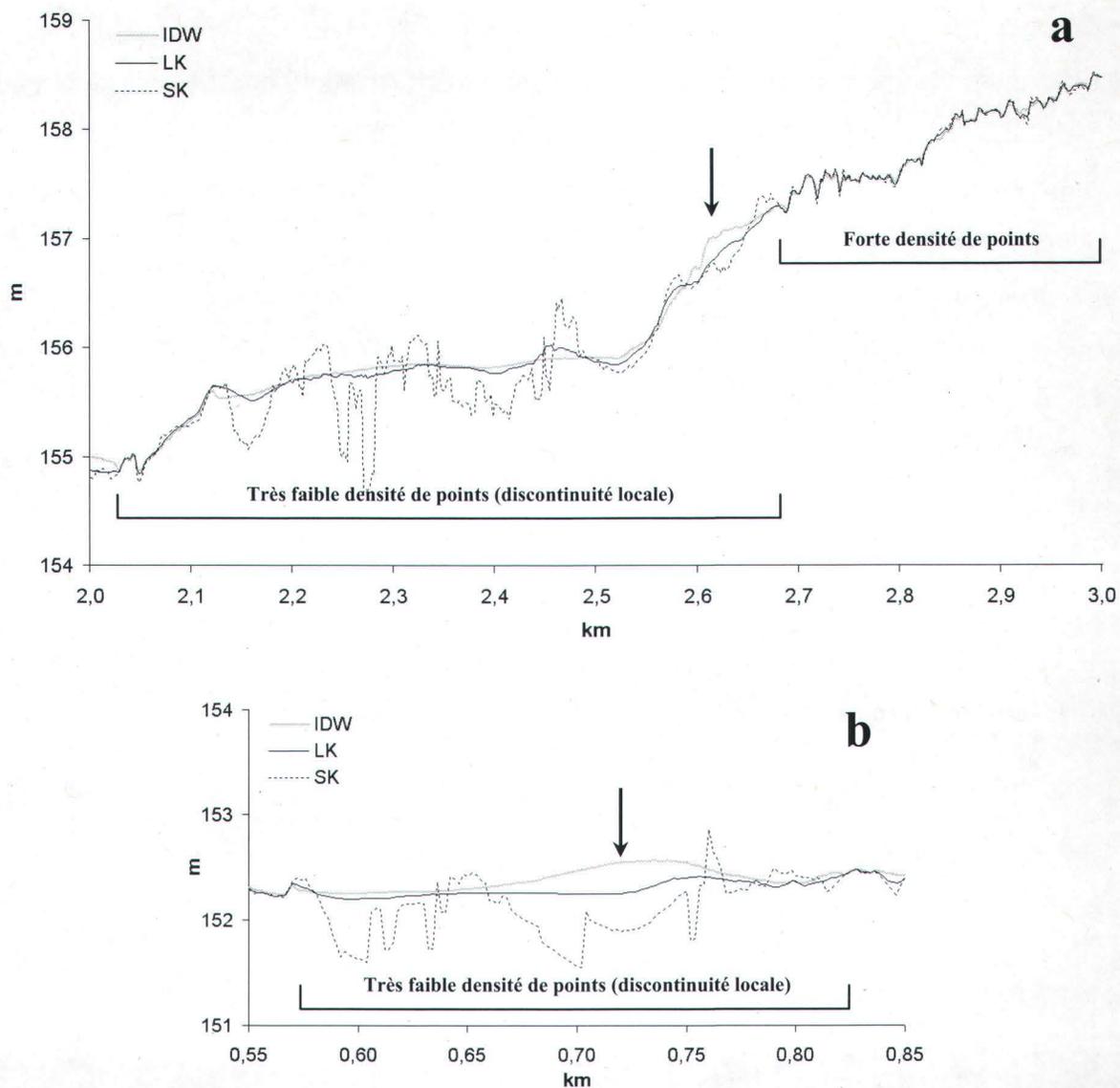


Figure 30 : Profils en coupe produits à partir des MNT eau illustrant le comportement des interpolateurs inverse de la distance (IDW), krigeage linéaire (LK) et krigeage avec spline (SK) en fonction de la densité des données LiDAR. Exagération verticale de 100 (a) et de 50 (b).

ii) Analyses en plan

La Figure 31, illustrant un secteur localisé dans le secteur de la rue des Trois-Saults (borne 0,5), présente un cas typique de l'influence de la densité locale des données sur les résultats graphiques. Ainsi, l'extrémité droite des Figure 31 a, b et c, pourvue d'une bonne densité de points LiDAR, indique des résultats globalement semblables; l'extrémité gauche, où la densité est moindre, présente certaines dissemblances; et

finalement le centre, où seulement quelques points de mesure sont présents en berge, illustre des artéfacts importants du côté SK. Il est alors possible de déduire que le type SK n'est pas approprié. En revanche, IDW (Figure 31a) et LK (Figure 31b) donnent dans l'ensemble de bons résultats. IDW semble toutefois encore sujet aux phénomènes de pointes et de creux mentionnés précédemment dans le texte (section 6.2.3.3.2) (extrémités de la Figure 31a), alors que LK indique de légers artéfacts dans la zone centrale (Figure 31b). Finalement, l'allure de la surface d'IDW au centre du chenal indique un léger bombement (flèche Figure 31a) associé à la présence d'un point aberrant en berge, alors que du côté de LK, l'impact de ce même point se fait sentir beaucoup moins loin dans le chenal (Figure 31b).

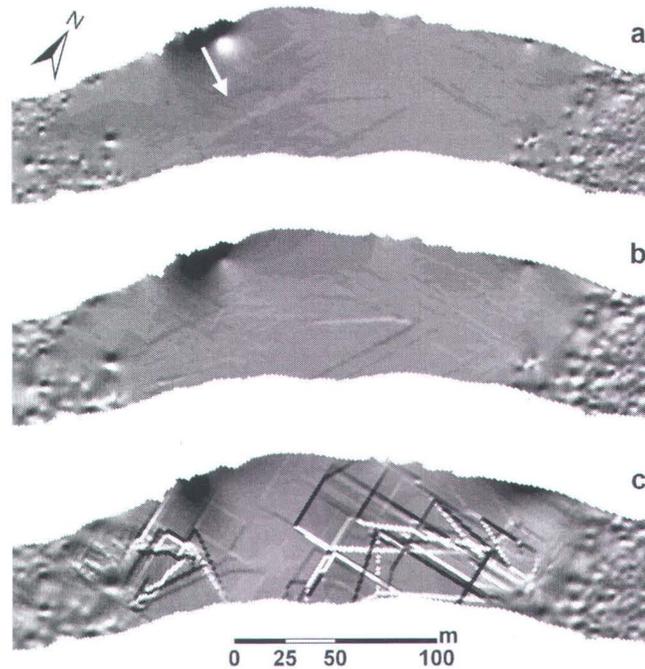


Figure 31 : Résultats graphiques des interpolateurs dans le secteur des Trois-Saults. (a) Inverse de la distance (IDW), (b) krigeage linéaire, (c) krigeage avec spline.

4.2.4.4.3. Sommaire : choix de l'interpolation optimale

Les résultats statistiques de la validation croisée indiquent que l'interpolation la meilleure du point de vue statistique serait IDW. Cependant, les résultats des analyses des profils en coupe indiquent que cet interpolateur tend à générer des surestimations locales en partie associées à l'effet de propagation de points dissidents dans le chenal. Visuellement, ce même interpolateur génère de petits artéfacts en forme de pointes et de creux aigus. Quant à SK, bien que donnant de résultats statistiques acceptables, il ne présente aucun avantage

au plan visuel, notamment dans les zones de faible densité de points. En somme, de par l'absence d'artéfacts majeurs, un certain avantage au niveau du contrôle de la propagation de l'influence de points aberrants et des résultats statistiques conséquents, l'interpolateur LK (krigeage linéaire) ressort une seconde fois le plus approprié.

4.2.5. MNT final

4.2.5.1. Procédure d'assemblage et de validation

i) Assemblage

Les MNT eau et MNT global produit par krigeage linéaire furent fusionnés pour donner le MNT final, soit le MNT composite. L'assemblage des deux surfaces matricielles fut réalisé à l'aide de la fonction *Single output Map Algebra* sous ArcInfo 9.2® en donnant priorité au MNT eau. Le montage fut facilité par le fait que le MNT eau chevauchait en totalité le MNT global évitant ainsi de générer des zones sans donnée à la jonction des deux surfaces. L'utilisation de points LiDAR communs lors de la création des MNT permit aussi d'assurer ultimement une transition douce entre les deux modèles assemblés, ce que n'aurait pas permis une structuration en deux jeux de données adjacents. En effet, la fragmentation complète du jeu de données au niveau du pied de berge aurait privé l'interpolateur de points essentiels au niveau spatial lors de la création du MNT correspondant à la berge, ce qui aurait pu induire des résultats biaisés dans ces zones.

ii) Validation

La technique consistait simplement à opposer l'altimétrie du MNT composite et du MNT global afin d'évaluer les améliorations apportées. Puisque la partie située sur terre est identique aux deux modèles, la comparaison fut limitée uniquement au chenal. La forme des analyses demeure la même que les précédentes avec une part de validation croisée et une part de représentation graphique à l'aide de profils en coupe et de vues en plan.

4.2.5.2. Résultats statistiques

La comparaison des résultats issus de l'analyse par validation croisée des deux MNT indique que le procédé utilisé pour produire le MNT composite conduit globalement à faire diminuer l'écart entre les points de mesure et la surface produite (Tableau 19). L'augmentation de la valeur minimale pour le MNT composite s'expliquerait par

l'incorporation d'un point de validation situé en-dehors du chenal et n'informerait donc pas sur la fiabilité générale de la surface composite. À titre d'exemple, la seconde valeur minimale est de 0,35 m, soit la même que la seconde valeur minimale du MNT global.

Tableau 19: Comparaison des résultats issus de la validation croisée des MNT global et composite au niveau du chenal

MNT	Différences altimétriques* ¹ (m)			Nbr. pts. avec erreur (abs) $\geq 0,2$ m	Coeff. Corr* ²
	Moyenne absolue	Min. brute	Max. brute		
MNT global	0,088	-0,56	1,51	96	0,999940
MNT composite	0,081	-0,71	0,44	76	0,999957

*1 : Les différences altimétriques furent obtenues en soustrayant la valeur du MNT de la valeur LiDAR (MNT-LiDAR).

*2 : Coefficient de corrélation

4.2.5.3. Résultats graphiques

i) Profils en coupe

Les profils présentés à la Figure 32 révèlent l'efficacité remarquable de la méthode dans les zones à faible densité de points. La soustraction entre les deux profils a permis d'identifier des redressements de niveau pouvant atteindre 2,17 m dans ces endroits. Le profil en dents de scie de la ligne d'eau serait associé aux données sources, possiblement à des cas de pénétration/réflexion dans la colonne d'eau (2,7 et plus, Figure 32a). Néanmoins, le profil demeure cohérent et les irrégularités ne semblent pas dépasser la valeur de pénétration de 41,5 cm préalablement estimée.

ii) Analyses en plan

En plan, l'examen du nouveau MNT révèle que les artéfacts de surface dans le chenal ont fait place à des surfaces lisses et que la transition entre le domaine terrestre et le chenal s'effectue graduellement la plupart du temps (figure 33). Néanmoins, aucun traitement n'étant sans faille, quelques reliquats numériques prenant la forme de petits escarpements situés en pieds de berge furent observés (encadré noir figure 34). Ceux-ci proviendraient de la troncature de quelques petites péninsules orientées vers le centre du chenal faussement produites lors de la création du MNT global. Leur inclinaison ne dépasserait pas 45°. Par ailleurs, d'après les observations de terrain, les petits escarpements produits s'approcheraient davantage de la réalité des sites en question que les formes antérieurement présentes à ces endroits.

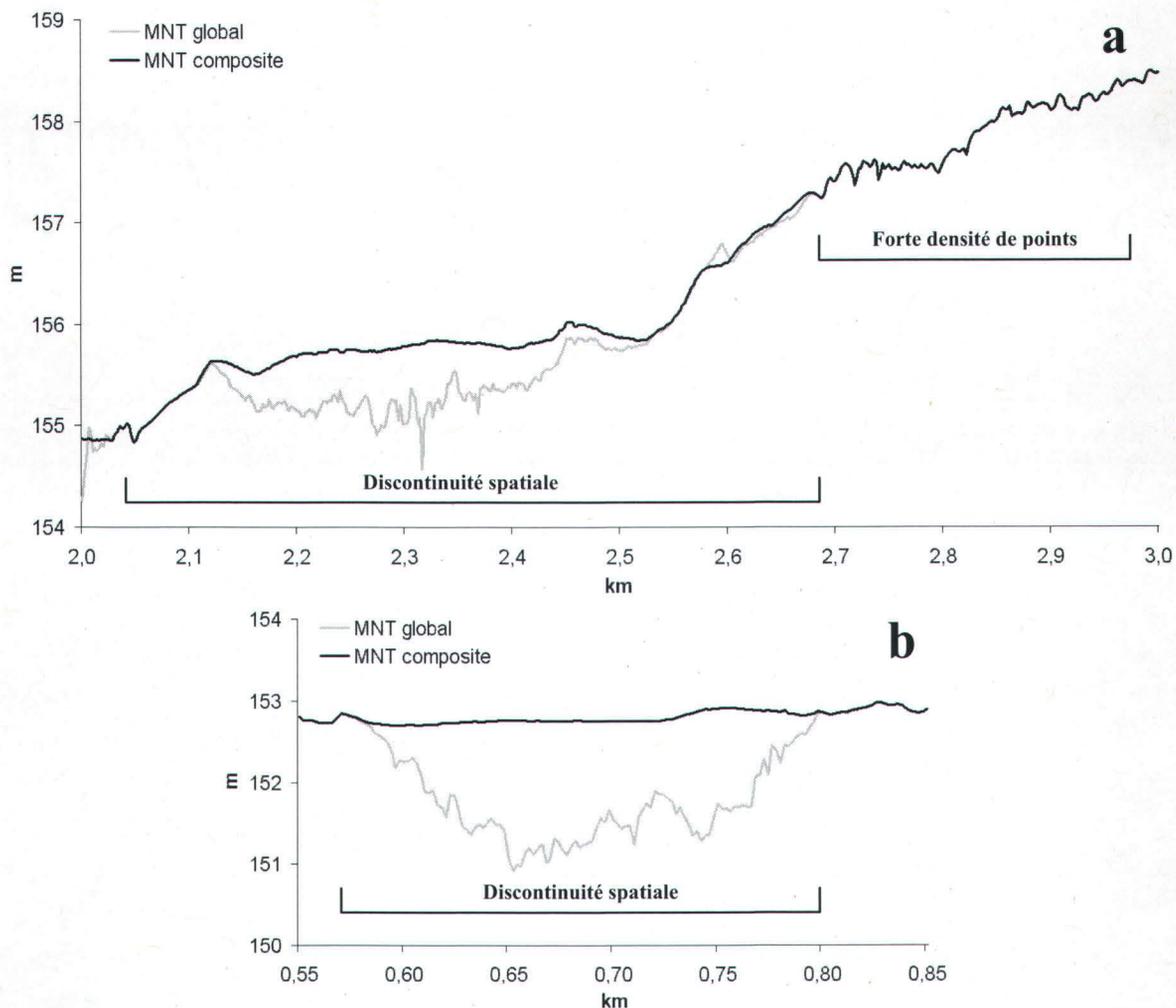


Figure 32 : Profils en coupe produits à partir du MNT global et du MNT composite illustrant le comportement de l'interpolateur krigeage linéaire en fonction de la densité des données LiDAR. Exagération verticale de 100 (a) et de 50 (b).

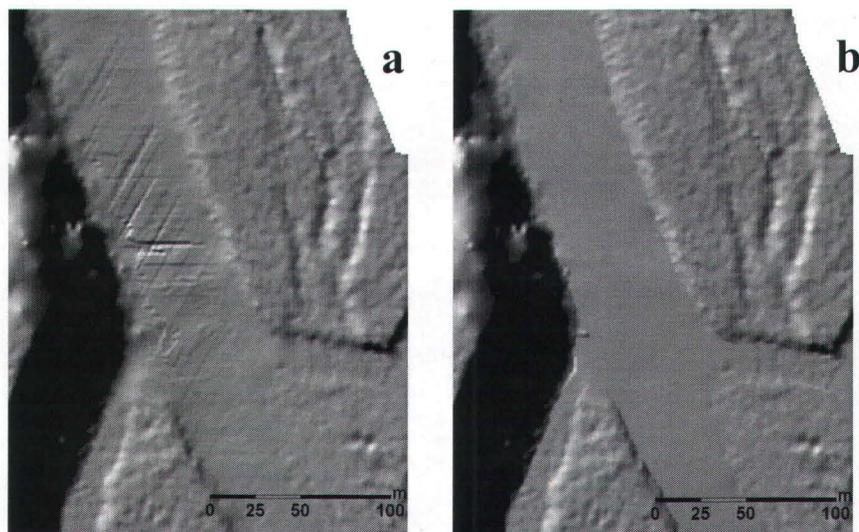


Figure 33 : Visualisation des MNT global (a) et MNT composite (b) dans le secteur des Îlets (borne 2) à l'aide l'affichage avec effet d'ombrage.

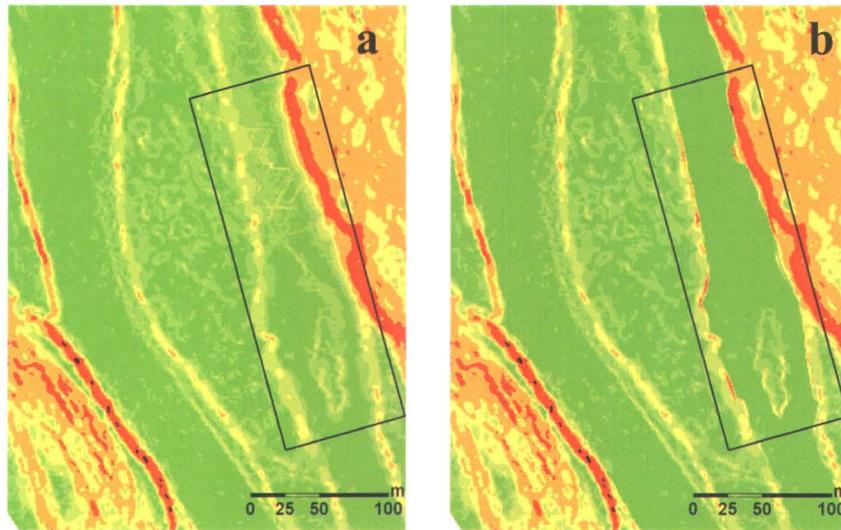


Figure 34 : Occurrences de petits escarpements locaux (encadré noir) suite à la fusion des MNT eau et global, secteur de la rue des Deux-Rapides (borne 5). (a) MNT global, (b) MNT composite (fusionné). La couleur rouge indique des pentes possédant une inclinaison de 30 à 45 degrés.

4.2.5.4. *Sommaire : rendu final*

Le MNT composite permet de conserver l'allure initiale des berges tout en rectifiant les lacunes au niveau du chenal. L'interpolation indépendante des points circonscrits au chenal permettrait donc de représenter efficacement la surface de l'eau. Les légères lacunes persistantes au niveau du chenal, notamment l'allure en dents de scie de la surface de l'eau dans les zones à bonne densité (Figure 32a), seront contrôlées par la méthode mise sur pied pour la production de la pente du lit (section 4.3.3.2.2). En berge, d'après l'examen de la carte des pentes, les petits escarpements générés lors de l'assemblage des MNT sembleraient apporter davantage une rectification par rapport à la réalité terrain qu'induire des biais locaux. En ce sens, nonobstant quelques petites irrégularités, le MNT composite produit en deux temps par l'interpolateur LK semble optimiser les données sources et ainsi offrir un rendu numérique fiable de la réalité terrain.

4.3. Méthodologie pour la production des variables

L'objet de cette section consiste à produire les variables descriptives représentant les caractéristiques pertinentes des berges à l'érosion. Cette section comporte deux étapes préalables à la production des variables : la présélection des variables à produire et l'établissement des unités spatiales (discrétisation) dans lesquelles l'information sera ultimement stockée et analysée.

4.3.1. Détermination des variables à produire

Cette étape consista à cibler les variables décrivant le mieux le phénomène d'érosion des berges dans le but d'élaborer un MSBE comportant les variables descriptives les plus significatives. Le choix préliminaire de celles-ci fut essentiellement inspiré des variables les plus couramment utilisées dans les quatre études hydro-géomorphologiques répertoriées à la section 2.4.2 (Tableau 1). Ainsi, parmi la quinzaine de variables inventoriées au Tableau 1, six furent identifiées en fonction de leur fréquence d'utilisation (nombre d'apparition) (Tableau 20). À des fins de synthèse, certains regroupements de termes furent effectués. Les termes « composition de la berge » et « nature des dépôts de la berge » furent regroupés sous la catégorie « géologie de la berge » qui englobe à fois les types de dépôts et la présence de roche en place. Les expressions « tracé de la rivière » et « angle d'approche de l'écoulement » furent regroupées au sein de l'appellation « rayon de courbure de la berge ». Les différents termes décrivant la végétation furent regroupés dans la dénomination « type de végétation ». Cette dernière renvoie notamment à des catégories de végétaux telles que les arbres, les arbustes et l'herbe.

Ensuite, ces différentes variables furent examinées en fonction du type de données nécessaires à leur élaboration puis en fonction de la faisabilité de leur production. Ces deux dernières étapes conduisirent notamment à éliminer les variables « type de végétation » et « hauteur de la berge ». En contrepartie, la variable « pente du lit » fut intégrée à la sélection. Les explications justifiant ces décisions figurent ci-après. À noter que les variables furent produites de façon à représenter les conditions physiques contemporaines du site, mais aussi en employant des sources de données appartenant à la même fourchette temporelle, soit aux environs de l'année 2000.

Tableau 20: Variables les plus fréquemment utilisées dans l'élaboration des indices de sensibilité des berges à l'érosion

Variables	Réurrence* ¹
Géologie de la berge* ²	4
Type de végétation	4
Protection de la berge (immunisation)	3
Pente de la berge	3
Hauteur de la berge	3
Rayon de courbure de la berge	2

*¹ : Nombre d'apparitions dans la littérature consultée (tableau 1).

*² : Le terme « géologie » englobe à la fois les dépôts meubles et la roche en place.

La variable « type de végétation » dut être éliminée suite à l'exploration non concluante de deux types de données ayant pu servir à sa production, soit : une carte écoforestière à l'échelle du 1:20000 (section 3.2.1.3) et des points de mesure LiDAR classifiés comme étant de la végétation. Cette dernière information pourrait notamment permettre l'établissement d'un rapport (quotient) entre le nombre de points « végétation » et « sol » pour une surface donnée, lequel fournirait alors une information sur la densité de la végétation sur cette même surface (Beck, 2006). Ainsi, le premier type de données s'avéra insuffisamment détaillé pour produire une variable synoptique (exhaustive), alors que le second type fut mis de côté en raison de la résolution insuffisante du relevé LiDAR (espace entre les points) pour établir des rapports fiables.

La variable « hauteur de la berge », qui consistait à établir la hauteur entre le pied de berge et le haut de berge, dut être éliminée en raison des difficultés inévitables associées à l'établissement de la limite du haut de berge, tel que mentionné à la section 4.1.1.4.3. Un mauvais positionnement de la ligne de haut de berge, notamment en raison de la présence de végétation, serait alors susceptible d'induire un biais important dans le calcul de la hauteur de la berge. Afin d'obtenir une donnée précise, il aurait alors été nécessaire de procéder à des relevés instrumentalisés sur le terrain, ce qui aurait exigé un temps considérable et alourdi la démarche.

De plus, à la liste des variables retenues, fut ajoutée la « pente du lit ». Celle-ci fut intégrée en fonction du principe de Lane (1955) qui stipule que la pente du lit constitue l'une des deux composantes principales déterminant la puissance de l'écoulement dans

une section de rivière (section, 2.1.2.1). Bien que n'ayant été répertoriée qu'une seule fois dans l'inventaire des variables du Tableau 1, cette variable s'est avérée nécessaire pour décrire le potentiel d'érosion des berges. En résumé, les variables présélectionnées sont : la pente de la berge, la pente du lit, le rayon de courbure de la berge, la géologie de la berge et la présence d'immunisations en berge.

4.3.2. Établissement des unités spatiales (discrétisation)

Comme ce fut mentionné à la section 3.1.2, les unités spatiales regroupant l'information des différentes variables consistent en une série de petits polygones couvrant les berges ciblées pour l'élaboration du modèle. Ces berges furent sélectionnées en fonction des éléments vulnérables s'y trouvant, mais aussi de façon à inclure une zone érodable active. Cette discrétisation spatiale des données permet la création d'une base de données homogène (table) où chaque unité spatiale correspond à un enregistrement (ligne), à l'intérieur duquel chaque variable prend la forme d'un champ descriptif (colonne). Cette base de données peut ensuite être exportée facilement vers un tableur externe, à l'intérieur duquel le modèle proprement dit est élaboré. De plus, le fait que ces unités couvrent une surface donnée au sein du SIG, le rend utilisables pour des requêtes spatiales.

Ces unités spatiales furent générées à l'aide d'une routine basée sur les polygones de Thiessen implantés à partir de points issus de la segmentation de la ligne de berge récente structurée à la section 4.1.3.1 et circonscrits à l'aide d'une zone tampon établie à une distance déterminée de part et d'autre de cette même ligne (Figure 35). Dans ce contexte d'application, la création de polygones de Thiessen à partir de points en provenance de la ligne en question permet de produire des entités parallèles entre elles et perpendiculaires à la ligne de berge. Le pas de segmentation de la ligne de même que la dimension de la zone tampon, cette dernière déterminant l'entendue latérale des unités spatiales par rapport à la ligne de berge, furent paramétrisés de façon à ce que les limites des unités spatiales ne se chevauchent pas dans les zones où la ligne de berge présentait une forte courbure (Figure 35a). Néanmoins, dans deux secteurs situés autour de l'Île-Enchanteresse, les unités spatiales durent être agrégées en raison d'une courbure de berge nettement trop prononcée pour permettre la création d'unités spatiales distinctes. La Figure 35b illustre un exemple de ces agrégations.

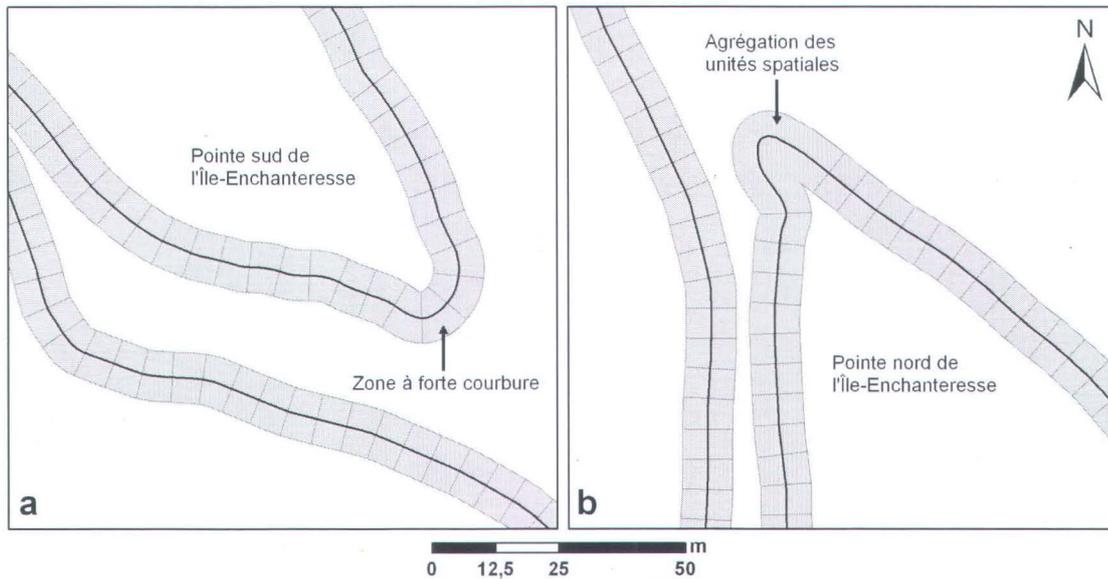


Figure 35 : Structuration des unités spatiales : exemple de l'Île-Enchanteresse (bornes 6 et 6,5): (a) non chevauchement des unités spatiales dans les zones à forte courbure, (b) chevauchement et agrégation des unités spatiales en raison de la forme de la berge.

Cette démarche permet d'établir 2217 sections d'une dimension de 6 x 10 m couvrant 60 m², à l'exception des unités spatiales agrégées, mentionnées ci-avant, couvrant des surfaces respectives de 223 et 312 m². En tout, ces unités couvrent 13,3 km de berge, comprenant toute la berge ouest du site (9,7 km), le pourtour de l'île enchanteresse (2,1 km) et la berge est dans le secteur des îlets (1,5 km).

4.3.3. Production des variables

L'objet de cette section consiste à produire des variables représentant le plus fidèlement possible la réalité terrain en optimisant les données sources. Dans cette optique, comme l'occurrence des phénomènes d'érosion est le plus souvent liée aux événements de crue (Costa et O'Connor, 1995; Kochel, 1988; Wohl, 2000; Wolman et Miller, 1960), certaines variables furent produites de façon à tenir de compte de la dynamique de la rivière lors de ce type d'évènement. C'est le cas notamment de la pente du lit et de la géologie de la berge pour lesquelles le profil longitudinal de la ligne d'eau en crue de même que le niveau d'eau durant ces mêmes évènements furent respectivement pris en compte. Enfin, dans le but d'assurer la traçabilité de la démarche de conception, les diverses opérations à la base de la production des variables de même que les méthodes de transfert de l'information aux unités spatiales sont ici présentées.

4.3.3.1. Pente de la berge

4.3.3.1.1. Production de la donnée de pente

La pente de la berge fut calculée à l'aide de la fonction *Slope* du module *Spatial Analyst* sous ArcInfo 9.2® à partir du MNT composite élaboré à la section 4.2.5. La routine consiste à calculer une pente locale, en l'occurrence en degrés, à partir d'une grille matricielle de 3 x 3. Considérant que la taille des pixels du MNT employé est de 1 m, la distance linéaire de calcul fut donc de 3 m, soit à peu de chose près la distance linéaire moyenne entre les points de mesure LiDAR (3,37 m) (section 4.2.1). Dans cette optique, cet outil fut jugé adéquat pour le calcul de la pente de la berge.

4.3.3.1.2. Transfert de l'information aux unités spatiales

Les valeurs d'inclinaison ainsi stockées sous la forme d'une matrice furent transférées aux unités spatiales vectorielles par la fonction *Zonal Statistics*. La valeur de pente maximale ainsi retrouvée au sein des pixels contenus dans l'unité spatiale s'est alors vue transférée à cette dernière. L'attribution de la valeur maximale plutôt que de la valeur moyenne ou médiane visait à atténuer la sous-évaluation des reliefs escarpés occasionnée par le pas de mesure du relevé LiDAR. En effet, suite à une analyse qualitative de la précision du modèle par rapport à la réalité terrain, notamment dans des secteurs stables dans le temps, telles que des zones immunisées et des sections constituées de roche en place, il fut constaté, *via* la matrice des pentes, que le MNT avait tendance à sous-estimer l'inclinaison de la pente des berges. La différence entre la réalité terrain et le MNT tendrait à augmenter à mesure que l'angle de la pente naturelle augmente et serait à son plus fort aux endroits où des inclinaisons prononcées prennent place sur de courtes distances horizontales. Ainsi, bien que cette technique de transfert d'information tende à atténuer le biais en provenance du MNT, celui-ci devra néanmoins être pris en compte au stade de la production des indices de base (section 5.2.1.1).

4.3.3.2. Pente du lit

En l'absence de données bathymétriques couvrant l'ensemble du tronçon à l'étude, la pente du lit fut obtenue indirectement à l'aide du NESE extrait du MNT composite (section 4.2.3). Dans le cas présent, il est assumé que la pente de la ligne d'eau est globalement parallèle à la pente du lit. La méthode employée consista à extraire l'altitude

de la surface de l'eau à partir du MNT composite et de points d'extraction issus d'une ligne correspondant au centre du chenal principal, puis à calculer l'inclinaison de la ligne d'eau à partir de ces données dans un logiciel externe. Une fois l'information produite, celle-ci fut transférée aux unités spatiales. Ce protocole se compose de trois étapes expliquées ici-bas.

4.3.3.2.1. Production de la ligne centrale de chenal et extraction du NESE

Considérant les multiples chenaux présents dans le tronçon à l'étude, il fut décidé, par souci de simplicité, de produire une seule ligne correspondant au centre du chenal principal pour l'ensemble du site, à l'exception du secteur de l'Île-Enchanteresse où les deux chenaux, principal (est) et secondaire (ouest), furent pris en compte. Le protocole expliqué ici fut appliqué au chenal principal couvrant tout le site puis, de façon indépendante, au chenal ouest de l'Île-Enchanteresse.

Dans le but d'éviter des biais associés à la présence de bancs alluviaux exondés ayant été incorporés au sein du chenal en fonction des critères de cartographie établis à la section 4.1.2, la ligne de berge récente fut amendée dans ces zones en appliquant simplement la limite eau/terre, de façon à exclure ces formes terrestres du chenal. Une fois le périmètre du chenal restructuré, la ligne de centre de chenal fut produite. La technique alors employée consistait à interpoler en format matriciel une ligne mitoyenne entre les deux berges. Ce principe consistait à attribuer des valeurs différentes aux deux berges dans la base de données, en l'occurrence des valeurs de 1 et 3, à récupérer la valeur médiane interpolée et à la transformer sur la forme d'une ligne vectorielle. Ce principe est en fait emprunté aux techniques d'interpolation de données topographiques sous forme d'isolignes (fonction *Topo to raster*).

Ensuite, afin d'éviter des micro-variations longitudinales non significatives par rapport à l'orientation générale du chenal principal, les lignes centrales obtenues (celle s'étendant à tout le site et une seconde couvrant le chenal ouest de l'Île-Enchanteresse) furent lissées à l'aide du même algorithme que celui employé pour la généralisation des lignes de berge à la section 4.1.3.1, mais cette fois-ci avec un rayon d'action plus étendu de 100 m. Ces lignes furent ensuite segmentées avec un pas de 2 m et le centroïde de chaque segment fut transformé en point. Il en résulta une série de points couvrant le chenal principal de tout

le site et le second chenal dans le secteur de l'Île-Enchanteresse à partir desquels l'altitude de la surface de l'eau fut extraite (fonction *Extract values to points*).

4.3.3.2.2. Calcul de l'inclinaison du plan d'eau

La série de points portant les valeurs d'altitude de la surface de l'eau fut exportée vers Microsoft Excel 2003® où la fonction *pente* permit alors d'en calculer l'inclinaison. Cette fonction consiste à établir une droite de régression linéaire à partir d'une fenêtre de calcul déterminée (groupe de cellules) et à calculer l'inclinaison de celle-ci (Aide du logiciel Microsoft Excel, 2003®), ce qui constitue une forme de lissage mobile. De façon à représenter le profil d'une ligne l'eau en crue le mieux possible, la fenêtre de calcul fut établie sur une distance fixe de 500 m, soit 250 m de part et d'autre de chaque point de calcul. Selon ce principe, afin d'obtenir des valeurs de pente pour toutes les unités spatiales couvrant le site, les lignes centrales servant à produire les points d'extraction durent être au préalable prolongées de 250 m aux extrémités amont et aval du site à l'étude. Cette fenêtre de calcul visait à représenter une ligne d'eau moins sujette aux variations locales du lit en provenance des données sources, et donc à produire une pente plus continue. Celle-ci visait notamment à se conformer aux lignes d'eau en crue produites dans le cadre d'une campagne de cartographie des zones inondables de récurrences 20 ans et 100 ans, entre le secteur des Trois-Saults et l'Île-Enchanteresse (bornes 0 à 6) (Boucher et Picard, 1994). En outre, l'emploi d'une telle fenêtre de calcul permit d'éliminer certaines occurrences de pentes négatives possiblement liées à des phénomènes de pénétration/réflexion du signal LiDAR dans la colonne d'eau, tel qu'expliqué à la section 4.2.3.

La comparaison des résultats obtenus avec ceux d'études antérieures permit de constater l'efficacité de la méthode employée. En effet, dans le secteur situé entre les bornes 2,5 et 5,5, la pente moyenne de la ligne d'eau en crue fut fixée à 0,0034 par Leclerc *et al.*, (1998), alors que la moyenne calculée ici est de 0,0036. En amont, entre les bornes 7 et 9,5, la pente moyenne du lit fut établie à 0,0055 par Leclerc *et al.* (2001), alors que la valeur moyenne obtenue est de 0,0052. Finalement, pour l'ensemble du site, Morse *et al.* (2002) chiffrèrent la pente moyenne du lit à 0,0037 alors que la valeur obtenue ici est de 0,0039. Ces valeurs illustrent que la méthode employée permet de bien représenter à la fois la ligne d'eau en crue et la pente du lit avec des écarts très acceptables de l'ordre de

5%. Plus spécifiquement, dans les zones à fort gradient, la méthode semble sous-estimer légèrement l'inclinaison du lit, alors que, globalement et dans les zones moins inclinées, elle semble accentuer légèrement le profil.

4.3.3.2.3. Transfert de l'information aux unités spatiales

La pente du lit ainsi produite et validée fut exportée vers ArcInfo 9.2® sous la forme d'une série de points. L'information portée par chaque point fut ensuite interpolée pour former une ligne matricielle au centre du chenal. L'information fut par la suite transférée aux unités spatiales situées sur les berges en utilisant une série de polygones assurant un lien spatial direct entre les deux types d'entités (Figure 36). Ces polygones furent générés à partir d'une ligne de centre de chenal fortement lissée (rayon d'action de 200 m) et segmentée à un intervalle de 10 m, de façon à obtenir des polygones complets ne se chevauchant pas entre eux avant d'atteindre les berges. Ces entités furent créées selon le même principe que celui employé pour la production des unités spatiales (section 4.3.2). Ainsi, l'information de la ligne matricielle fut d'abord transférée aux polygones chevauchant la ligne en question *via* une requête spatiale (fonction *Zonal Statistics*) calculant la moyenne des pixels contenus dans ceux-ci. De cette façon, l'information concentrée au centre du chenal fut généralisée à l'ensemble du polygone sous une forme matricielle, laquelle permit ultimement de transférer l'information aux unités spatiales les chevauchant, *via* une opération spatiale du même type que la précédente, en utilisant cette fois-ci le principe de la majorité. Ainsi, la valeur matricielle la plus fréquente dans la zone chevauchée par l'unité spatiale se voyait transférée à celle-ci. Ce protocole visait à transférer l'information perpendiculairement au chenal central vers les unités spatiales en berge avec une perte minimale d'information (Figure 36), ce que ne permettaient pas les fonctions spatiales d'adjacence disponible dans ArcInfo 9.2®.

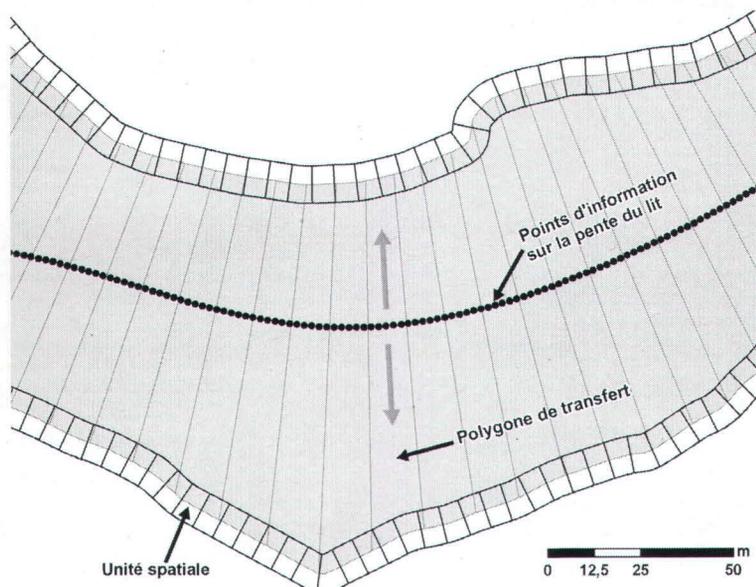


Figure 36 : Transfert de l'information du centre du chenal vers les unités spatiales en berges (borne 1).

4.3.3.3. Rayon de courbure de la berge

Selon la littérature, le degré de courbure d'un cours d'eau peut prendre la forme d'un indice de sinuosité (Leopold et Wolman, 1957; Ritter *et al.*, 2002; Thorne, 1997), d'une valeur représentant l'angle d'approche de l'écoulement par rapport à la berge (*High flow angle of approach*) (Simon et Downs, 1995), ou encore d'une valeur de rayon de courbure (Bagnold, 1960; Beck, 2006; Consuegra *et al.*, 1999; Lance et Consuegra, 1998; Hickin et Nanson, 1975). Le premier type représente le rapport entre la longueur d'une vallée (en ligne droite) et la longueur totale du segment de rivière qui s'y trouve (Thorne, 1997) et semble davantage utilisé comme critère de classification des cours d'eau (Leopold et Wolman, 1957). Le second type fut testé dans le cadre de cette recherche et s'est avéré grandement limité par la présence d'îles au sein du chenal. En revanche, le troisième type s'est révélé assez facilement implantable au sein d'un SIG et a, de plus, fait l'objet d'études quantitatives ayant permis la formulation de relations empiriques avec l'érosion des berges (Consuegra *et al.* 1999; Hickin et Nanson 1975). Le rayon de courbure fut donc sélectionné pour ces raisons.

Dans le cas présent, le rayon de courbure fut produit à partir de la ligne de berge. Pour produire cette variable, trois aspects se sont avérés importants : l'établissement de segments de calcul représentatifs de la variabilité de la géométrie de la berge, l'utilisation d'un degré de généralisation de la ligne de berge approprié, et finalement, la prise en

compte du sens de l'écoulement. Ces aspects sont expliqués ci-après de même que la technique de transfert de l'information aux unités spatiales.

4.3.3.3.1. Segmentation de la ligne de berge et calcul du rayon de courbure

Le premier aspect pris en compte dans la production de cette variable fut l'établissement des segments de berges servant au calcul du rayon de courbure. D'abord, en s'appuyant sur la littérature, une technique employant un pas de segmentation constant fut testée. Cette méthode appliquée par Consuegra *et al.* (1999) consistait à fractionner la berge en tronçons de même longueur à l'aide d'un pas correspondant à une à deux fois la largeur moyenne du lit mineur. Dans le cas présent, comme la rivière présente une largeur moyenne de 60 m, différents pas de segmentation entre 60 m et 120 m furent testés et des rayons de courbure furent calculés à partir de ceux-ci. L'aspect systématique de cette méthode a toutefois révélé une lacune importante provenant du fait qu'elle ne tenait pas compte du passage d'une zone concave à une zone convexe ou *vice-versa*, de telle sorte qu'un tronçon pouvait contenir à la fois une portion convexe et concave et, par conséquent, conduire à une valeur de rayon de courbure erronée.

Ainsi, afin d'obtenir des tronçons de berge issus d'une segmentation prenant en compte la géométrie de la berge, un effort fut investi au niveau de l'identification des points d'inflexion délimitant les sections concaves et convexes. Ainsi, une routine de positionnement des points d'inflexion correspondant à ces transitions fut implantée en langage VBA (*Visual Basic*) dans ArcObject 9.2®. Celle-ci consistait à calculer préalablement le rayon courbure à chaque nœud de la ligne de berge, en utilisant les nœuds précédents et suivants, et à déterminer si le nœud se trouvait en sens convexe ou concave par rapport à la ligne de berge. Les nœuds ainsi classifiés par une polarité négative ou positive furent alors reliés en fonction de leur signe pour donner des tronçons convexes ou concaves délimités par ces points d'inflexion.

Le rayon de courbure fut ainsi calculé pour chacun des tronçons produits. L'outil employé fut lui aussi produit à l'aide d'une routine VBA implantée dans ArcObject 9.2®. Celle-ci consistait à tracer virtuellement un cercle tangent en trois points du tronçon, soit aux deux extrémités et au centre de celui-ci, puis à calculer le rayon de celui-ci. À noter que ces outils furent développés en étroite collaboration avec l'équipe de la professeure

Monique Bernier de l'INRS ETE. Précisons également que l'outil de calcul des rayons de courbure, mis sur pied ici, est aussi celui qui a été employé pour le calcul des rayons de courbure lors de l'expérimentation de la méthode de segmentation à pas constant mentionnée préalablement.

4.3.3.3.2. Établissement du degré de généralisation de la ligne de berge

L'application de ces outils à la ligne de berge récente, très légèrement lissée (sur 5 m) (section 4.1.3.1), généra plusieurs valeurs aberrantes par rapport au profil de la berge, dont en l'occurrence des rayons de courbures aussi petits que 1,2 m ou aussi grands que 106 km. Ces valeurs seraient notamment associées à une géométrie de berge trop détaillée pour cette forme de calcul, laquelle impliquerait une discrétisation trop fine lors de la routine de segmentation et conduirait à représenter indûment les micro-variations longitudinales de la berge. La ligne de berge fut, par conséquent, généralisée avant les opérations de segmentation et de calcul des rayons de courbure de façon à obtenir des valeurs plus représentatives régionalement du rayon de courbure. Pour ce faire, différents niveaux d'agrégation, impliquant des degrés de lissage entre 10 m et 130 m, furent testées. Cette approche fut surtout basée sur des observations visuelles visant à identifier le degré de lissage permettant à la fois d'éliminer les micro-variations locales non souhaitées tout en conservant les variations régionales représentant la sinuosité de l'écoulement. Finalement, le niveau de lissage optimal fut établi à 90 m. Ce degré de généralisation permit de ramener le registre des valeurs de rayons de courbure entre 81 m à 6,04 km, soit des valeurs plus cohérentes par rapport à la largeur moyenne du cours (60 m) et à son tracé global moyennement sinueux.

4.3.3.3.3. Décalage des segments vers l'aval pour tenir compte du sens de l'écoulement

D'après la littérature, le déplacement des chenaux dans les sections concaves courbées s'effectuerait selon deux composantes principales, l'une latérale (extension) et l'autre vers l'aval (translation et/ou rotation) (Knighton, 1998). En outre, dans les zones concaves à forte courbure, en l'occurrence dans les méandres, l'érosion se concentrerait à la sortie des sections courbes plutôt qu'au sein même de ces sections (Lance et Consuegra, 1998). Ainsi, selon ces observations, il existe un certain décalage spatial entre un changement de direction de l'écoulement et son impact sur la berge dans les sections concaves. Ce phénomène serait possiblement associé à la distance nécessaire à la force

centrifuge pour induire une composante hélicoïdale au sein de l'écoulement, laquelle, une fois générée, pourrait alors agir au-delà de la section concave. Selon cette explication, l'écoulement n'aurait peu ou pas d'influence sur la berge au début d'une concavité, mais en aurait en aval de celle-ci. Ainsi, afin de tenir compte de cet effet de décalage, les segments, de même que les valeurs de rayons de courbure leur étant associées, furent appliqués avec un décalage de deux nœuds vers l'aval (Figure 37). Ce paramètre fut établi suite à différents essais et assure une bonne prise en compte du phénomène tout en évitant un décalage excessif.

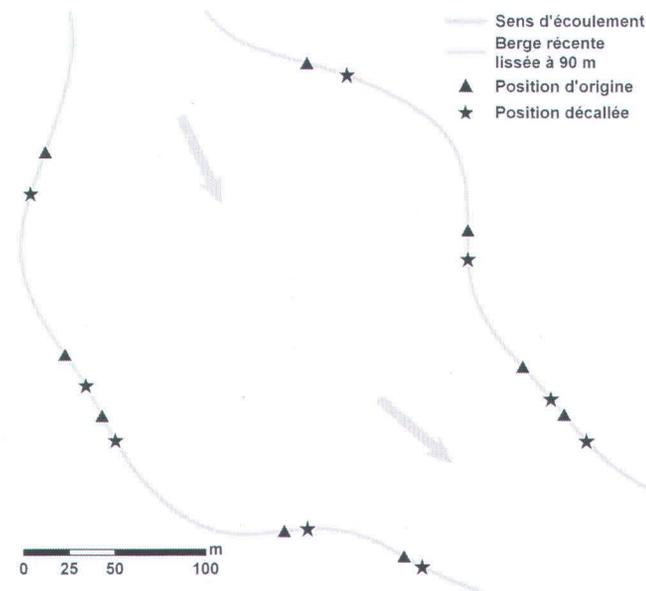


Figure 37 : Application décalée vers l'aval des points d'inflexion séparant les segments concaves et convexes.

4.3.3.3.4. Transfert de l'information aux unités spatiales

Une fois les étapes de généralisation, de segmentation, de calcul des rayons de courbure et de décalage des valeurs accomplies, le produit de ce travail fut transformé en une ligne matricielle et transféré aux unités spatiales à l'aide de la fonction *Zonal statistics*. Comme pour la variable précédente, le principe de la majorité fut alors employé, c'est-à-dire que la valeur matricielle revenant le plus souvent au sein d'une unité spatiale fut appliquée à celle-ci (section 4.3.3.2.3). Dans certains cas, le transfert dut être effectué manuellement puisque que les unités spatiales furent élaborées à partir de la ligne de berge récente peu lissée et qu'elles ne chevauchaient pas en tout point la ligne généralisée employée pour le calcul.

4.3.3.4. *Géologie de la berge*

L'approche généralement employée pour la production de données sur géologie des dépôts meubles consiste en l'exécution de coupes stratigraphiques à intervalles relativement rapprochés sur le terrain à l'étude (Cojan et Renard, 1999). Cependant, étant donné l'étendue du présent site d'étude, cette technique néanmoins très efficace aurait nécessité une campagne de terrain extensive dépassant largement les ressources de ce projet. Ainsi, la production de cette variable fut basée sur les données disponibles de même que sur des observations de terrain.

4.3.3.4.1. Données de géologie disponibles

Les données disponibles consistaient en une carte des dépôts meubles de la région de Québec (section 3.2.1.3), produite par Bolduc *et al.* (2003), et en une série de 34 forages effectués par le Ministère de l'Environnement du Québec et le Ministère des Transport du Québec en 2001, 2006 et 2007 dans le secteur de la rivière Montmorency.

D'après la carte des dépôts meubles de la région de Québec, dans la portion amont du site d'étude (borne 3,5 et plus), la rivière Montmorency trace une limite sédimentaire entre un ensemble de dépôts fluvioglaciaires épais en berge ouest et un faciès glaciaire mince (till) reposant sur la roche en place en berge ouest. Ces deux groupes sont séparés par une frange de dépôts alluviaux longeant la rivière d'amont en aval. La portion aval du site d'étude (borne 3,5 et moins) se caractérise quant à elle par un vaste complexe paléo-deltaïque au milieu duquel se trouve la même frange de dépôts alluviaux. Au niveau granulométrique, toujours selon Bolduc *et al.* (2003), les dépôts fluvioglaciaires sont constitués de matériaux hétérométriques plutôt grossiers (sable, gravier et blocs). Le till comporte des matériaux sensiblement de même calibre que le groupe précédent, à la différence que ces particules sont liées par une matrice fine. Les dépôts deltaïques sont quant à eux essentiellement formés de sédiments sableux avec un peu de gravier, alors que les dépôts alluviaux sont constitués à la fois de matériaux autochtones et allochtones, dont la granulométrie est en équilibre avec les forces d'écoulement passées et actuelles (Cojan et Renard, 1999).

Les données de forage furent préalablement traitées de façon à ne conserver que l'information située à une profondeur voisine de la hauteur locale du lit de la rivière, soit

5 m au-dessus et en-dessous de cette limite, dans le but de faire ressortir le type de dépôt correspondant aux berges de la rivière. L'examen de ces 34 forages révéla sensiblement la même géologie régionale que celle préalablement présentée, c'est-à-dire des dépôts hétérométriques non cohésifs, mais ne permit toutefois pas d'effectuer une différenciation entre les ensembles sédimentaires.

4.3.3.4.2. Observations de terrain

Les campagnes de terrain menées en 2008 et 2009, durant lesquelles divers types de données furent acquises (section 3.2.1.4), permirent parallèlement d'effectuer différentes observations complémentaires au niveau de la géologie des berges.

Dans le secteur des Îlets (entre les bornes 1 et 2,5), l'érosion des berges permit de mettre à nu des dépôts sableux d'une grande homogénéité (Figure 38). Ces dépôts furent notamment observés en berge est où l'érosion y est importante, mais aussi, dans une moindre mesure, en berge ouest.



Figure 38 : Berge constituée de dépôts sableux. Berge est secteur des Îlets (borne 1,5).

En périphérie de ce secteur, deux sablières grandement creusées affichaient aussi des dépôts sableux avec quelques structures inclinées traduisant l'origine pro-deltaïque des dépôts régionaux tel que mentionné par Bolduc *et al.* (2003).

En amont, dans le secteur de la rue Drouin (borne 8), une séquence sédimentaire fut mise à nu sur le flanc d'un talus d'environ 7 m de hauteur, à la suite de ce qui semble être un glissement de terrain. Il fut alors possible d'observer, de la base au sommet, des dépôts grossiers (gravier, galets et blocs) sur environ 3 m, une strate de silt massif d'environ 1,5 m d'épaisseur, et près de 2,5 m de dépôts sablo-graveleux au-dessus de cette dernière. La

strate silteuse aperçue sur une longueur d'environ 150 m semblait toutefois très localisée, car parmi quatre forages situés dans un rayon de moins de 500 m autour de celle-ci, aucun ne révéla ce type de dépôts. La présence de cette couche serait possiblement associée à la présence d'un petit delta glacio-lacustre mis en place dans ce secteur lors de la dernière glaciation (Bolduc *et al.* 2003). Néanmoins, considérant l'élévation de la base de cette dernière par rapport à la rivière et son aspect très localisé, celle-ci ne fut pas prise en compte dans l'élaboration de cette variable.

En outre, dans le secteur de la rue Parent (borne 8,5), l'érosion révéla une séquence semblable à la précédente, excluant toutefois la strate silteuse en question. Ainsi, on y observa des dépôts grossiers du même type que ceux mentionnés précédemment, sur une hauteur d'environ 2 m à la base de la berge, ainsi que des dépôts sablo-graveleux de la même épaisseur reposant sur ceux-ci (Figure 39). Ces dépôts grossiers semblaient en l'occurrence offrir une certaine protection au pied de la berge.



Figure 39 : Séquence sédimentaire, illustrant des dépôts grossiers dans la portion inférieure de la berge et des dépôts plus fins dans sa portion supérieure, secteur de la rue Parent (borne 8,75).

Cette même suite sédimentaire fut observée à différents endroits vers l'aval jusqu'à la borne 4,5, en aval de laquelle l'anthropisation des berges, sur un tronçon de 2 km (bornes 4,5 et 2,5), ne permettait plus des observations de ce type. En aval de ce tronçon dénaturé, soit à l'entrée du secteur des îlets, ce type de patron sédimentaire est remplacé par l'unité deltaïque sableuse décrite précédemment. Ceci suggérerait l'existence d'une transition

sédimentaire entre les bornes 4,5 et 2,5, laquelle coïnciderait en l'occurrence avec la limite nord du complexe paléo-deltaïque établie par Bolduc *et al.* (2003) et correspondrait par le fait même à la zone où le cours adopte un profil anastomosé (Figure 2).

Cette dernière observation fut notamment interprétée comme une balise marquant des environnements sédimentaires distincts. En effet, les chenaux anastomosés étant associés à des environnements de moindre énergie (Miall, 1977; Nanson et Croke, 1992; Smith et Smith, 1980) et les environnements de moindre énergie étant associés à des dépôts plus fins, selon le principe d'équilibre du chenal de Lane (1955), la forme de ces chenaux témoignerait ainsi de la géologie locale dans laquelle ils s'incisèrent. Le niveau d'énergie moindre dans ce secteur serait, quant à lui, en partie associé à une pente du lit ancienne et actuelle plus douce, dont les valeurs contemporaines illustrent une inclinaison passant de 0,0041 à 0,0030 sur les 2 km en question (bornes 4,5 et 2,5) pour atteindre une valeur moyenne de 0,0024 dans la zone des Îlets.

4.3.3.4.3. Établissement des unités géologiques

Ainsi, d'après ces dernières observations, une limite sédimentaire fut établie à l'entrée du secteur anastomosé (borne 3,5) (Figure 40). Celle-ci forme la frontière entre un environnement essentiellement sableux en aval et un second ensemble en amont constitué de dépôts grossiers et hétérogènes (sable graveleux, gravier, galets et blocs), dont la fraction plus grossière se concentre en pied de berge. Ces deux ensembles seront respectivement nommés « dépôts deltaïques » et « dépôts fluvioglaciaires ». Le premier couvre 38,3% des berges à l'étude, alors que le dernier en couvre 56,5%.

À ces deux unités, s'ajoutent des sections très résistantes constituées de roche en place (Figure 40). Ces sections furent notamment relevées lors de la campagne de terrain de 2008 (section 3.2.1.4). Afin d'éviter une collecte excessive d'informations sur le terrain, seules les sections de berges présentant une hauteur de roche en place susceptible de protéger efficacement la berge en période de crue furent cartographiées. Pour ce faire, l'examen des lignes d'eau en crue, produites par Boucher et Picard (1994) et mentionnées à la section 4.3.3.2.2, permit d'établir cette hauteur à 2 m. Cette valeur fut notamment obtenue en calculant la hauteur moyenne des cotes de crue de récurrence 20 ans (735 m³/s) par rapport à une ligne d'eau de référence correspondant à un débit de 100 m³/s.

Cette opération permet de répertorier 10 tronçons très résistants d'une longueur variant entre 15 et 140 m concentrés en amont entre les bornes 4 et 9,5. Ces tronçons rocheux totalisent 5,2% des berges du secteur à l'étude. La Figure 41 illustre un exemple de ce type de section rocheuse.

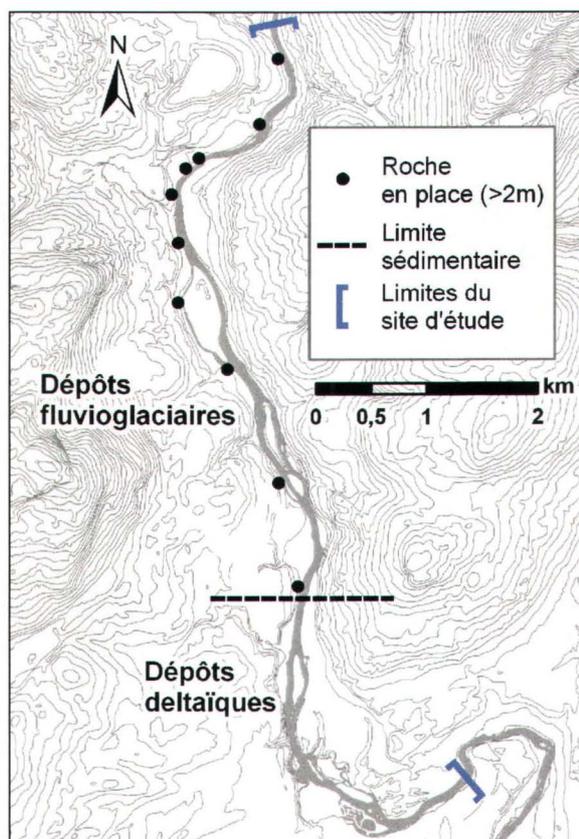


Figure 40 : Unités géologiques et sections formées de roche en place > 2m, rivière Montmorency, Québec. La ligne pointillée marque la limite entre les deux unités géologiques.

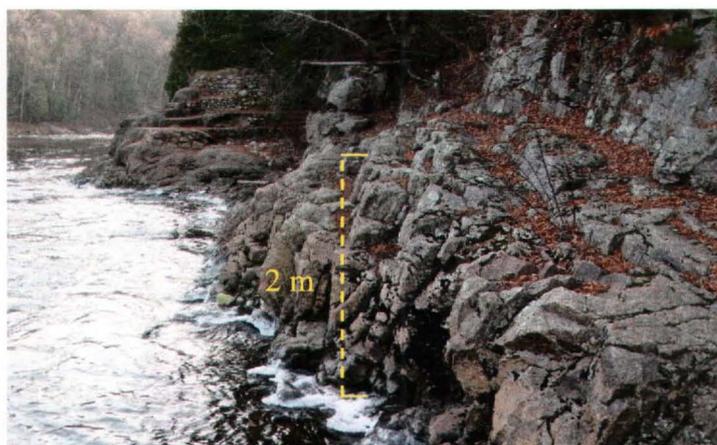


Figure 41 : Section constituée de roche en place d'une hauteur supérieure à 2 m, secteur de la rue Parent (borne 8,5).

4.3.3.4.4. Transfert de l'information aux unités spatiales.

Comme l'information descriptive produite était de nature qualitative et qu'elle était regroupée spatialement, elle fut implantée directement dans les unités spatiales, en sélectionnant les sections et en leur attribuant des valeurs numériques temporaires comprises entre 1 et 3, 1 décrivant la roche en place, 2 les dépôts grossiers, et 3 le matériel sableux. Ces valeurs allaient ensuite être reclassifiées à l'étape de la critériologie (section 5.2.1.4).

4.3.3.5. *Présence d'immunisations en berge*

4.3.3.5.1. Relevé des zones immunisées

Comme ce fut mentionné à la section 3.2.1.4, les tronçons de berge immunisés furent relevés lors d'une campagne de terrain menée à l'automne 2008. Divers types d'ouvrages furent alors rencontrés : des murets de béton ou de pierres, des gabions, des enrochements en pierre naturelle ou en dalles de béton (trottoirs) et des ouvrages composites tels que des cages de bois contenant des galets, des murets de bois, des murets de pneus, etc. Ceux-ci furent regroupés en quatre catégories, établies en fonction des types les plus fréquents, soit : les muret de béton (Figure 42a), les murets de pierres (Figure 42b), les enrochements (Figure 42c) et les immunisations mixtes (Figure 42d). Au sommaire, vingt-trois segments immunisés d'une longueur variant de 12 à 414 mètres furent dénombrés et totalisent 15% des berges du secteur à l'étude.



Figure 42 : Catégories d'immunisations relevées sur le tronçon à l'étude. (a) muret de béton, (b) muret de pierres, (c) enrochement et (d) immunisation mixte (enrochement en pieds de berge et superposition d'une cage de bois garnie de blocs sur celui-ci).

4.3.3.5.2. Transfert de l'information aux unités spatiales

Ces données originellement stockées sous la forme de lignes (section 3.2.1.4) furent transférées aux unités spatiales *via* le même protocole de transfert que celui employé à la variable « rayon de courbure » (section 4.3.3.3.4).

5. MODÉLISATION DE LA SENSIBILITÉ DES BERGES À L'ÉROSION

5.1. Méthode proposée

Tel que mentionné à la section 3.1.2, l'approche de modélisation proposée comporte deux étapes : la critériologie et la validation. Cette section consiste à présenter les méthodes employées pour l'étape de la critériologie, laquelle constitue la base du modèle, de même qu'à quantifier la capacité du modèle à reproduire le phénomène de l'érosion des berges à l'érosion, *via* l'étape de la validation. Rappelons, à ce stade, que la base de données, contenant l'information sur les diverses variables produites de même que sur les données d'érosion (présence/absence d'érosion, taux de recul et hauteur verticale d'érosion en 2009), fut intégralement importée à l'intérieur du logiciel Microsoft Excel 2003® où la modélisation proprement dite fut réalisée.

5.2. Critériologie

Les indices de base prennent la forme de fonctions mathématiques simples, typiquement polynomiales, élaborées à partir des données présence/absence d'érosion et en considérant la disponibilité totale des données décrivant les conditions physiques relatives à chaque variable. Cette technique, inspirée de la modélisation d'habitats écologiques (ex : *Instream Flow Needs* ou IFM, Bovee, 1978), consiste d'abord à discrétiser chaque variable en classes, et ensuite, à établir un rapport (quotient) entre la fréquence des valeurs où l'on constate le phénomène (l'érosion) et la fréquence d'occurrence de ces mêmes conditions sur tout le site à l'étude (disponibilité) (Boudreau *et al.*, 1988; Leclerc *et al.*, 1995). Cette approche, nommée ici « méthode des rapports occurrence/disponibilité », permet d'identifier les conditions les plus propices à l'occurrence du phénomène étudié, c'est-à-dire l'érosion, parmi l'ensemble des possibilités reliées à la variable ciblée (Leclerc *et al.*, 1995).

L'indice global qui constitue une agrégation multivariée des indices de base, fut établi sous la forme d'une moyenne géométrique pondérée, qui consiste à effectuer le produit des indices de base auxquels un poids est attribué sous la forme d'un exposant. Les poids furent établis d'après le niveau de corrélation de chaque variable avec les taux de recul

calculés. Les fondements ayant motivé le choix de cette formule d'agrégation seront abordés à la section 5.2.2. La présente section vise donc à décrire les différents critères qui sous-tendent la définition des indices de base et de l'indice global.

5.2.1. Établissement des indices de base

Tel que mentionné, l'élaboration des indices fut essentiellement basée sur la méthode des rapports occurrence/disponibilité. Parallèlement, lorsque nécessaire, cette méthode fut amendée de façon à intégrer certains principes géotechniques ou hydrauliques extraits de la littérature. Les fonctions constituant les indices furent implantées dans Microsoft Excel 2003®; elles caractérisent la susceptibilité à l'érosion pour la variable considérée.

Chaque fonction comporte trois ou quatre critères correspondant à trois ou quatre segments de droite (voir par exemple la Figure 43c, p. 129). Ces segments de droite sont définis chacun par une équation linéaire ($S=ax+b$) et donc par les paramètres a et b (ou encore par les valeurs des coordonnées de ses extrémités). Ainsi, selon l'exemple de la Figure 43c, une valeur de pente de berge de $x = 25^\circ$, incluse dans le segment 1 (0° et 30°), donnera une valeur de sensibilité de S comprise entre 1 et 2, sur une échelle variant de 1 à 10, la valeur 10 indiquant alors une sensibilité très forte. Ces fonctions permettent ainsi d'attribuer une valeur de sensibilité (S) aux diverses variables contenues dans chaque unité spatiale. À noter que les équations propres à chaque critère se retrouvent dans les figures illustrant les fonctions des indices de base (Figure 43c, 43c, 44c).

Une échelle variant de 1 à 10, et non de 0 à 10, fut choisie de façon à éviter l'occurrence de valeurs 0 réservées à des cas particuliers. En effet, comme une moyenne géométrique pondérée est utilisée pour associer les différents indices de base dans un indice global¹⁰, la présence d'un indice de base nul (0) conduirait à une sensibilité nulle, quelles que soient les valeurs des autres indices de base. En ce sens, les valeurs 0 furent dédiées uniquement aux sections présentant une hauteur de roche en place supérieure à 2 m (variable « géologie de la berge », section 5.2.1.4) pour marquer le fait qu'il ne peut y avoir d'érosion en ces lieux, du moins pour les échelles de temps considérées dans ce travail.

¹⁰ Voir la section 5.2.2, p 133.

À noter qu'un intervalle 0,1 - 1 aurait aussi pu être utilisé. Cependant, une échelle allant de 1 à 10 « répond » mieux à l'attribution de poids sous la forme d'exposants. Une valeur de 1 demeure en effet invariable quelle que soit la puissance ($1^x = 1$). Ainsi, dans un intervalle 0,1 - 1, la valeur maximale devient indépendante de tout poids, alors que dans l'intervalle 1 - 10, c'est plutôt la valeur minimale qui devient indépendante de tout poids. Dans le cas présent, il fut donc jugé plus juste d'accorder moins d'importance aux valeurs minimales, en les rendant indépendantes des poids, et d'octroyer une importance maximale aux valeurs les plus élevées (10), en les rendant influençables à l'allocation de poids.

5.2.1.1. Pente de la berge

Tout d'abord, afin de tenir compte de la sous-évaluation des pentes calculée pour chaque unité spatiale, phénomène mentionné à la section 4.3.3.1.2, les bornes inférieures des classes furent employées comme critères au lieu des centres de classes, critères de référence employés pour l'élaboration des autres indices. Comme les classes présentaient un pas de dix degrés, cette opération conduisait ainsi à corriger de cinq degrés (à la baisse) l'angle des pentes et donc à décaler dans ces mêmes proportions les valeurs de sensibilité attribuées à la pente des berges.

Ensuite, la méthode des rapports occurrence/disponibilité fut établie en deux étapes (Figure 43 a et b). L'indice fut alors calqué sur les valeurs de l'histogramme de la Figure 43b, à l'exception du premier segment qui fut fixé en fonction de l'angle naturel d'équilibre (angle de friction) des deux groupes sédimentaires identifiés sur le site. Une synthèse réalisée par Beck (2006), à partir de diverses classifications existantes (Darby, 2005; Simon *et al.*, 2002; VSS, 1999), permet de dégager des valeurs typiques d'angle d'équilibre de 35° pour les dépôts grossiers hétérogènes et de 37° pour les dépôts sableux. La valeur de 35° fut préférée du fait que les dépôts sableux contenaient aussi une fraction de gravier. Cette valeur fut corrigée de 5°, donc ramenée à 30°, pour tenir compte de la sous-évaluation des pentes mentionnée précédemment. À cette valeur fut ensuite attribuée la valeur moyenne des cas inférieurs à 30°, alors que le point d'amorce de ce segment fut fixé à 1, de façon à attribuer une valeur nulle aux pentes égales à 0 (Figure 43c). Ces critères visaient à attribuer une sensibilité faible aux pentes inférieures à 30°, mais

néanmoins légèrement ascendante pour illustrer l'action croissante de la composante gravitaire sur les dépôts. L'augmentation marquée de la sensibilité, passé cette limite, permet ensuite de représenter le potentiel croissant d'effondrement de la berge une fois l'angle d'équilibre de ses dépôts dépassé (Figure 43c), en conformité avec l'aspect de l'histogramme des rapports occurrence/disponibilité (Figure 43b).

5.2.1.2. Pente du lit

La méthode des rapports permet de faire ressortir une relation globalement croissante (Figure 44b) difficilement identifiable *a priori* par la distribution des sections en érosion (Figure 44a). L'indice fut donc établi d'après l'histogramme des rapports occurrence/disponibilité avec un point d'amorce à une sensibilité faible (1) et un plateau de sensibilité maximale (10) à partir du milieu de la classe [0,007-0,008[(Figure 44c). La forme se veut en accord avec les observations de Kochel (1988) et de Hickin et Nanson (1975), à savoir que les changements les plus importants se produiraient à l'évidence dans les sections de chenal où le gradient de pente est le plus prononcé.

5.2.1.3. Rayon de courbure de la berge

Selon la littérature, la dégradation des berges serait plus importante dans les zones à forte sinuosité (Kochel, 1988), en lien notamment avec l'induction d'une composante hélicoïdale en réponse à un changement de direction de l'écoulement (Beck, 2006; Franca, 2005; Ritter *et al.*, 2002) (section 2.1.3.2). Un court rayon de courbure impliquerait donc un potentiel d'érosion accru. À noter que, tel que mentionné à la section 4.3.3.3, des relations empiriques décrivant le rapport entre le rayon de courbure et l'érosion existent dans la littérature (Consuegra *et al.*, 1999; Hickin et Nanson, 1975). Cependant, comme le mode de production de cette donnée différait de celui employé dans la présente recherche, ces relations ne s'avèrent pas applicables. En effet, Consuegra *et al.* (1999) employèrent un pas de calcul fixe, tel qu'expliqué à la section 4.3.3.3, alors que Hickin et Nanson (1975) utilisèrent un rapport entre le rayon de courbure et la largeur du cours d'eau. Ce dernier mode de production fut notamment testé, mais la présence d'îles au sein du chenal biaisait les valeurs de largeur ce qui rendit cette technique inapplicable.

Dans cette optique, la méthode des rapports occurrence/disponibilité fut de nouveau préconisée. Ainsi, une discrétisation des données par progression géométrique fut d'abord

réalisée afin de couvrir l'étendue des valeurs de rayon de courbure obtenues (Figure 45a). Ensuite, les critères furent établis à l'aide du milieu des classes [88-117[, [479-635[et [842-1116[, de façon à épouser la forme de la distribution globale de l'histogramme des rapports (Figure 45b). À noter toutefois que les rapports au sein de la classe [842-1116[ne furent pas considérés, étant donné qu'elles traduisent un profil de berge plutôt rectiligne peu inclin à l'érosion et qu'elles apparaissent comme des valeurs extrêmes non liées au rayon de courbure proprement dit. L'allure décroissante l'histogramme fut donc prolongée en implantant une valeur de 1 à cette classe (Figure 45c).

5.2.1.4. Géologie de la berge

Cet indice ne fut pas structuré sous la forme d'une fonction à plusieurs segments linéaires, mais plutôt en attribuant une valeur fixe de sensibilité à chaque unité géologique. Lors de cette assignation, une valeur de 0 fut notamment attribuée à la classe *roche en place supérieure à 2 m*. Il s'agit des seules occurrences de valeurs nulles incorporées au modèle. Celles-ci visaient, selon la structure multiplicative du modèle, à annuler toute valeur de sensibilité de façon à tenir compte de l'immuabilité des sections rocheuses.

La sensibilité des deux autres unités géologiques fut, en conformité avec les autres indices de base, établie selon la méthode des rapports occurrence/disponibilité. Ainsi, les statistiques d'érosion et de disponibilité des classes de géologie indiquèrent d'abord que les dépôts deltaïques enregistrèrent 2,1 fois plus de cas d'occurrence d'érosion que les dépôts fluvioglaciaires, alors que leur présence était 1,5 fois moins fréquente relativement (Figure 46a). Ensuite, une fois ramenées en rapports, ces valeurs permirent de faire ressortir un écart de sensibilité marqué entre les dépôts deltaïques et les dépôts fluvioglaciaires (Figure 46b). Cet écart témoigne de la compétence d'écoulement nécessaire au transport des dépôts en lien avec leur granulométrie, et rejoint en ce sens le principe de base du transport sédimentaire d'Hjulström (1935) avancé à la section 2.1.3.1, à savoir que les vitesses d'écoulement nécessaires à l'érosion des dépôts non cohésifs augmentent en fonction de la granulométrie de ceux-ci (Figure 4).

Enfin, les valeurs de rapport des dépôts deltaïques et fluvioglaciers furent normalisées à 10, ce qui permit de conserver cette différence de sensibilité entre les deux groupes (Figure 46c).

5.2.1.5. Présence d'immunisation en berge

Tel que mentionné à la section 4.3.3.5.1, vingt-trois segments immunisés furent répertoriés, ce qui correspond à près de 2 km de berge et à un nombre total de 326 unités spatiales. Ce seul fait témoigne de la présence de la problématique d'érosion sur la Montmorency. La quantification de la robustesse de ces différents ouvrages dépassant le cadre de ce projet, cette variable ne fut pas traduite en un indice. Elle fut préférablement simplifiée à une nomenclature binaire présence/absence et par la suite intégrée à l'indice global sous la forme d'un terme multiplicatif agissant sur le résultat du produit de la moyenne géométrique pondérée. Ainsi, selon le principe binaire mentionné précédemment, les valeurs attribuées à cette variable furent 0,5 pour la présence et 1 pour l'absence, de sorte que la présence de ce type de structure ait pour effet de faire diminuer le score de sensibilité de moitié. La valeur de 0,5 fut choisie en formulant l'hypothèse conservatrice que ces structures présenteraient autant de chance de résister à l'érosion que d'être elles-mêmes emportées ou endommagées par celle-ci. En somme, malgré le fait qu'il n'aurait pas été totalement erroné de considérer certains de ces ouvrages comme résistants à l'érosion, la valeur de 0,5 fut préconisée par précaution. Une interprétation plus appropriée exigerait un relevé spécifique des dimensions et caractéristiques de ces ouvrages.

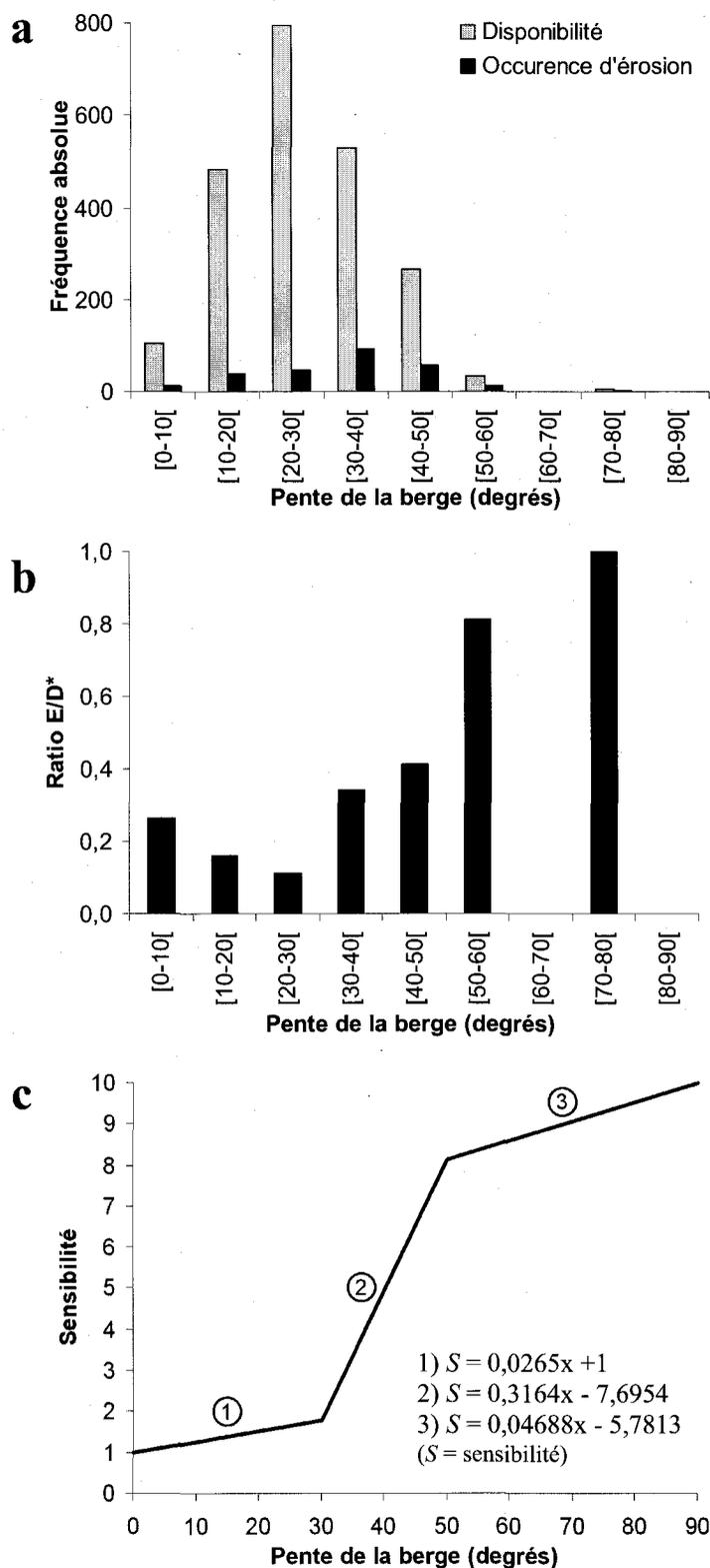


Figure 43 : Étapes d'élaboration de l'indice de base de la variable pente de la berge. (a) discrétisation des données d'érosion et de disponibilité (fréquence des classes de la variable), (b) établissement des rapports occurrence/disponibilité pour chaque classe de pente, (c) forme de l'indice de base final. Les équations 1, 2 et 3 correspondent respectivement à un segment de droite (critère) de l'indice de base.

* Érosion/disponibilité

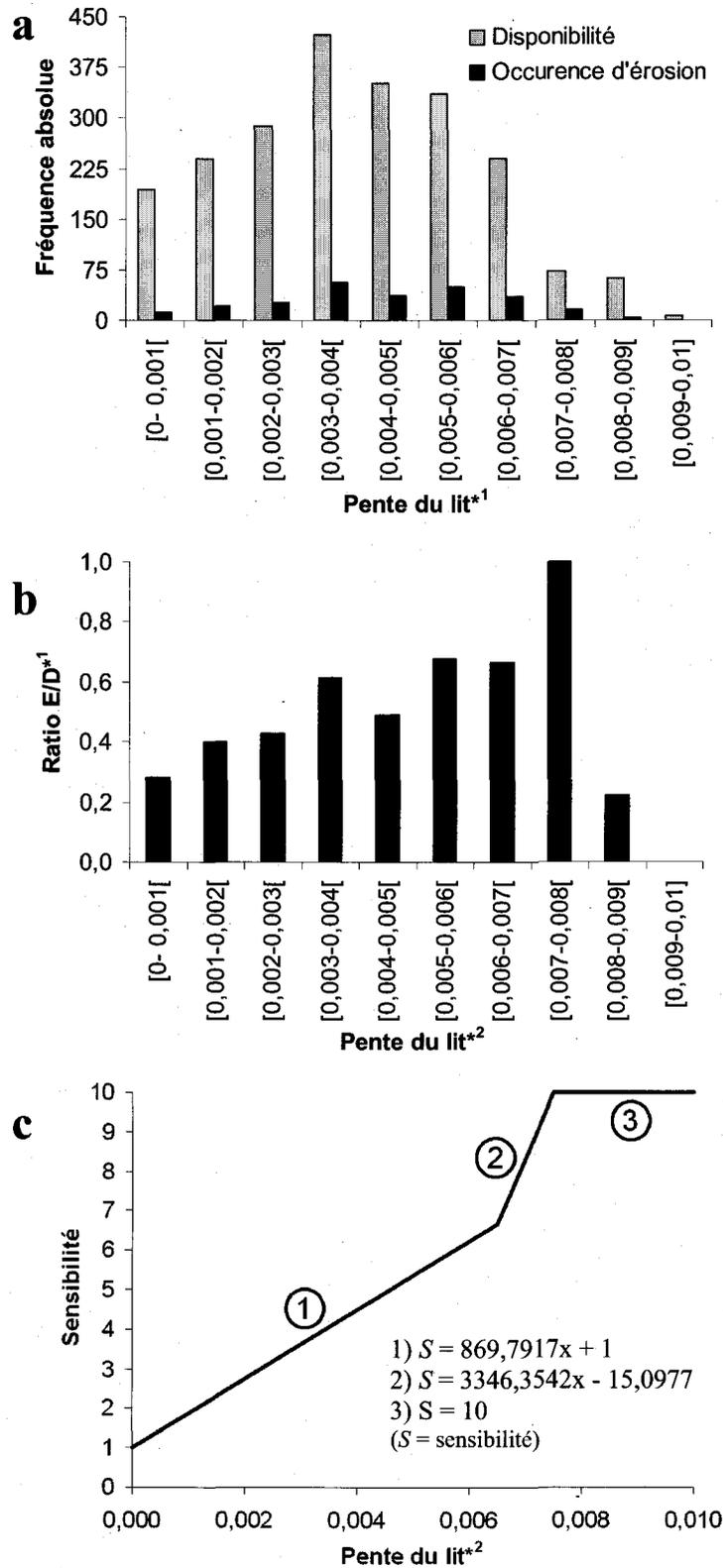


Figure 44 : Étapes d'élaboration de l'indice de base de la variable pente du lit. (a) discrétisation des données d'érosion et de disponibilité (fréquence des classes de la variable), (b) établissement des rapports occurrence/disponibilité pour chaque classe de pente, (c) forme de l'indice de base final. Les équations 1, 2 et 3 correspondent respectivement à un segment de droite (critère) de l'indice de base.

*1: Érosion/disponibilité

*2: mètre vertical sur 1 mètre horizontal

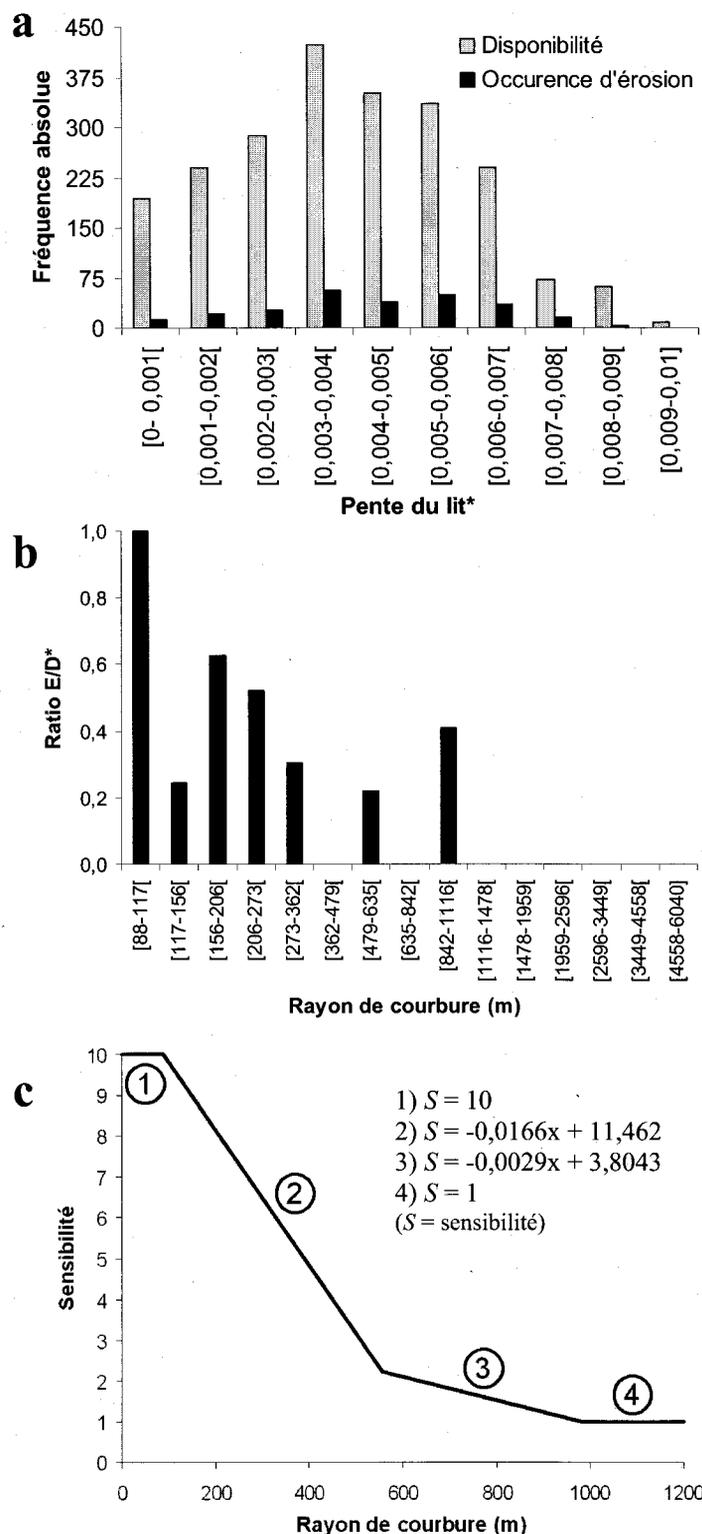


Figure 45 : Étapes d'élaboration de l'indice de base de la variable rayon de courbure de la berge. (a) discrétisation des données d'érosion et de disponibilité (fréquence des classes de la variable), (b) établissement des rapports occurrence /disponibilité pour chaque classe de rayon de courbure, (c) forme de l'indice de base final. Les équations 1, 2 et 3 correspondent respectivement à un segment de droite (critère) de l'indice de base.

*: Érosion/disponibilité

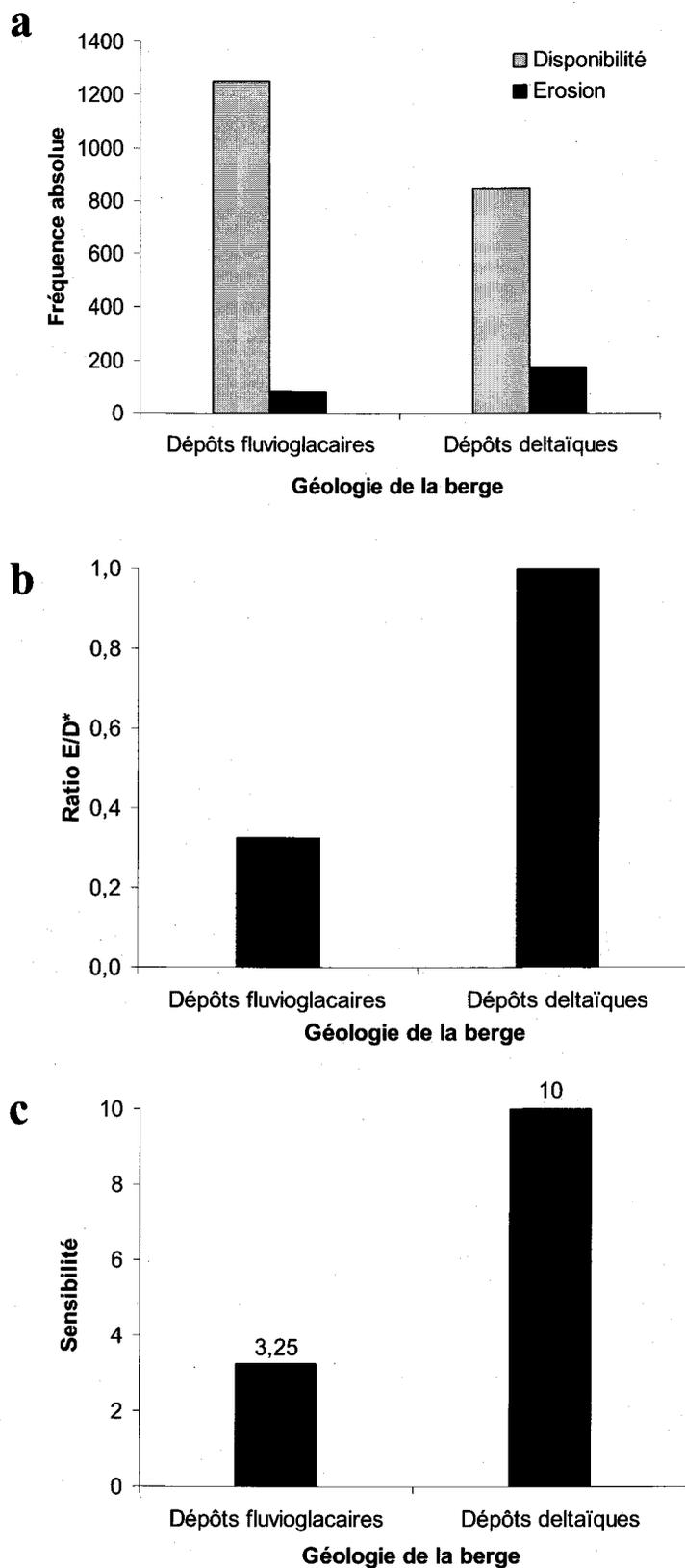


Figure 46 : Étapes d'élaboration de l'indice de base de la variable géologie des berges. (a) discrétisation des données d'érosion et de disponibilité (fréquence des classes de la variable), (b) établissement des rapports occurrence /disponibilité pour chaque classe de dépôt, (c) forme de l'indice de base final.

*: Érosion/disponibilité

5.2.2. Établissement de l'indice global

L'élaboration de l'indice global comporte deux aspects : l'attribution de poids (puissances) et l'agrégation des indices de base pondérés par ceux-ci, qui sont regroupés au sein de la moyenne géométrique pondérée :

$$I_G = I_1^{n_1} \times I_2^{n_2} \times \dots \times I_j^{n_j}; \sum_1^N n = 1 \quad (\text{Eq. 2})$$

où I_G est l'indice global; I_j l'indice de base (spécifiquement pour la variable j); n_j le poids ou puissance accordé à l'indice I_j . La moyenne géométrique pondérée permet, d'une part, l'attribution de poids aux indices de base tout en conservant des valeurs finales entre 1 et 10, et d'autre part, la prise en compte de valeurs 0 (uniquement lorsqu'il y a présence de roche en berge sur une hauteur supérieure à 2 m).

5.2.2.1. Attribution de poids

Tel que mentionné au début de la section 5.2 (Critériologie), les poids attribués aux quatre variables d'origine naturelle furent obtenus à partir de la corrélation entre chaque variable et les taux de recul observés (colonne 2, Tableau 21). Ces valeurs furent par la suite normalisées en divisant chacune d'entre elles par la somme des coefficients de corrélation, afin que leur somme soit égale à 1 au final (colonne 3, Tableau 21).

Tableau 21 : Établissement des poids dans l'indice global

Indice de base (I)	Coeff. corr.* ¹	Poids (n) [0,1]* ²
Pente de la berge (I_{Pb})	0,034	0,048
Pente du lit (I_{Pl})	0,225	0,310
Géologie de la berge (I_{Gl})	0,339	0,468
Rayon de courbure de la berge (I_{Rc})	0,126	0,174
Somme	0,725	1

*¹ Coefficient de corrélation entre les taux de recul et la variable.

*² Division du coefficient de corrélation par la somme des coefficients de corrélation.

5.2.2.2. Agrégation finale des variables

La formule d'agrégation finale intégrant toutes les variables de même que leur poids figurent ci-après :

$$S = [I_{Pb}^{0,048} \times I_{Pl}^{0,310} \times I_{Li}^{0,468} \times I_{Rc}^{0,174}] \times I_{Im} \quad (\text{Eq. 3})$$

où S indique la sensibilité globale à l'érosion entre 0 et 10 (incluant la présence de valeurs 0), I_{Pb} est l'indice de la pente de la berge, I_{Pl} est l'indice de la pente du lit, I_{Li} est l'indice de la géologie de la berge, I_{Rc} est l'indice du rayon de courbure et I_{Im} est l'indice de la présence d'immunisations en berge.

On observe notamment, que ce dernier (I_{Im}) multiplie le résultat en provenance de l'agrégation des variables d'origine naturelle. Rappelons que celle-ci consiste à réduire de moitié la valeur de sensibilité pour les sections immunisées par des ouvrages variés.

5.3. Validation

5.3.1. Approche

L'approche préconisée consiste à quantifier la sensibilité des berges à l'érosion obtenue pour des sections qui se trouvaient en érosion en 2009. Ces données de validation furent relevées directement sur le terrain (sections 3.1.2 et 3.2.1.4) et constituent un jeu de données indépendant qui ne fut pas utilisé dans la routine de modélisation. Elles comprennent des classes de hauteur d'érosion, soit des catégories définissant la hauteur des portions de berge perturbées par l'érosion. Selon ce principe, la dimension de la portion verticale érodée se veut le témoin de la magnitude de l'érosion passée. En ce sens, la sensibilité à l'érosion devrait s'accroître en fonction de la hauteur verticale d'érosion et diminuer dans les zones présentant une hauteur d'érosion moindre ou nulle. Une relation de ce type indiquerait alors la validité du modèle développé.

5.3.2. Données de validation

Ces données comportent quatre classes de hauteur qui englobent la totalité des unités spatiales (US) du site d'étude (2217 US), de sorte que la sensibilité modélisée fut validée pour tout le tronçon à l'étude. Ces classes sont:

- Classe 1 : aucune érosion (1660 US);
- Classe 2 : 1 m et moins (158 US);
- Classe 3 : 1 m et plus (220 US);
- Classe 4 : 1 m et plus (2) (164 US).

La classe 4 correspond à une hauteur d'érosion supérieure à 1 m, pour laquelle un recul fut aussi enregistré lors de l'étape du suivi de l'érosion des berges (section 4.1.4). Ces sections furent considérées comme ayant été sujettes à une magnitude d'érosion supérieure à celle des sections érodées sur une même hauteur, mais n'ayant pas enregistré

de recul. La magnitude de l'érosion y aurait été d'autant plus importante que les valeurs de retrait se devaient d'être supérieures à 3 ou 4 m pour être dépistées par la méthode de cartographie des traits de berges (seuils de détection, section 4.1.2.3).

Le critère de hauteur de 1 m fut établi d'après la hauteur des lignes d'eau en crue, modélisées par Boucher et Picard (1994) (section 4.3.3.4.3), et renvoie à une surélévation du niveau de l'eau correspondant sensiblement au débit plein bord ($439 \text{ m}^3/\text{s}$) (section 1.3.4). Des surcotes de cette magnitude furent de plus observées à divers endroits sur le terrain au printemps 2008, lors d'une crue de $410 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui confirme la validité de ce critère.

Afin d'éviter toute ambiguïté au niveau de l'acquisition de ces données sur le terrain, une définition simple d'une berge en érosion fut proposée, soit : « une partie de berge affichant un escarpement subvertical exposant localement les dépôts meubles ». À noter que toute section sujette au sous-cavage (érosion du pied de berge) et mettant en surplomb une portion de berge d'une hauteur supérieure à 1 m se vit automatiquement intégrée à la classe 3, ou à la classe 4 le cas échéant. Cette catégorisation résulte du fait que ce type de disposition morphologique induit un déséquilibre géotechnique favorisant l'effondrement subséquent de la berge (Beck, 2006), lequel peut alors impliquer une portion de berge d'une hauteur supérieure à 1 m.

Les valeurs de sensibilité obtenues pour chaque classe de hauteur d'érosion furent discrétisées en cinq classes d'égale amplitude, soit [0-2] (très faible), [2-4] (faible), [4-6] (modérée), [6-8] (élevée), [8-10] (très élevée) et une classe [0] (nulle) qui marque les sections de berge formées de roche en place (section 5.2.1.4). Afin d'éviter la présence de classes vides, la distribution des valeurs de sensibilité originellement situées entre 0 et 7,90 fut répartie proportionnellement (en conservant la forme de la distribution d'origine) entre 0 et 10.

5.3.3. Résultats de validation

La Figure 47 indique que les sections ayant enregistré une hauteur d'érosion importante en 2009, soit 1 m et + (classe 3) et 1 m et + (2) (classe 4), se concentrent vers la droite du graphique dans les classes de sensibilité modérée, élevée et très élevée; que celles caractérisées par une hauteur d'érosion moindre (1 m et -) (classe 2) se concentrent au

centre au niveau des classes de sensibilité faible et modérée; tandis que les sections sans érosion se concentrent vers les classes de faible sensibilité.

Ces résultats indiquent que la sensibilité des sections modélisée augmente en fonction de la hauteur d'érosion. Cette relation croissante est particulièrement bien illustrée par les moyennes de sensibilité obtenues pour chaque classe de hauteur d'érosion (Figure 48) et permet de conclure que le modèle représente bien le phénomène de l'érosion des berges.

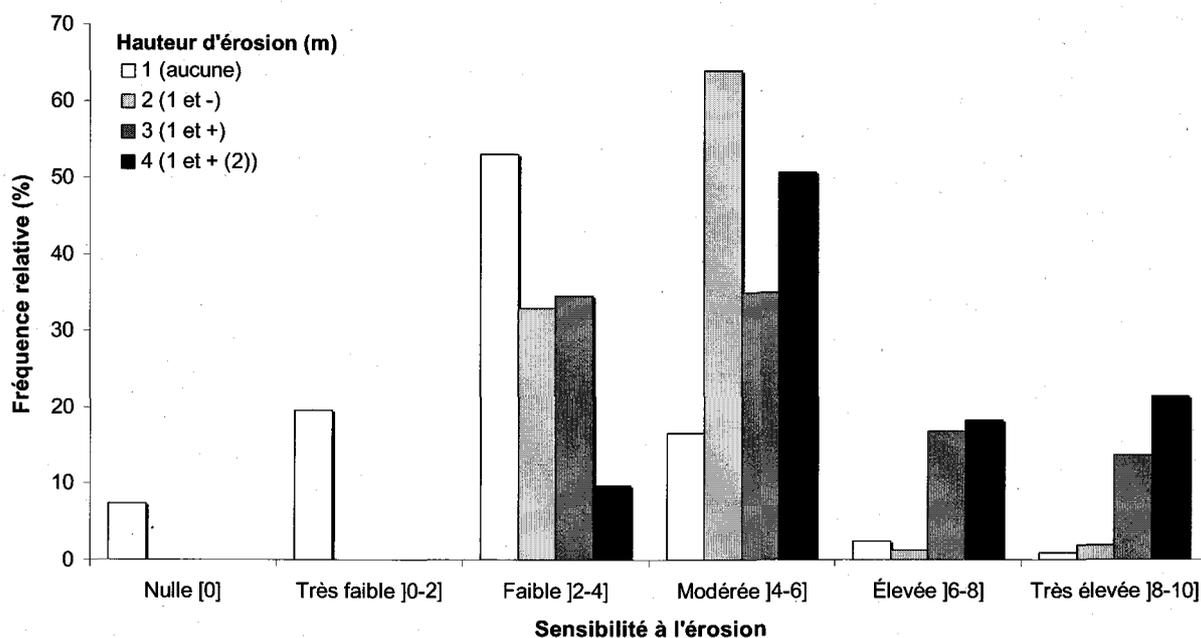


Figure 47 : Valeurs de sensibilité à l'érosion enregistrées par chaque catégorie de hauteur d'érosion.

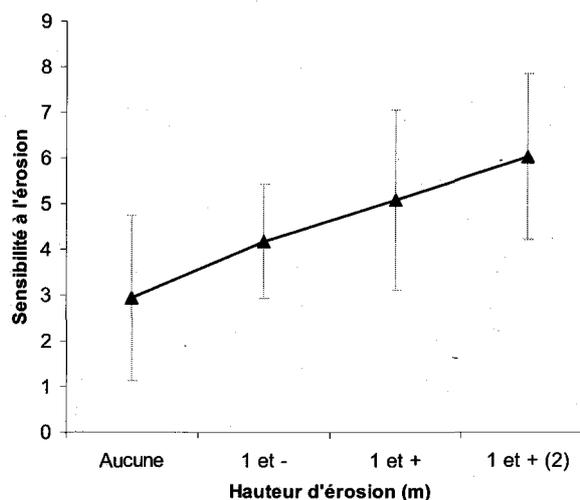
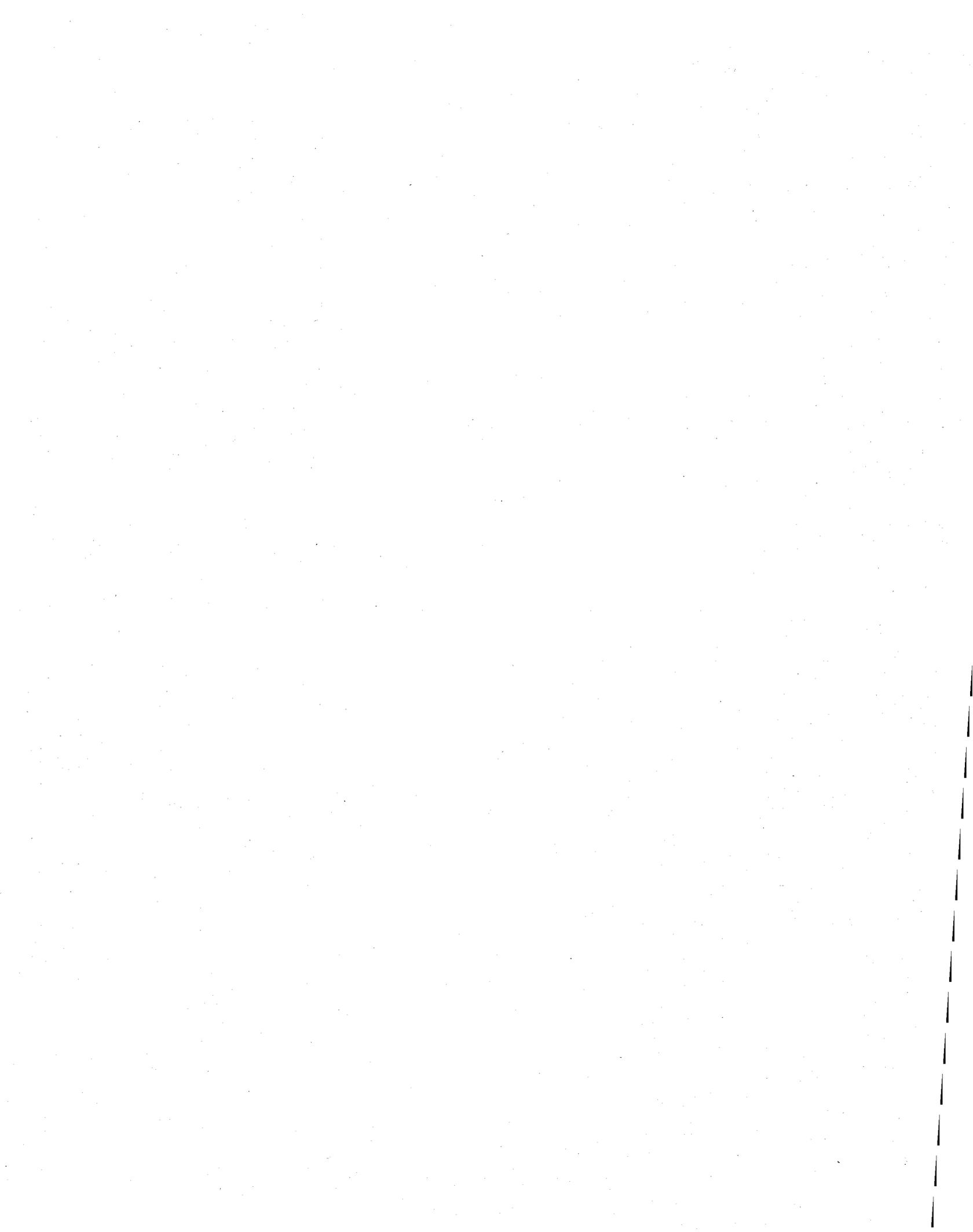


Figure 48 : Valeur moyenne de sensibilité à l'érosion pour chaque classe de hauteur d'érosion.

Néanmoins, la présence d'effectifs en provenance des classes de hauteur d'érosion 1 et + (classe 3) et 1 et + (2) (classe 4) au niveau des classes de sensibilité faible et moyenne suggère que le modèle tendrait à sous-estimer légèrement la sensibilité à l'érosion. Afin de tenir compte de cette sous évaluation, les valeurs de sensibilité supérieures ou égales à la classe modérée (donc plus grande que 4) feront l'objet d'une attention particulière lors de l'interprétation des résultats (section 1).



6. RÉSULTATS OBTENUS SUR LA RIVIÈRE MONTMORENCY

Cette section consiste à analyser les résultats de sensibilité des berges à l'érosion obtenus pour le site de la rivière Montmorency, suite à l'application des diverses méthodes développées dans cette recherche. Celle-ci comporte deux sous-sections : l'une dédiée aux résultats statistiques et l'autre consacrée aux résultats cartographiques. La première permet de visualiser globalement la sensibilité de l'ensemble du site d'étude, alors que la deuxième favorise un examen plus détaillé des zones sensibles. Dans cette dernière, les résultats furent notamment analysés en prenant en compte les observations de terrain de même que certaines données historiques permettant de mieux expliquer les conditions particulières pouvant être l'origine de certaines occurrences d'érosion. En complément, tel que mentionné à la section 3.1.3, la présence de vulnérabilité fut aussi prise en compte.

6.1. Résultats statistiques

En lien avec les observations de la section 5.3.3, les résultats de sensibilité furent segmentés en deux groupes : un premier regroupant les classes de sensibilité nulle à faible et un second rassemblant les rangs de sensibilité modérée à très élevée. Ainsi, on constate que le premier ensemble concentre la majorité des effectifs, soit 65% des berges du site et donc 8,6 km de rive, alors que le second regroupe les 35% restant, soit 4,7 km de berge (Figure 49). Ces proportions indiquent que plus des deux tiers des berges du site seraient globalement peu sensibles à l'érosion. De façon générale, ces données s'avèrent conformes aux principes mentionnant que les chenaux tendent naturellement à être en équilibre (Lane, 1955; Leopold et Maddock, 1953).

Pour simplifier l'interprétation des résultats cartographiques à la section suivante, l'attention portera essentiellement sur le second ensemble, où les classes de sensibilité modérée, élevée et très élevée concentrent respectivement 24,8%, 6,1% et 4,7% des berges.

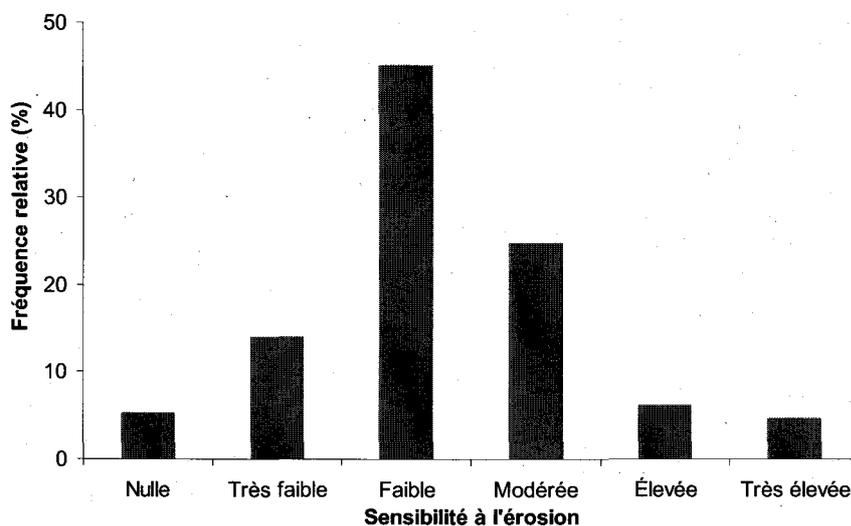


Figure 49 : Distribution de la sensibilité des berges à l'érosion modélisée sur un tronçon de la rivière Montmorency.

6.2. Résultats cartographiques

Cette section comporte deux parties, la présentation des cartes de sensibilité des berges à l'érosion et l'analyse de celles-ci.

6.2.1. Présentation des cartes

En tout, dix-neuf cartes à l'échelle du 1: 3000 couvrent la totalité du tronçon à l'étude. La position de celles-ci fut établie de façon à englober trois bornes kilométriques pour faciliter le repérage au sein du site d'étude. À noter qu'afin de simplifier le contenu de chaque carte, la légende commune à celles-ci ne figure qu'une seule fois au début du recueil de cartes.

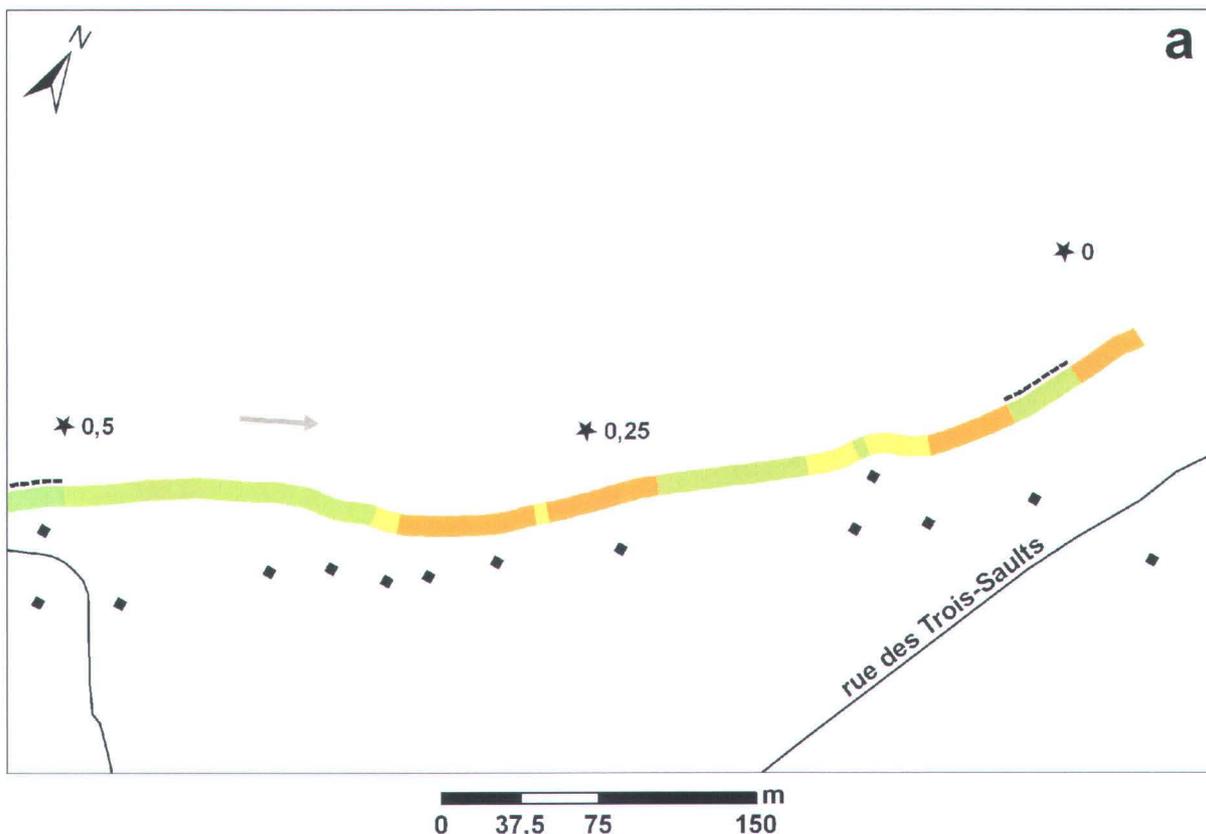


Figure 50 : Sensibilité des berges à l'érosion d'un tronçon de la rivière Montmorency.

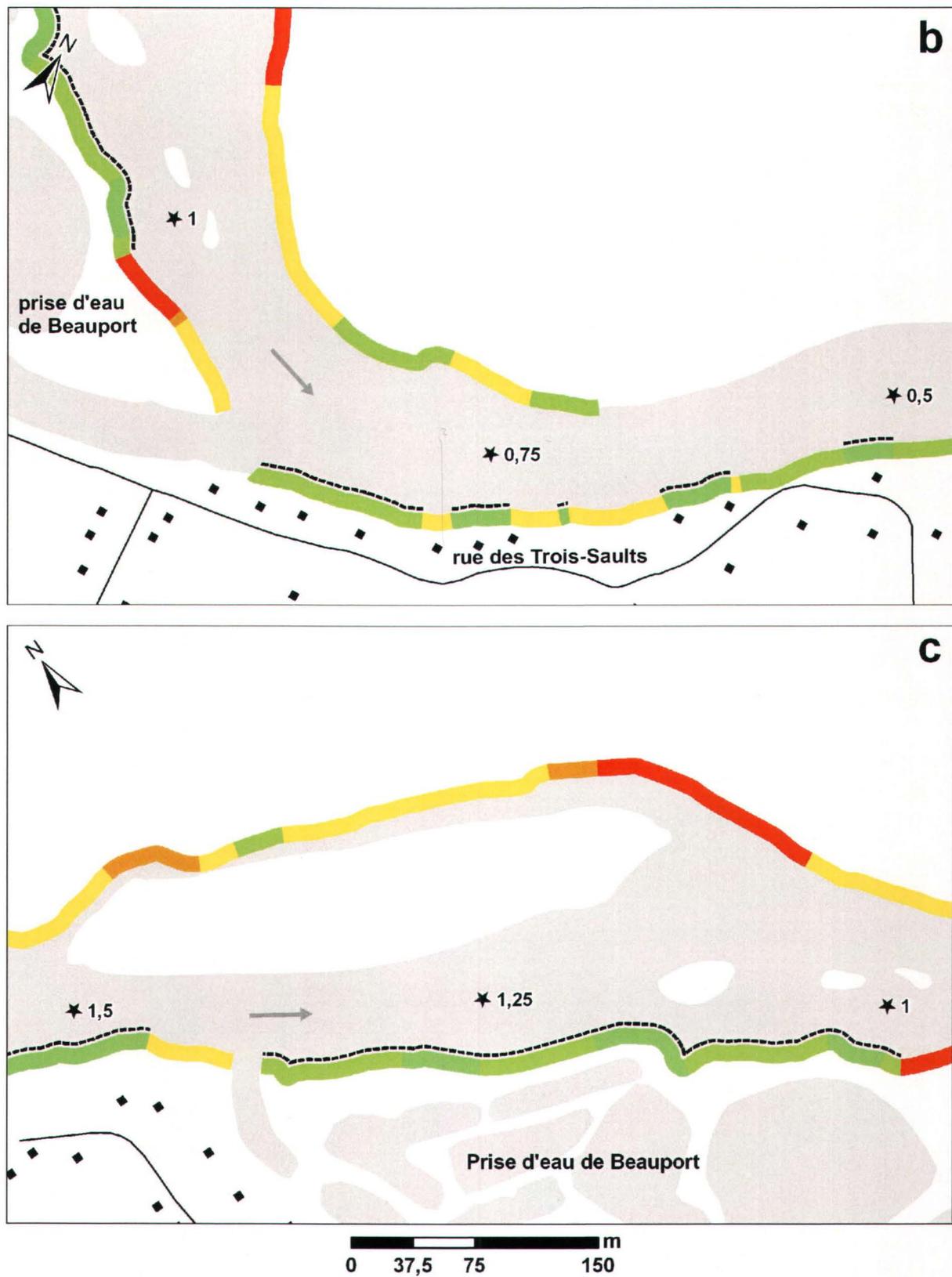


Figure 50 (suite), la légende est présentée à la figure a.

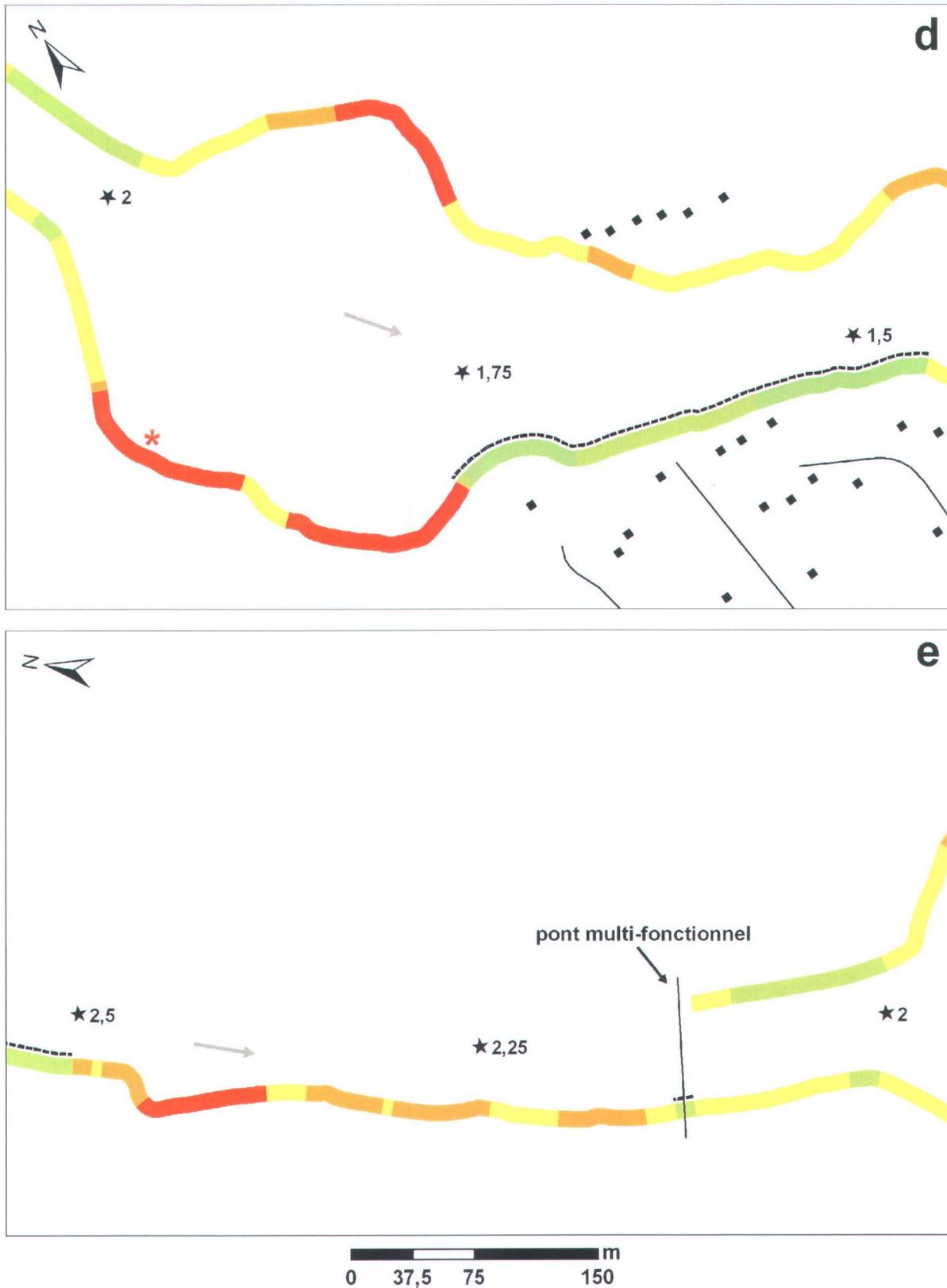


Figure 50 (suite), la légende est présentée à la figure a. L'étoile rouge correspond à un site de glissement de terrain.

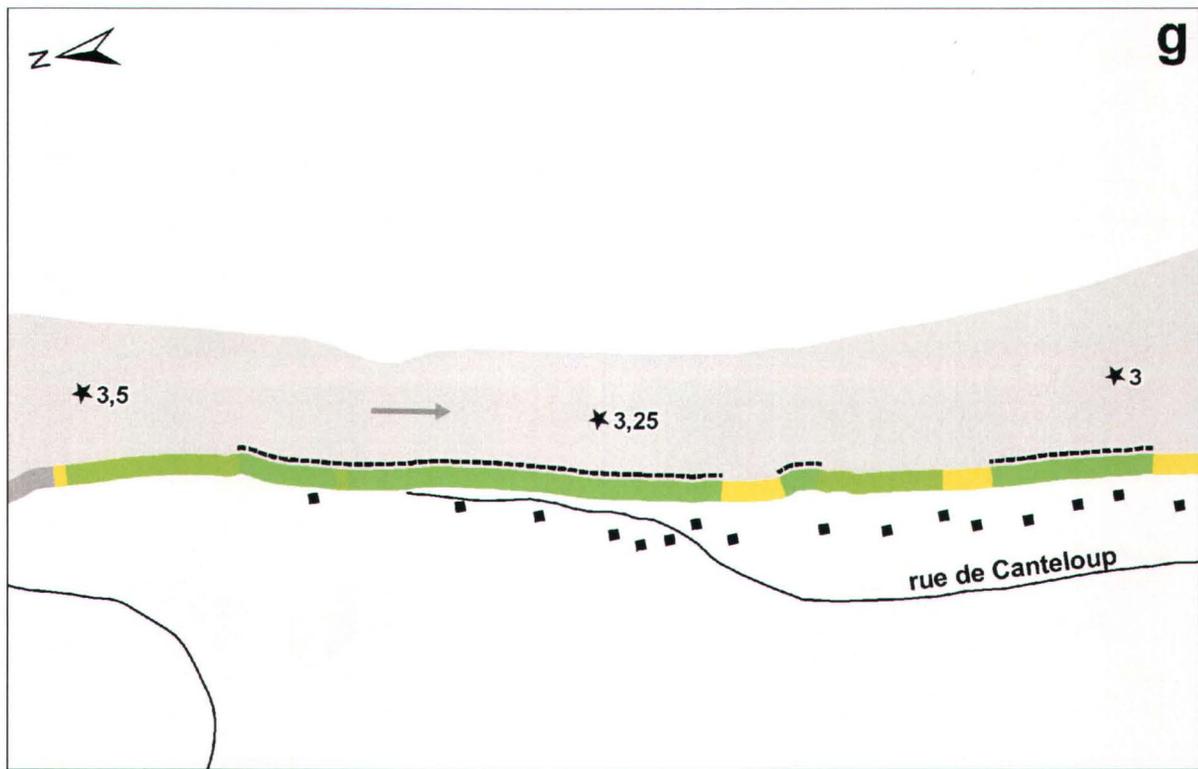
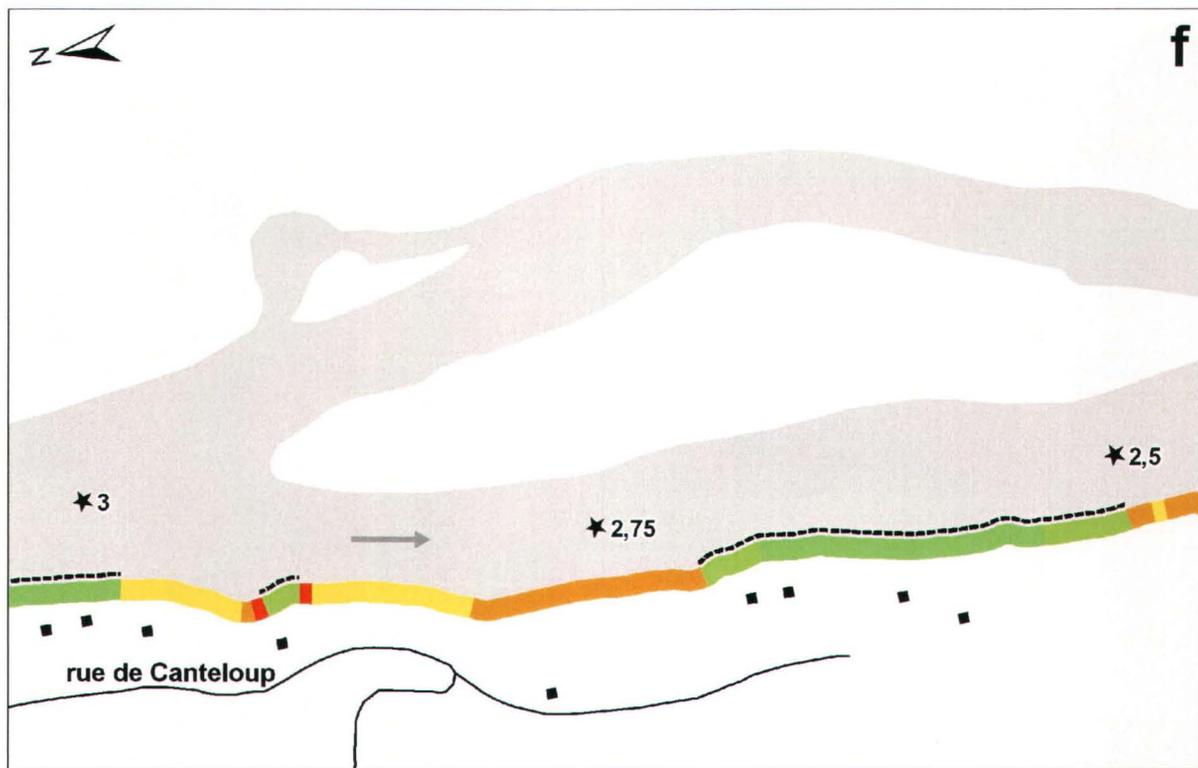


Figure 50 (suite), la légende est présentée à la figure a.

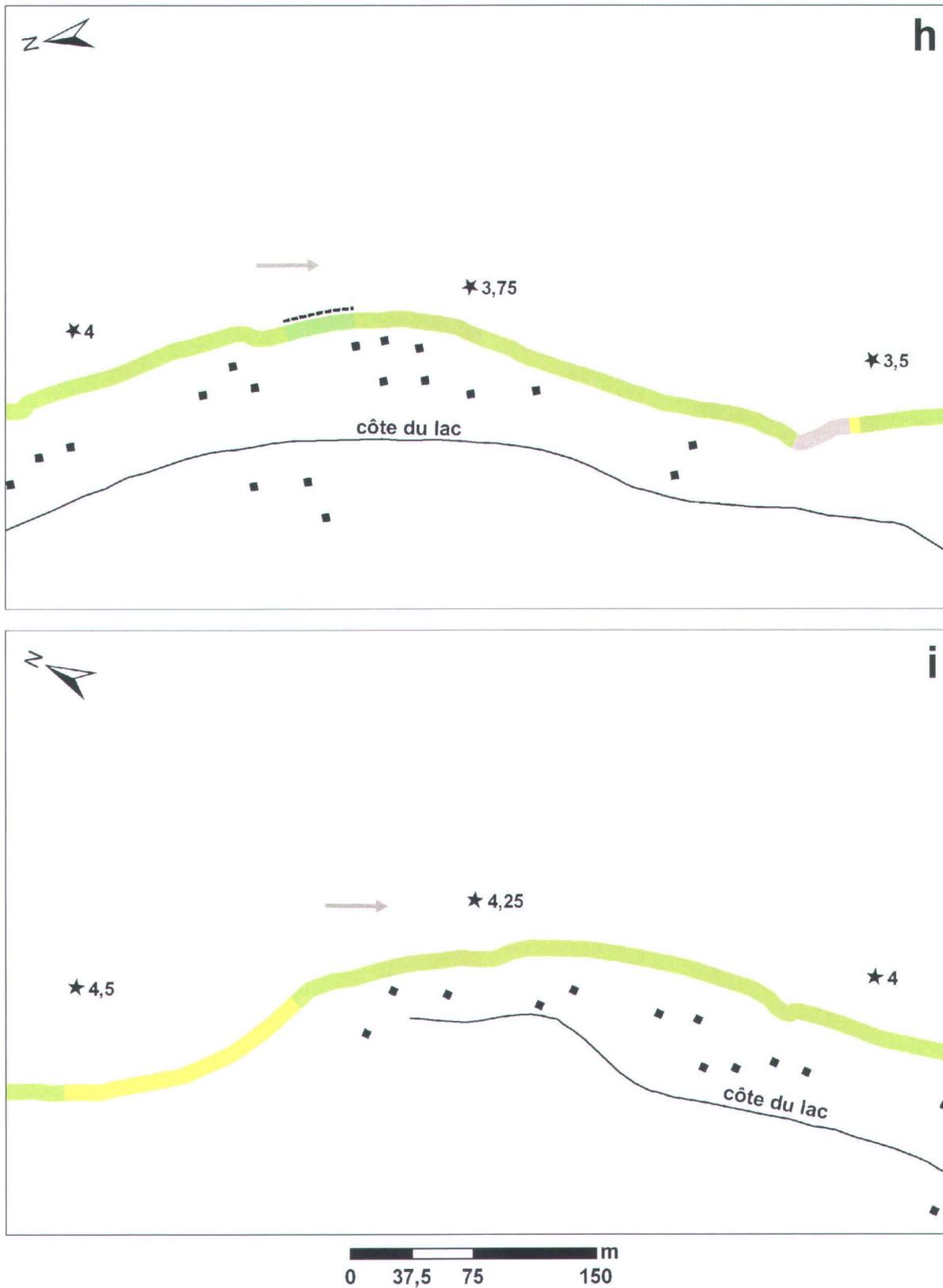


Figure 50 (suite), la légende est présentée à la figure a.



Figure 50 (suite), la légende est présentée à la figure a.

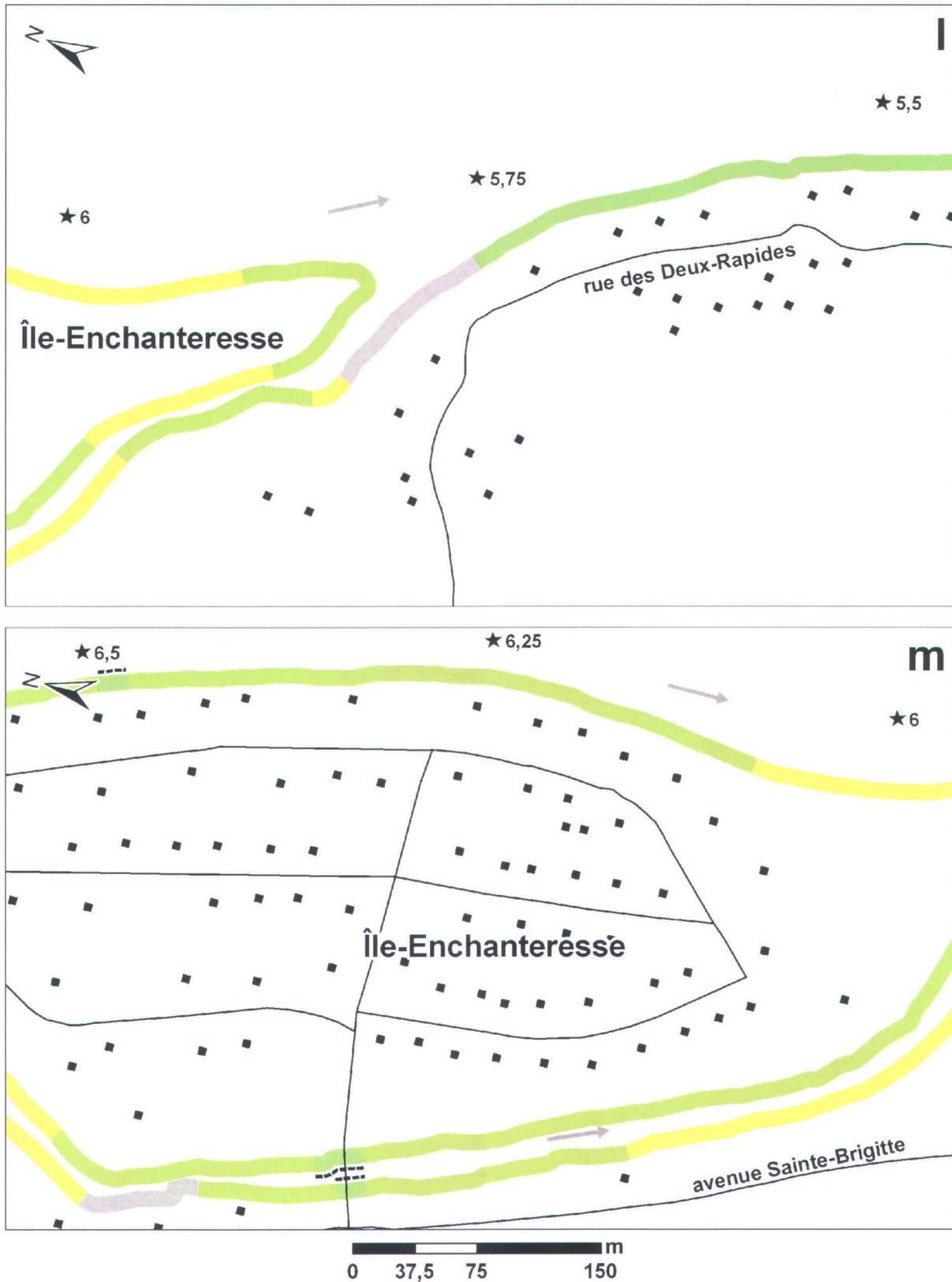


Figure 50 (suite), la légende est présentée à la figure a.

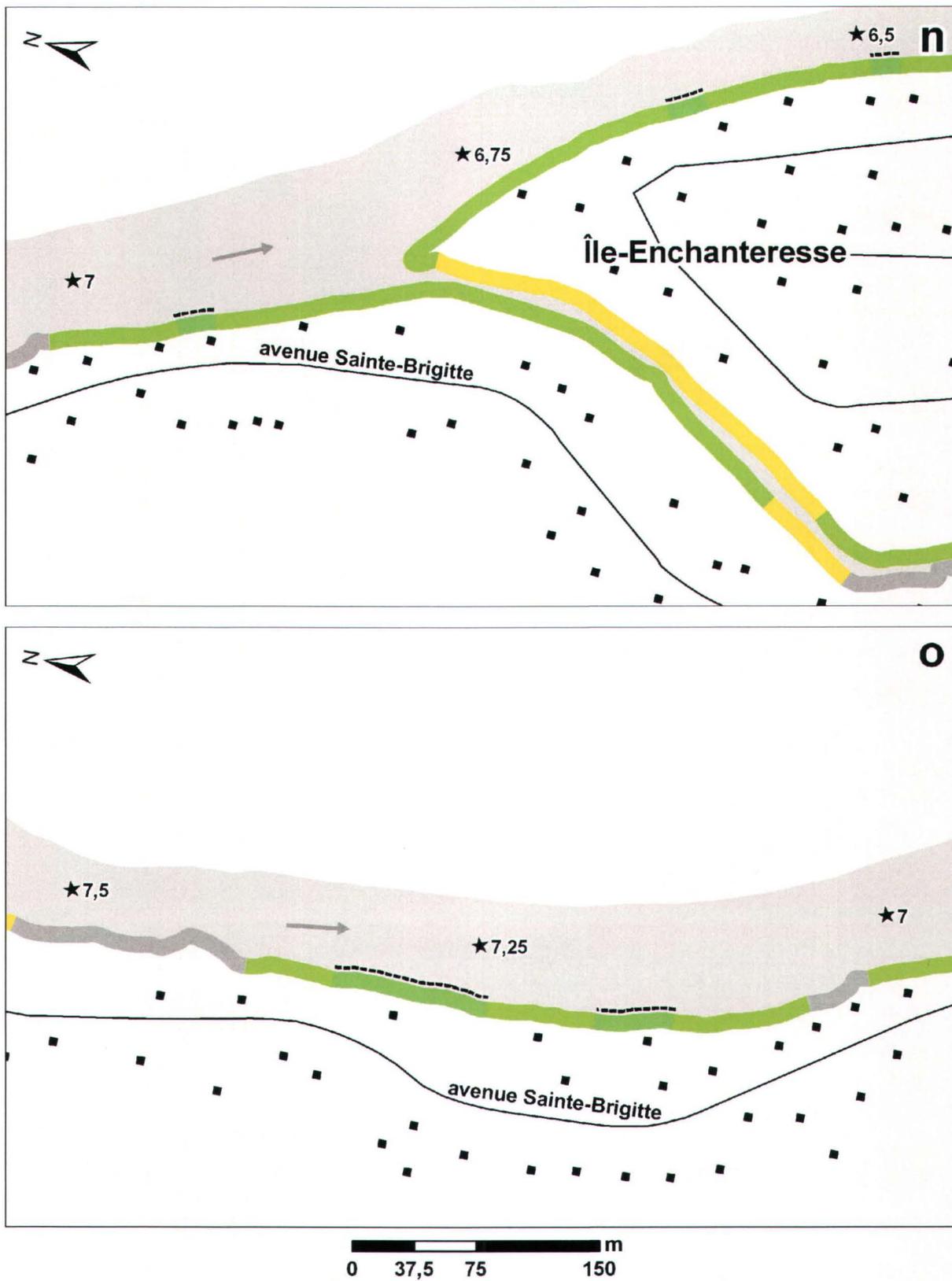


Figure 50 (suite), la légende est présentée à la figure a.

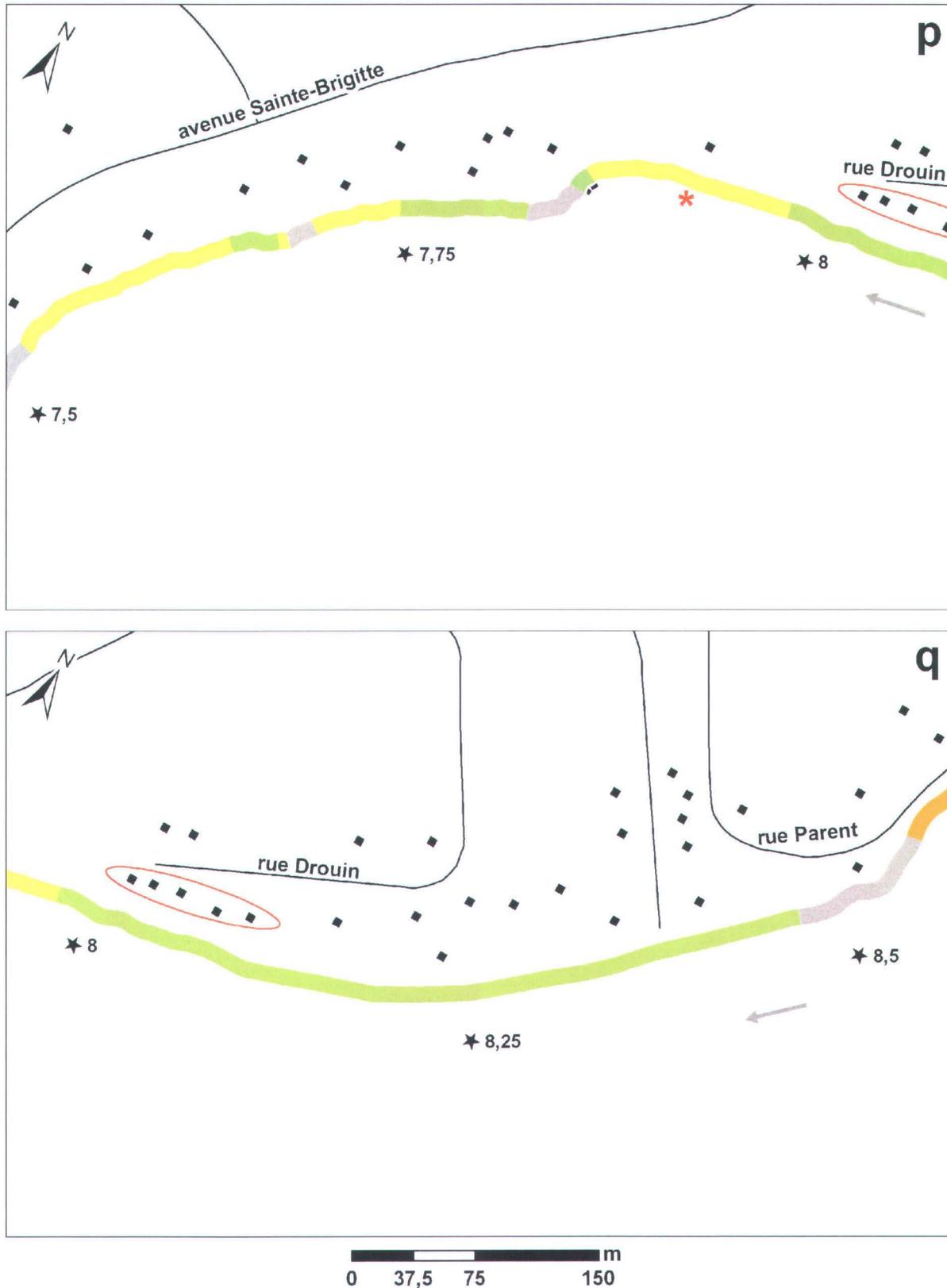


Figure 50 (suite), la légende est présentée à la figure a. L'étoile rouge correspond à un site de glissement de terrain. L'ovale rouge indique un groupe d'habitations dont le terrain pourrait être sujet à un effondrement.

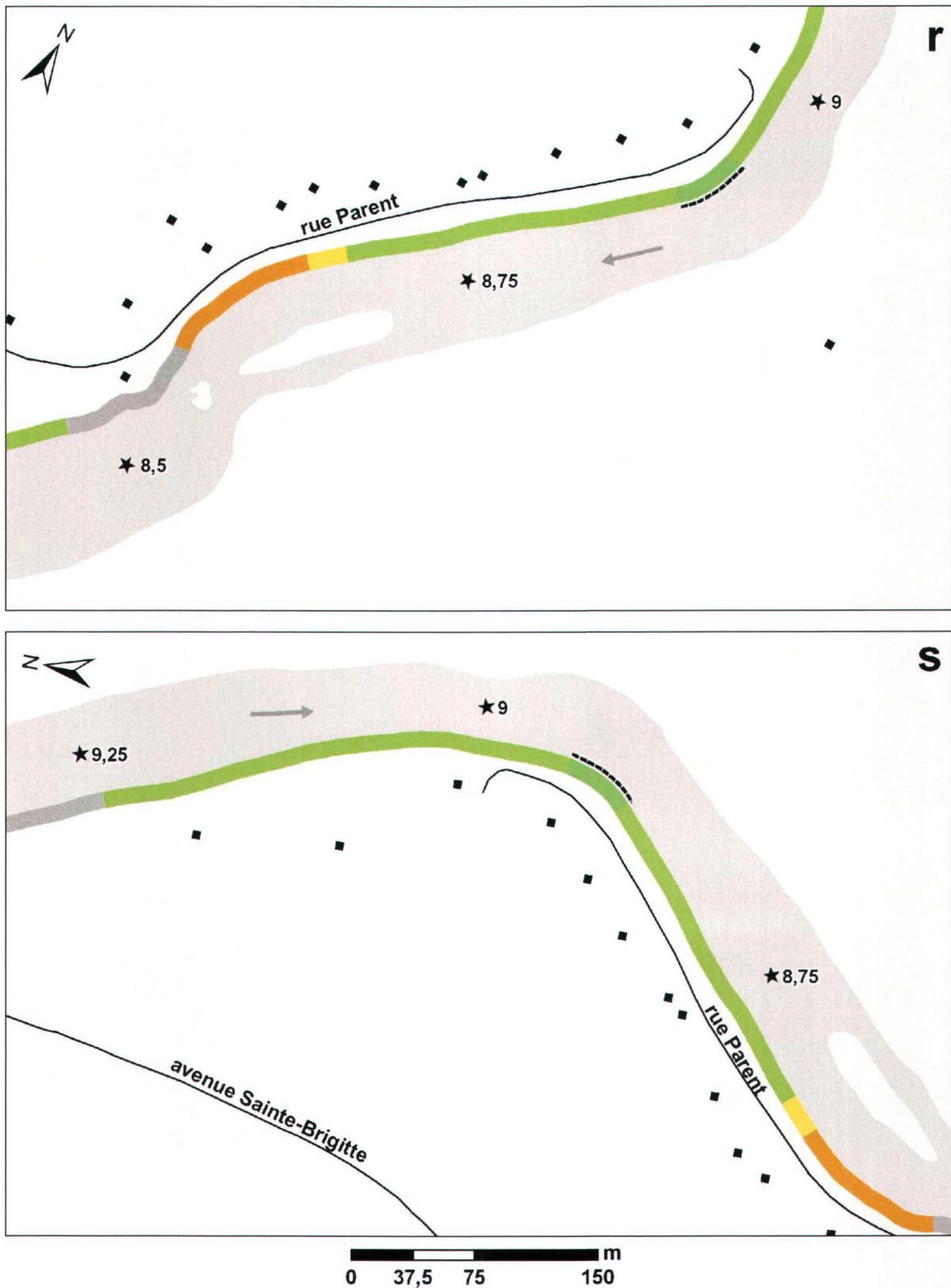


Figure 50 (suite), la légende est présentée à la figure a.

6.2.2. Analyse et interprétation des résultats cartographiques

L'analyse des cartes de sensibilité à l'érosion fut orientée en fonction de six principaux sites concentrant la plus grande sensibilité à l'érosion. Elle comprend aussi une rubrique regroupant le reste des tronçons du site d'étude. Rappelons que l'analyse et l'interprétation des cartes conduira, le cas échéant, à mettre en perspective la vulnérabilité s'y retrouvant.

6.2.2.1. Secteur de la rue des Trois-Saults

Ce secteur englobe la berge sud d'un tronçon de rivière situé entre les bornes 0 et 0,75 longé par la rue des Trois-Saults (Figure 50b). Dans ce secteur, 28% des berges comportent des ouvrages de protection (immunisations), lesquels sont apparus comme jouant un rôle très important au niveau de la stabilité des rives. En effet, les observations de terrain effectuées en 2009 dans ce secteur, ont révélé que 76% des berges non immunisées affichaient de l'érosion. Ces phénomènes prennent essentiellement la forme d'effondrements de berge provoquant, par leur répétition, la perte de terrain. (Figure 51).



Figure 51 : Érosion des berges et perte de terrain par effondrement de berge, secteur de la rue des Trois-Saults (bornes 0,5 et 0,75).

Toutefois, selon les résultats de sensibilité obtenus, ces berges ne devraient normalement pas présenter un tel niveau d'instabilité. À cet égard, l'histoire récente du secteur, reconstituée par Morse *et al.* (2002), a révélé que les berges de tronçon auraient été lourdement déstabilisées, suite à un important évènement d'embâcle survenu à l'hiver 1957. Lors de l'évènement, une importante accumulation de glace ancrée en amont du

rapide des Trois-Saults aurait généré une hausse du niveau de près de 5 m, voire plus. En réponse à une problématique d'inondation persistante, les autorités auraient alors ordonné le dynamitage de l'embâcle. Le largage soudain du volume d'eau accumulé aurait à ce moment provoqué l'effondrement des berges dont les dépôts étaient alors gorgés d'eau. Cet évènement aurait ainsi induit une instabilité morphologique encore persistante aujourd'hui en augmentant radicalement l'angle de la berge bien au-delà de l'angle de stabilité des sédiments sableux du secteur, et en faisant disparaître la végétation ligneuse protégeant la berge. L'évacuation des dépôts jonchant le pied de la berge aurait ensuite contribué à maintenir ces conditions instables jusqu'à aujourd'hui, au lieu de permettre la rectification de l'angle d'équilibre de la pente. Étant donné que les protections revêtent un caractère discontinu et hétérogène, on constate aussi des « effets de bout » entre certains segments immunisés.

L'instabilité de ce secteur découlerait donc davantage d'un évènement déclencheur passé que des conditions morpho-sédimentaires et hydrologiques actuelles, ce qui expliquerait l'incongruité de certaines valeurs de sensibilité par rapport à la présence importante d'érosion en 2009. Ceci permet aussi de faire la lumière sur la présence d'effectifs d'érosion relativement importants au sein des classes de sensibilité faible et modérée à l'étape de validation (Figure 47).

En somme, qu'elle soit associée à des évènements passés ou contemporains, la sensibilité du secteur s'illustre par de multiples zones en érosion, lesquelles pourraient devenir préoccupantes en raison du nombre d'habitations (17) situées immédiate en rive du cours d'eau.

6.2.2.2. Secteur des Îlets

Ce secteur circonscrit les berges ouest et est entre les bornes 0,75 et 3,25. On y retrouve notamment la sensibilité la plus forte de tout le site d'étude. Ces segments sensibles sont ponctués par endroit par d'importantes sections immunisées faisant décroître significativement les valeurs de sensibilité. L'analyse des résultats fut réalisée en inspectant chaque berge indépendamment de l'aval vers l'amont.

6.2.2.2.1. Berge ouest

La première section de berge qui attire l'attention sur la rive ouest se situe en aval de la borne 1. On y observe notamment des valeurs de sensibilité variant de modérée à très élevée (Figure 50b). En 2009, 95% de cette portion de berge affichait de l'érosion et, entre 1963 et 2003, celle-ci enregistra des reculs pouvant atteindre près de 17 m. Les conditions morpho-sédimentaires et hydrologiques du site sembleraient donc favoriser son érosion, mais il convient aussi de mentionner le potentiel « effet de bout » associé à la présence d'enrochements sur plus de 400 m immédiatement en amont, lesquels sont associés à l'implantation de la prise d'eau de Beauport (périmètre extérieur des bassins de captage). La présence de sections rigides au sein d'un chenal conduirait notamment à faire augmenter localement les vitesses d'écoulement (Wohl, 2000), et par ricochet, à accroître le potentiel d'érosion des segments situés en face (rive est) et aval de celles-ci. Ainsi, bien que la présence de la prise d'eau ne soit pas, en apparence, le déclencheur de l'érosion, elle semble néanmoins contribuer à l'aggraver. Ce secteur pourrait donc encore être sujet à des reculs importants lors d'événements très énergétiques. Mentionnons aussi que les changements au niveau de l'hydrodynamique du secteur, suite à l'implantation de la prise d'eau, notamment en lien avec la fermeture d'un chenal secondaire en rive sud, seraient susceptibles d'avoir aggravé les conditions d'instabilité du secteur de la rue des Trois-Saults situé en aval (Leclerc *et al.*, 1998). En effet, la fermeture d'une anabranchie pour l'implantation de bassins pourrait être responsable d'une accélération des vitesses d'écoulement au niveau du chenal principal et de la propagation de celles-ci vers l'aval.

Le second segment de ce même secteur est compris entre les bornes 1,75 et 2,5 (Figure 50d et e). Cette section affiche une sensibilité très marquée, dont 36%, 25% et 36% correspondent respectivement aux classes modérée, élevée et très élevée. Cette portion de berge s'avère d'autant plus sensible qu'elle se situe au pied d'un talus sableux d'une hauteur variant de 30 à 40 m, dont l'inclinaison de la pente est en bonne partie supérieure à l'angle de stabilité de ce type de dépôts, soit 37° (section 5.2.1.1) (Figure 52). L'occurrence d'érosion pourrait donc conduire au déclenchement de phénomènes de glissement de terrain, comme ce fut le cas par le passé dans ce secteur. En effet, l'examen des photographies aériennes¹¹ de même que de photographies historiques du secteur

¹¹Couplet stéréoscopique Q79134 173-174 (Géomathèque, Groupe Alta).

(Communication personnelle : Michel Leclerc, 2010) ont permis de mettre en lumière deux événements glissements de terrain dans les années 40 et 70. Ces deux phénomènes se localisent tous les deux au même endroit, notamment où la sensibilité obtenue est très élevée (étoile rouge Figure 50d). Par conséquent, les valeurs de sensibilité élevées combinées aux phénomènes de décrochement passés indiquent clairement que ce secteur peut être sujet à des instabilités majeures.

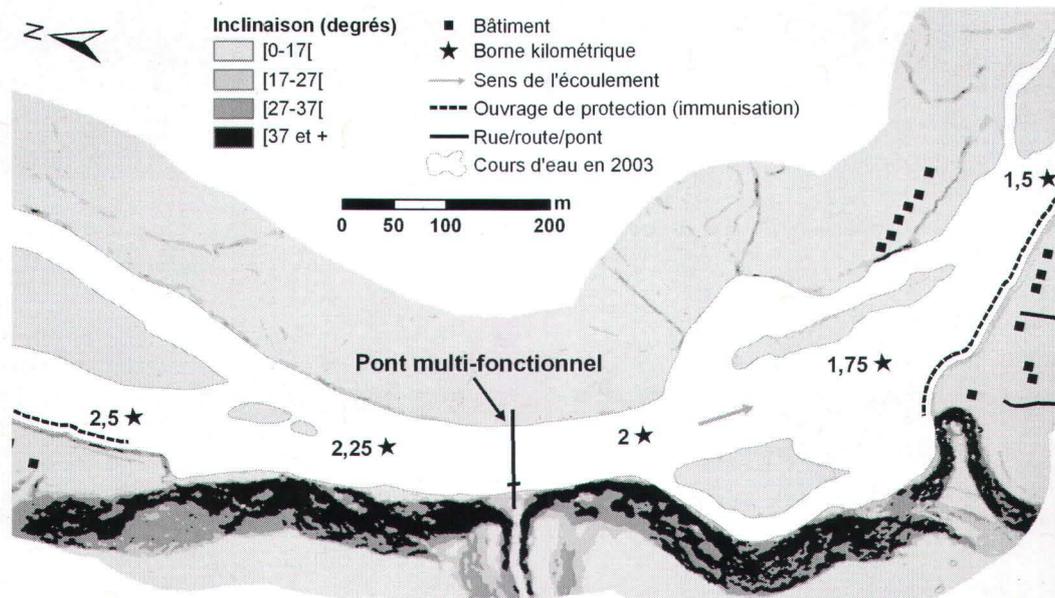


Figure 52 : Inclinaison des pentes du talus ouest dans le secteur des Îlets, rivière Montmorency. Sources : données LiDAR 2000 (INRS-ETE).

La dernière portion de ce secteur (bornes 2,5 à 3,25) illustre une sensibilité variable en raison de la présence d'immunisations (Figure 50 e, f et g). Néanmoins, en excluant les sections immunisées, les valeurs de sensibilité varient de modérée à très forte en conformité avec la sensibilité de tout le secteur des Îlets.

6.2.2.2.2. Berge est

La berge est du secteur des Îlets totalise un tronçon de 1434 m de longueur, dont près de la moitié (45%) connaissait de l'érosion active en 2009. Le niveau de sensibilité obtenu pour celle-ci correspond dans 83% des cas à des valeurs variant de modérée à très élevée (Figure 50 b à e). Parmi celles-ci, deux sections continues concentrent la totalité des valeurs de sensibilité très élevées (Figure 50 c et d). Ces deux segments correspondent notamment aux deux zones ayant connu le plus fort recul (sites 2 et 6, Figure 19) avec des valeurs pouvant atteindre 60,6 m (Tableau 7). Sur le terrain, on y retrouve des

phénomènes d'érosion particulièrement marqués générant l'effondrement des berges et le basculement d'arbres dans le cours d'eau (Figure 53). L'intégrité des six habitations situées en périphérie de la seconde zone très sensible (Figure 50d) pourrait donc se voir compromise d'ici 10 ans, selon les taux recul enregistrés dans ce secteur (section 4.1.4).



Figure 53 : Effondrement de la berge et basculement de la végétation arborescente due à l'érosion, secteur des Îlets, berge est (bornes 1,75 et 2).

6.2.2.3. Secteur de l'Île-Enchanteresse

Le secteur de l'Île-Enchanteresse se situe globalement entre les bornes 5,75 et 6,75 (Figure 50 l à n). Dans cette zone, 30% des berges présentent une sensibilité modérée. Celle-ci se concentre essentiellement aux extrémités de l'île de même que sur la berge ouest du chenal ouest en périphérie des portions amont et aval de l'île (Figure 50 l à n). En 2009, 25% du secteur affichait de l'érosion. Parmi ces sections érodées, 55% renvoient à une sensibilité modérée alors que les 45% restant indiquent des valeurs de sensibilité faibles. Ces dernières seraient possiblement associées à d'autres facteurs tels que les embâcles, non pris en compte dans le cadre de cette recherche, mais très récurrents dans ce secteur (Leclerc *et al.*, 2001; Morse *et al.*, 2002). Ainsi, malgré la présence de sensibilité modérée au compte de 30%, ce secteur apparaît comme étant relativement stable. La stabilité du site s'illustre notamment par le fait qu'aucun recul important n'y fut enregistré, à l'exception d'un court segment de 60 m situé sur la berge ouest du chenal ouest (site 16, Figure 22). Néanmoins, lors d'évènements de crues de grande magnitude, les zones identifiées comme plus sensibles pourraient s'avérer être des

sites préférentiels pour l'érosion des berges. À noter que ce secteur concentre plus d'une centaine d'habitations et que, par conséquent, les pertes matérielles pourraient y être importantes.

6.2.2.4. Secteur de la rue Drouin

Ce secteur couvre un tronçon compris entre les bornes 7,5 et 8 (Figure 50p). On y dénombre trois principales sections indiquant une sensibilité modérée et concentrant 75% de l'érosion cartographiée en 2009 dans cette zone. Parmi celles-ci, la section située la plus en amont (étoile rouge, Figure 50p) présente quelques particularités quant aux facteurs pouvant aggraver sa sensibilité. En effet, la morphologie du talus de plus de 7 m de hauteur bordant la rivière à cet endroit suggère l'occurrence passée d'un glissement de terrain. L'actuel talus se caractérise notamment par un escarpement franc en haut de talus et une topographie plutôt chaotique en son centre et à sa base. De plus, dans sa globalité, l'escarpement adopte une forme s'apparentant grandement à une demi-lune. La présence d'une couche silteuse imperméable au sein de celui-ci (section 4.3.3.4.2) pourrait être un facteur ayant prédisposé à la rupture de la partie supérieure du talus. Les dépôts mobilisés vers le bas auraient alors pu être érodés par la rivière générant ainsi le recul enregistré (site 19, Figure 23 et Tableau 7). Ceci implique toutefois que cet événement soit antérieur aux images de 1965 ayant servi à positionner la base de la berge dans cette zone. L'absence de végétation au sein du talus sur ces images semble confirmer cette hypothèse, mais l'échelle de celles-ci ne permet pas de distinguer clairement la topographie du talus en question. Ceci dit, la cicatrice laissée par ce qui semble être vraisemblablement un glissement de terrain, se situe actuellement à moins de 5 m d'une habitation située en haut de talus (Figure 54).

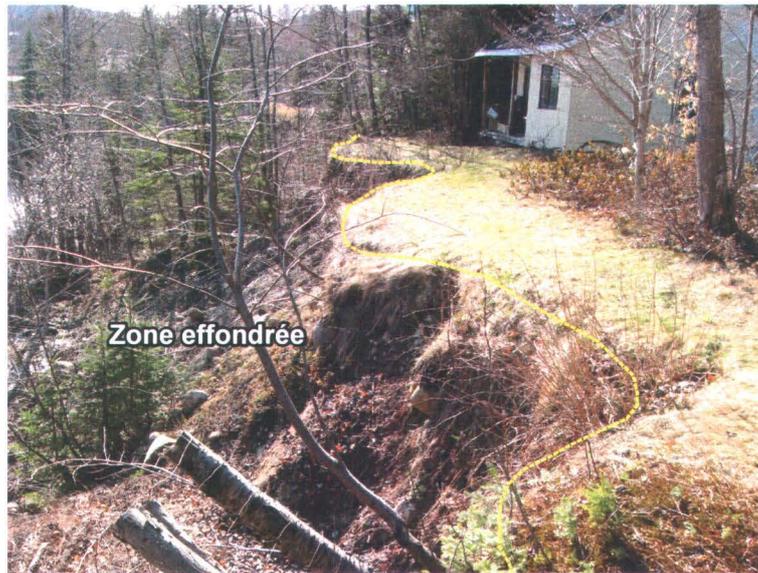


Figure 54 : Proximité d'une habitation par rapport au haut d'un talus ayant connu un glissement de terrain, secteur de la rue Drouin (bornes 7,5 à 8).

Par ailleurs, le même patron sédimentaire s'observe vis-à-vis d'un groupe de cinq habitations positionnées en haut de talus à quelques 100 m en amont (ovale rouge, Figure 50 p et q). Le talus, en ce lieu, présente une pente nettement plus forte que celle de la zone effondrée, de sorte que ces habitations pourraient possiblement voir disparaître une portion de leur terrain en cas de glissement de terrain.

Au sommaire, le secteur de la rue Drouin, de par sa morphologie actuelle et ses traces de glissements de terrain, suggère un certain niveau d'instabilité. L'érosion des berges en ce lieu pourrait ainsi conduire potentiellement au déclenchement de nouveaux phénomènes de glissement de terrain qui pourraient alors mettre en péril cette zone habitée. En outre, comme la portion aval située entre les bornes 7,5 et 7,75 comporte aussi plusieurs habitations (Figure 50p), les valeurs de sensibilité qui y furent obtenues mériteraient également d'être considérées.

6.2.2.5. Secteur de la rue Parent

Ce secteur consiste en un court segment situé entre les bornes 8,5 et 8,75. Il s'agit du seul site en amont du secteur des îlets à avoir enregistré une sensibilité à l'érosion forte (Figure 50r). Entre 1965 et 2007, cette zone a notamment connu un recul pouvant atteindre 5 m (site 21, Figure 24 et Tableau 7). Aujourd'hui, on y observe toujours des signes d'érosion qui se manifestent par une morphologie concave et une inclinaison

prononcée ($>45^\circ$) (Figure 55). À noter que les processus subaériens (pluie, ruissellement, vents, etc.) semblent aussi contribuer à maintenir l'instabilité de la berge, notamment dans sa partie supérieure constituée de sable. Le pied de berge affiche quant à lui des dépôts essentiellement constitués de galets et blocs (section 4.3.3.4.2 et Figure 55), pouvant en apparence offrir une certaine protection lors de crues de faible à moyenne amplitude. Toutefois, tel qu'observé sur le terrain au printemps 2008, lors de crues égales ou supérieures au débit plein bord ($439 \text{ m}^3/\text{s}$, section 1.3.4), l'écoulement peut atteindre une hauteur suffisante pour surpasser cette limite sédimentaire.

Ainsi, en situation de crue majeure structurante, générant une surcote supérieure à environ 2 m, les berges du site pourraient être sujettes à des phénomènes d'érosion importants. L'ampleur de ceux-ci serait d'autant plus importante que les dépôts du pied pourraient potentiellement se voir érodés eux aussi. Dans de telles circonstances, l'inclinaison forte de la berge de même que sa hauteur de plus de 5 m pourraient favoriser des phénomènes d'effondrement. Un recul de la berge pourrait alors conduire à la perte de segments de la rue Parent située par endroit à moins de 2 m du haut de la berge et ainsi compromettre l'accès à une dizaine d'habitations desservies par celle-ci.

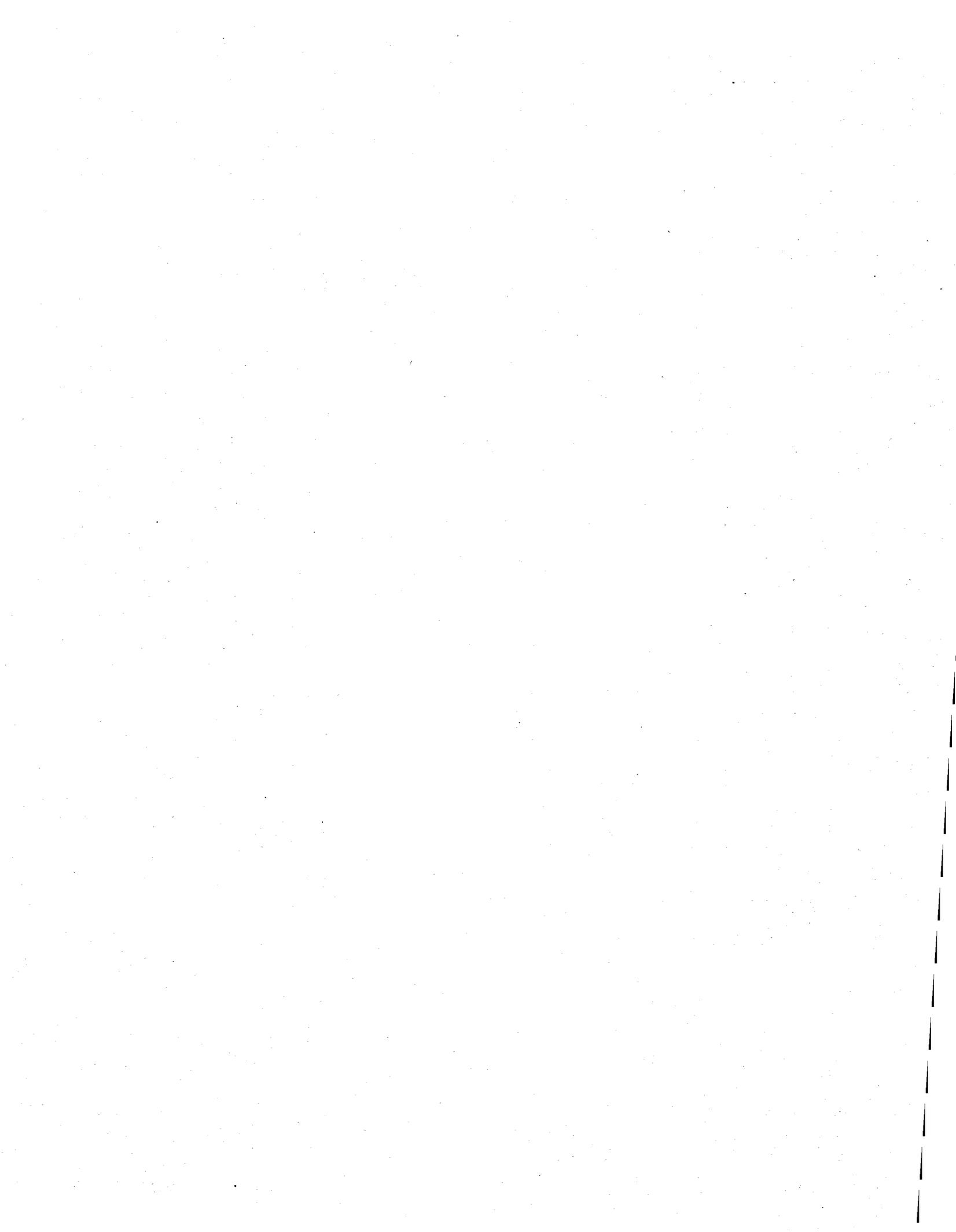


Figure 55 : Morphologie de la berge longeant la rue Parent (borne 8,5 à 8,75). La ligne pointillée jaune indique le profil concave de la berge.

Autres segments de berge

Le reste des berges du site d'étude affiche une sensibilité à l'érosion variant essentiellement de nulle à faible de même que quelques courts segments à sensibilité modérée. Les tronçons regroupant les valeurs les plus faibles forment globalement de longues sections faiblement convexes ou rectilignes, (bornes 3,25 à 4,25, Figure 50h; bornes 5,25 à 5,75, Figure 50 k et l; bornes 6,75 à 7,5, Figure 50 n et o; bornes 8 à 8,5, Figure 50q; bornes 8,75, et plus Figure 50s), ou sont alors constitués de roche en place (Figure 50 j à r). Les zones très faiblement sensibles recourent pour la plupart des sections immunisées à l'exception du tronçon en périphérie de la borne 5,5 (Figure 50 k et l).

Les sections à sensibilité modérée se concentrent, quant à elles, dans les secteurs de la rue Côte-du-Lac (borne 4,5, Figure 50i) et de la rue des Deux-Rapides (bornes 5 à 5,25, Figure 50k). Dans ce dernier secteur, à la hauteur de la borne 5,25, mentionnons que la rue donnant accès à cinq habitations en aval longe de très près un tronçon de sensibilité modérée, lequel affichait de l'érosion en 2009 (Figure 50k).



7. DISCUSSION

Cette partie consiste à effectuer un retour critique sur les méthodes et techniques développées en lien avec chaque objectif spécifique, et donc en réponse à l'objectif général qui consistait à élaborer un cadre d'analyse permettant d'établir la sensibilité des berges à l'érosion en rivière. Celle-ci inclut de plus un retour sur les résultats obtenus sur la rivière Montmorency.

7.1. Suivi de l'érosion des berges

La méthode composite multi-critères pour la cartographie des traits de berges élaborée dans le cadre de cette recherche s'avère facile et rapide à appliquer. Cette méthode permet notamment de représenter la portion active du chenal à l'aide de critères uniformes dans le temps tout en tenant compte des caractéristiques hydrologiques, géomorphologiques et végétales extraites des jeux d'images employés. Il a été démontré toutefois que la précision de la donnée produite dépend de quatre principaux facteurs qui sont: 1) la technique de cartographie employée, 2) la précision de géopositionnement des images, 3) la qualité des images sources, et 4) le stade de feuillaison de la végétation caducifoliée s'y retrouvant.

Technique de cartographie employée

La photogrammétrie numérique offre un géopositionnement optimal, une vision en 3D et un grand potentiel de grossissement. Cet outil s'avère en ce sens le plus apte à mener à bien une tâche exigeant un niveau de précision élevé. La cartographie en 2D à partir d'images aériennes géoréférencées ou d'orthophotos dans un SIG peut néanmoins donner des résultats exploitables, bien que ceux-ci soient moins précis.

Précision de géopositionnement des images

La rectification des images apporte des corrections au niveau de la déformation radiale (associé à la lentille), du mouvement de l'appareil et de la topographie du site (Lewin et Manton, 1975). Ce procédé permet ainsi d'accroître la précision globale des images employées tant en 2D qu'en 3D. La précision finale des images dépend toutefois de la qualité des points d'ancrage permettant le positionnement de celles-ci dans l'espace. Cet aspect s'avère une difficulté incontournable pour le géopositionnement (en 2D et 3D) d'images anciennes, où la recherche de points de repère précis peut s'avérer fastidieuse.

L'étape de quantification de la précision finale (erreurs résiduelles et planimétriques) s'avère ainsi absolument nécessaire afin de fixer les marges d'erreur applicables aux objets cartographiés.

Qualité des images sources

La qualité des images repose d'abord sur leur échelle. En effet, les diverses expérimentations effectuées dans cette recherche ont prouvé qu'une échelle égale ou supérieure à 1 :10000 est requise pour un niveau de précision accrue. Ces observations se sont avérées en accord avec celles de Gilvear et Bryant (2003). De plus, la netteté des images, c'est-à-dire, le niveau de contraste entre les teintes ou les couleurs, mérite aussi d'être considérée dans le choix des images de base, car des images surexposées réduisent grandement la discrimination des objets au sol. En ce sens, lorsque c'est possible, les images à émulsion couleur sont recommandées, car elles sont moins sujettes à ces limitations. En outre, la présence d'ombrage s'est aussi avérée un facteur limitant et nécessite d'être prise en compte dans le choix des couvertures d'images.

Stade de feuillaison de la végétation

Le stage de feuillaison de la végétation caducifoliée intervient de deux manières dans la méthode de cartographie développée ici. L'absence de feuilles permet de distinguer plus facilement la topographie du site en 3D (haut de berge ou pied de berge) et, à l'opposé, elle rend plus difficile l'établissement de la limite de la végétation permanente. Ainsi, dans un contexte où la présence de feuilles rend impossible l'application d'une limite basée sur la topographie de la berge, elle facilite néanmoins la détection de la limite de la végétation permanente.

En résumé, le meilleur scénario d'application de la méthode développée consisterait à détenir des stéréo-modèles 3D basés sur des images haute résolution (grande échelle), dont le géopositionnement est optimal, où la végétation ne porte pas de feuilles et où les débits entre les jeux d'images sont similaires, voire identiques. Évidemment, la réalité est souvent tout autre et c'est alors que le potentiel multi-critères de la méthode composite prend tout son sens. En définitive, il serait intéressant de tester l'applicabilité de cette méthode de cartographie à d'autres environnements fluviaux afin de s'assurer de son potentiel de généralisation.

7.2. Élaboration d'un MNT optimal

L'étude du comportement du signal LiDAR en milieu fluvial est un aspect qui s'est avéré peu documenté dans la littérature. En ce sens, la mise en évidence de phénomènes de pénétration/réflexion dans la colonne d'eau, l'identification d'occurrences de discontinuités spatiales dans les relevés et l'étude des conditions à la base de leur manifestation constituent une contribution à l'étude du signal LiDAR en milieu fluvial. Ces recherches, bien que sommaires, suggèrent que les phénomènes de pénétration/réflexion surviendraient principalement dans des conditions d'eau calme, alors que les discontinuités spatiales apparaîtraient à la fois dans ces mêmes zones et, dans une moindre mesure, dans les secteurs où l'écoulement y est très turbulent (présence d'eaux blanches).

Afin de prendre en compte ces phénomènes, une attention particulière fut accordée à l'interpolation des données situées dans le chenal. Le fait de circonscrire ces données pour générer un MNT indépendant permet de contrôler certaines aberrations au niveau du chenal, notamment en ciblant les méthodes d'interpolation offrant le meilleur rendu dans les zones présentant des discontinuités spatiales. La recherche de l'interpolateur optimal fut réalisée en utilisant trois types de validation : la validation croisée (statistique), l'analyse visuelle en plan de même que l'analyse visuelle en coupe. Cette dernière s'est avérée d'une grande efficacité dans les zones où la validation croisée ne pouvait déceler d'erreur en raison de l'absence de données de validation. Cette méthode pourrait à cet égard faire l'objet de développements futurs visant à l'automatiser et à lui donner un caractère plus quantitatif.

Au niveau des méthodes d'interpolation testées, le krigeage linéaire (LK) a offert le meilleur rendement, tant pour le MNT dédié exclusivement au chenal que pour le MNT couvrant l'intégralité du site, et est suivi de près par l'interpolateur basé sur l'inverse de la distance (IDW). L'exercice permit de corroborer les conclusions préalablement formulées par Anderson *et al.* (2005) et Lloyd et Atkinson (2002 et 2006), mentionnant notamment l'efficacité de ces deux méthodes dans ce contexte d'application et la légère supériorité du krigeage. Dans l'optique où l'interpolateur IDW pourrait être utilisé pour ce type d'application, il s'avèrerait toutefois nécessaire d'approfondir l'origine de certains phénomènes d'artéfacts mis en lumière dans le cadre de cette recherche. Dans le même

ordre d'idée, l'interpolateur spline, en combinaison avec l'incorporation d'une barrière d'interpolation, pourrait aussi faire l'objet d'une étude plus approfondie en y accordant toutefois les capacités informatiques et le temps de calcul nécessaires.

La grande qualité des résultats issus de la production de la pente du lit confirme que l'emploi d'un sous-modèle dédié au chenal permet de contrôler certaines anomalies en provenance des données LiDAR et donc de générer des MNT fiables à partir de celles-ci. Ainsi, de nombreux jeux de données LiDAR de première génération (sans intensité et sans dépistage bathymétrique) constituant des données terrain de qualité pourraient être mis à contribution dans des études similaires dans le futur. Lors de ces études, il serait pertinent d'investiguer davantage les phénomènes identifiés ici, notamment avec un plus grand nombre de sites de validation, afin de déterminer clairement l'origine et la magnitude de ceux-ci.

7.3. Production des variables

Cette partie vise à faire un bref retour sur les techniques employées pour la production des variables descriptives afin de mettre en lumière les avantages et/ou les limites de celles-ci et de proposer des améliorations potentielles, le cas échéant.

7.3.1. Pente de la berge

La qualité de cette donnée s'est avérée limitée par son mode de production de même que par le mode de transfert employé lors du stockage de celle-ci au sein des unités spatiales. La fenêtre de calcul 3 x 3 employée pourrait ainsi être étendue davantage (ex. : 5 x 5), en respect toutefois des dimensions des pentes mesurées à partir du MNT. Le cas échéant, cette opération devrait être effectuée dans un autre outil que celui employé ici (fonction *Slope* du module *Spatial Analyst* sous ArcInfo 9.2®), étant donné que la grille de calcul en question n'y est pas paramétrable. Ensuite, au niveau du transfert de l'information aux unités spatiales, une valeur illustrant la moyenne des pentes les plus fortes pourrait être calculée et stockée au sein des unités spatiales plutôt qu'une unique valeur maximale. Ce dernier aspect pourrait nécessiter l'établissement d'un programme en langage VBA ou alors l'emploi d'un logiciel dédié à l'analyse spatiale à partir de MNT. Ces deux modifications permettraient ainsi d'améliorer la représentativité de cette variable.

Bien qu'en apparence peu discriminante au niveau du modèle, comme le suggère la valeur de corrélation 0,034 au Tableau 21, cette variable demeure un indicateur de la stabilité géotechnique de la berge (angle d'équilibre des dépôts) et par conséquent de l'ampleur possible du recul du sommet de celle-ci. Ainsi, en considérant cette variable, le potentiel d'effondrement de la berge est indirectement pris en compte dans le modèle, ce qui assure une meilleure représentation de la complexité du phénomène de l'érosion des berges.

7.3.2. Pente du lit

Tel que mentionné précédemment, la technique de production à la base de la variable pente du lit s'est avérée efficace et précise. De plus, mentionnons que l'emploi de données LiDAR pour le calcul de celle-ci permet d'éviter l'envoi sur le terrain d'onéreuses équipes d'arpentage. Enfin, la méthode employée, bien que comportant plusieurs étapes, incluant la production du MNT, s'avère facilement exécutable.

7.3.3. Rayon de courbure de la berge

La technique de segmentation du trait de berge en fonction de la polarité (concave ou convexe) du tracé de celle-ci, s'avère très efficace. Toutefois, la prise en compte de l'augmentation des forces d'érosion vers la fin des sections concaves et en aval de celles-ci (Knighton, 1998; Lance et Consuegra, 1998) pourrait ultimement bénéficier d'une plus grande attention. Ainsi, deux suggestions pouvant éventuellement remplacer l'application d'un décalage des points d'inflexion (passage de concave à convexe et *vice-versa*) vers l'aval sont formulées ici. La première consisterait à implanter un facteur (poids) à chaque nœud d'un segment concave en fonction de leur position relative au sein du segment. Le facteur ferait alors croître progressivement la sensibilité à l'érosion au sein de chaque segment concave. Ceci pourrait permettre, du fait même, d'éviter d'attribuer une même valeur de rayon de courbure à plusieurs unités spatiales et ainsi augmenter potentiellement la signification de la relation entre cette variable et les taux de recul. La seconde, consisterait à implanter une variable complémentaire prenant en compte le fait qu'une section convexe située immédiatement en aval d'une section concave puisse être sujette à l'érosion en réponse à la propagation de cellules hélicoïdales vers l'aval. Ceci consisterait globalement à considérer un certain « effet de bout » en aval des sections

concaves. La sensibilité à l'érosion pourrait alors décroître en fonction de la distance en aval des sections concaves.

De plus, au niveau du degré de généralisation (lissage) de la ligne de berge avant segmentation, une méthode statistique pourrait être développée afin d'établir quantitativement le degré de lissage optimal.

En outre, rappelons que les calculs du rayon de courbure furent réalisés à partir de la ligne de berge récente. Ce choix de production visait à assurer une origine temporelle homogène entre les diverses variables. L'emploi du trait de berge ancien aurait ainsi créé un certain décalage avec les variables « pente du lit » et « pente de la berge » étant donné que ces paramètres morphologiques ne sont pas constants dans le temps.

Dans sa forme actuelle, la technique de production permet de bien représenter la sensibilité à l'érosion de la berge en fonction du degré de courbure de celle-ci. Néanmoins, dans une perspective de raffinement de la technique, les quelques améliorations proposées permettraient potentiellement d'accroître la précision de cette variable.

7.3.4. Géologie de la berge

Le plus souvent, les jeux de données disponibles pour produire cette variable sont fragmentaires ou alors à trop petite échelle pour offrir individuellement une précision suffisante à la production de cette donnée très importante. C'est pourquoi l'agencement de sources de données, telles que les cartes de dépôts meubles, les données de forage, la photointerprétation et les observations de terrain s'avère nécessaire pour l'établissement d'un variable de qualité. Ces diverses données offrent de plus, une alternative à la méthode traditionnelle par coupes stratigraphiques, qui, bien que très fiable, nécessite un temps considérable et ne peut être appliquée de façon systématique sur de grands sites d'étude. En ce qui à trait aux sections constituées de la roche en place, une campagne de terrain est immanquablement de mise pour leur reconnaissance, à moins d'avoir accès à des jeux de photographies aériennes couleur obliques à très grande échelle ou à des relevés de vidéogrammétrie oblique, des données qui demeurent assez rares et coûteuses.

7.3.5. Présence d'immunisation en berge

La présente recherche permet de démontrer que cette donnée ne pouvait être produite autrement que par une campagne de terrain, à moins de disposer de jeux d'images aéroportées d'une qualité exceptionnelle, tels que ceux mentionnés ci-avant.

En guise de recommandation, la cartographie des sections immunisées pourrait éventuellement être accompagnée d'une caractérisation de la résistance des ouvrages à l'érosion. Ceci nécessiterait certainement l'établissement de critères d'observation précis, élaborés préalablement par des experts, et permettrait d'appliquer ultimement une estimation plus juste de leur sensibilité à l'érosion, notamment lors de l'étape d'agrégation des variables. Une autre approche serait de s'abstenir d'évaluer cette sensibilité et de traiter ces segments dans une classe à part.

7.3.6. Variables complémentaires

Deux variables pourraient, *a posteriori*, potentiellement être intégrées au présent modèle. La première consiste en une catégorisation simplifiée de la variable « type de végétation ». En effet, à défaut d'avoir une information précise sur le type de végétation présent en berge, une classification simple de type présence/absence de végétation ligneuse pourrait ainsi permettre la prise en compte de cette variable qui, selon la littérature, jouerait un rôle important dans la stabilité des berges, notamment par l'action stabilisatrice de ses racines (Abernethy et Rutherford, 1998 et 2001; ASCE, 1998a; Cosandey et Robinson, 2000; Rosgen et Silvey, 1996; Simon et Collision, 2002). La seconde, la « hauteur de la berge », permettrait de prendre en compte plus directement le potentiel d'effondrement des berges, et donc d'élargir le spectre du modèle aux phénomènes déclenchés par l'érosion. Toutefois, l'intégration de cette variable nécessiterait l'établissement d'une méthode de production permettant de surmonter les difficultés d'identification du haut de la berge mentionnées à section 4.1.1.4.3.

7.3.7. Sommaire

En résumé, les techniques employées dans le cadre de ce travail permettent de produire des variables de qualité offrant une donnée d'entrée fiable au modèle. Certaines améliorations au niveau des variables « pente de la berge » et « rayon de courbure », ou l'incorporation de variables complémentaires, pourraient permettre d'accroître l'efficacité

du modèle à représenter plus fidèlement certaines subtilités relatives au phénomène de l'érosion des berges.

7.4. Modélisation de la sensibilité des berges à l'érosion

Cette section fut fragmentée en trois thèmes traitant 1) des avantages et des limites de l'approche de modélisation développée, 2) de la pertinence du modèle en regard de la littérature, et 3) du potentiel de généralisation de la méthode mise sur pied.

7.4.1. Avantages et limites de l'approche développée

L'approche de modélisation proposée s'avère simple et facile à implanter. Elle implique notamment des outils répandus tels que ArcGIS 9,2® (ou autre version) et Microsoft Excel 2003® (ou autre version) et peu de données venues directement du terrain, lesquelles ne nécessitent aucun outil technique coûteux pour leur acquisition. De plus, la méthode des rapports occurrence/disponibilité permet d'établir des indices de base de façon objective et efficace pour chaque variable sélectionnée. Ensuite, l'agrégation par la moyenne géométrique pondérée permet à la fois d'attribuer un poids à chaque indice de base et de tenir compte de la présence de valeurs nulles (0). Lors de cette étape, les poids propres à chaque indice de base sont, en l'occurrence, obtenus de façon objective à l'aide des coefficients de corrélation entre les variables et les taux de recul. La validation à l'aide de données d'érosion indépendantes, prélevées sur le terrain, permet, en somme, de vérifier efficacement la véracité des résultats de sensibilité des berges à l'érosion par rapport à la réalité terrain.

Il convient néanmoins de mentionner que la conception des indices de base s'est parfois avérée limitée par le nombre de critères (segments de droite) fixés à trois ou quatre. Ainsi, dans un exercice semblable, il pourrait être souhaitable d'augmenter leur nombre afin d'assouplir la forme des indices de base et ainsi reproduire potentiellement plus fidèlement l'allure de l'histogramme des rapports (occurrence/disponibilité).

Notons aussi certaines inadéquations entre les valeurs de sensibilité à l'érosion et les classes de hauteur d'érosion lors de l'étape de validation, dont notamment dans le secteur de la rue des Trois-Saults (section 6.2.2.1). Ces phénomènes mettent en perspective la complexité des processus impliqués dans l'occurrence de l'érosion des berges. En effet, malgré la prise en compte de plusieurs variables descriptives dans le modèle, certains

facteurs prédisposants, tels des effondrements passés, ne peuvent être détectés. Dans de telles circonstances, les observations de terrain servent alors à nuancer les résultats de modélisation obtenus afin que la sensibilité réelle du secteur soit plus correctement appréciée.

7.4.2. Position du modèle développé par rapport à la littérature

La structure et le mode d'élaboration du modèle proposé diffèrent grandement de ceux des modèles dédiés à l'étude de l'érosion des berges résumés à la section 2.4.2. Ainsi, le présent modèle se distingue par les points suivants :

- Les indices de base sont élaborés sur des bases statistiques en tenant compte de la disponibilité totale des conditions de terrain.
- Ces mêmes indices prennent la forme de fonctions continues plutôt que de classes discrètes.
- L'indice global implique un produit pondéré d'indice (moyenne géométrique) plutôt qu'une somme.
- Les poids attribués à chaque indice de base sont obtenus de façon statistique.
- L'efficacité du modèle est évaluée à l'aide d'une étape de validation.

Ainsi, la structure des indices de base, sous la forme de fonctions continues, et la prise en compte de la disponibilité totale des conditions de terrain, lors de l'élaboration de ceux-ci, indiquent, a posteriori, que la forme du modèle développé se rapproche davantage de la structure propre aux modèles d'habitats écologiques que de celle des modèles dédiés à l'étude de la susceptibilité aux glissements de terrain. Il s'agit en ce sens d'une version simplifiée des modèles d'habitats, appliquée à une problématique de nature hydro-géomorphologique. Le modèle s'avère simplifié par le fait qu'il n'incorpore pas d'étape de calibration proprement dite et que la validation ne conduit pas à un coefficient de corrélation (r^2), ce qui semble la norme dans la démarche de modélisation des habitats écologiques (Bovee, 1978; Boudreau *et al.*, 1988; Leclerc *et al.*, 1995; Morhardt, 1986; Wintle *et al.*, 2005).

Ces choix de modélisation furent motivés par des relations statistiques non concluantes entre les variables de base et les taux de recul (Tableau 21), associées à une quantité de données d'érosion insuffisante. Ces simplifications au niveau statistique permirent d'assurer une certaine robustesse au niveau méthodologique, par opposition à une structure uniquement statistique, qui aurait reposée sur des bases d'échantillonnage

précaires en lien avec le manque de données. Mentionnons toutefois que, si ces relations se sont avérées insuffisantes pour établir une approche statistique classique, elles permirent néanmoins d'établir un ordre de grandeur quant au rôle des diverses variables dans l'occurrence de l'érosion des berges et donc d'établir objectivement des poids pour chacune d'entre-elles.

En outre, l'approche simplifiée permet, *via* l'emploi d'un jeu de données de validation d'une autre nature que celui employé pour l'élaboration du modèle, d'éviter la fragmentation de ce dernier et d'assurer un échantillon suffisant d'effectifs d'érosion pour prendre en compte la diversité des conditions de terrain pour l'élaboration du modèle.

La cohérence des résultats par rapport aux données d'érosion de 2009 témoigne de la pertinence de ces choix de modélisation et offre en ce sens une alternative intéressante lorsque les approches strictement statistiques ne s'avèrent pas intégralement applicables au site modélisé. Néanmoins, il serait intéressant de déterminer pour quelles raisons en particulier les relations statistiques se sont avérées peu révélatrices du phénomène de l'érosion.

7.4.3. Potentiel de généralisation de l'approche développée

La forme finale du modèle, c'est-à-dire la configuration des indices de base de même que les poids attribués à ceux-ci lors de l'établissement de l'indice global, ne se veut pas transférable intégralement à d'autres rivières, sauf si les conditions géomorphologiques et hydrologiques s'avèrent similaires (ex : les rivières similaires du massif des Laurentides). En revanche, la démarche de modélisation développée se veut en elle-même applicable à d'autres sites d'étude. Toutefois, afin d'assurer la comparabilité des résultats de sensibilité à l'érosion provenant de divers sites d'étude, il conviendrait d'éviter la normalisation des valeurs entre 0 et 10, tel qu'effectuée dans le cas présent à la section 5.3.2. Dans une perspective à long terme, une fois la démarche de modélisation appliquée à plusieurs rivières, certaines relations empiriques pourraient potentiellement être dégagées et conduire alors à des indices de base et des poids respectifs transférables d'un bassin versant à l'autre.

7.5. Retour sur les résultats du tronçon à l'étude et implications en matière de sécurité et d'aménagement du territoire

Cette courte section vise à faire un retour sur les principaux secteurs de la rivière Montmorency présentant à la fois une sensibilité à l'érosion marquée et la présence de vulnérabilité (éléments matériels exposés à l'aléa, section 1.1).

Le secteur de la rue des Trois-Saults (bornes 0 à 0,75) affiche une dynamique d'érosion relativement active, laquelle apparaît comme le fruit de l'effondrement de cette berge suite à une intervention humaine apparemment induite en situation d'embâcle majeur en 1957. L'instabilité induite alors aurait été maintenue par l'action de la rivière et pourrait avoir été plus récemment aggravée par des changements au niveau du patron d'écoulement de la rivière en amont, en lien avec l'implantation de la prise d'eau au sein du chenal. Dans le même registre, le caractère discontinue des immunisations présentes dans ce même secteur serait aussi susceptible de créer des « effets de bout » générateurs d'érosion au droit des sections non immunisées.

La berge ouest du secteur des Îlets, particulièrement entre les bornes 1,75 et 2, présente une sensibilité très forte et a été sujette à des glissements de terrain par le passé. Dans l'éventualité où l'actuel site de la sablière (exploitée par CSL Loma) pourrait faire l'objet d'un développement domiciliaire ou autre, il serait fortement indiqué de prévoir une marge de recul préventive afin de prendre en compte l'instabilité des hauts talus sableux de ce secteur.

La quasi-totalité de la berge ouest du même secteur (bornes 1 à 2) correspond au site où l'on retrouve les valeurs de recul les plus marquées de la zone d'étude. Tel que mentionné à la section 6.2.2.2.2, le groupe de six bâtiments situés sur cette berge (borne 1,75) pourrait éventuellement se voir menacé directement par l'érosion et donner lieu à des procédures de relocalisation, considérant la dynamique très active de ce secteur.

La berge située en périphérie de la rue Drouin (périphérie de la borne 8) présente des signes très nets d'un ancien glissement de terrain (section 6.2.2.4). Ainsi, bien que ce secteur soit caractérisé par une sensibilité modérée, celui-ci apparaît sujet à des instabilités de nature gravitaire (glissements de terrain) en partie liées aux types de dépôts et la hauteur du talus. En cas de crue majeure, ces prédispositions morpho-sédimentaires pourraient, en combinaison avec l'érosion des berges, donner lieu à des phénomènes

d'effondrements. De tels phénomènes pourraient alors impliquer les six bâtiments implantés en haut de talus en périphérie de la borne 8. Une étude géotechnique pourrait permettre de vérifier cette hypothèse et ainsi conduire à la stabilisation du secteur, ou alors mener à la réduction de sa vulnérabilité (relocalisation des habitations), le cas échéant, en vue de réduire le risque.

Tel que mentionné à la section 6.2.2.5, la zone longeant la rue Parent (borne 8,5 à 8,75), présente une sensibilité à l'érosion marquée qui, en cas de crue majeure, pourrait donner lieu à la destruction d'une partie de cette rue. Des mesures de stabilisation pourraient, le cas échéant, limiter les dommages dans cette zone. À noter toutefois que le recours à des immunisations additionnelles devrait être effectué avec circonspection afin d'éviter le transfert du problème vers l'aval.

Dans une perspective de gestion du territoire, plus précisément d'évaluation du risque, il serait souhaitable d'intégrer directement les éléments de vulnérabilité au modèle pour ainsi obtenir des cartes couplant à la fois l'aléa et la vulnérabilité, soit des cartes de risque. Dans cette optique, certains éléments vulnérables de grande valeur, tel que la prise d'eau de Beauport, sujette à la submersion en cas de crue majeure (Leclerc *et al.*, 1998), pourraient se voir allouer des valeurs de risque élevées. En outre, il serait aussi intéressant de prendre en compte le potentiel d'effondrement des berges en parallèle avec l'érosion des berges puisque ces phénomènes vont souvent de pair et peuvent, par leur action combinée, occasionner des dommages supérieurs à ceux causés par l'érosion seule.

8. CONCLUSION

L'étape de pré-production permet d'apporter des solutions aux trois principales difficultés rencontrées dans l'étude de la sensibilité des berges à l'érosion, à savoir : 1) l'emploi de critères de cartographie fiables pour le suivi de l'érosion des berges à partir de photographies aériennes; 2) l'utilisation d'un interpolateur et d'un procédé d'interpolation permettant à la fois de tenir compte des particularités des données LiDAR en milieu fluvial et d'obtenir un MNT optimisant ces mêmes données; et 3) la production de variables décrivant fidèlement le phénomène de l'érosion des berges. La mise en application de ces solutions permet l'établissement de données de qualité servant d'information d'entrée à l'étape de modélisation.

Ensuite, l'approche de modélisation mise sur pied s'est avérée être un moyen rapide et objectif de quantifier la sensibilité des berges à l'érosion, en plus d'offrir une alternative intéressante aux études purement statistiques nécessitant des volumes de données importants, et rarement disponibles, pour garantir leur validité. L'efficacité de l'approche fut notamment illustrée par la cohérence des résultats lors de l'étape de validation.

En ce sens, la démarche méthodologique développée et appliquée dans cette recherche constitue un cadre d'analyse robuste permettant à la fois de produire des données de qualité à coût raisonnable et de modéliser efficacement la sensibilité des berges à l'érosion. De légères modifications, notamment l'augmentation du nombre de critères au sein des indices de base et l'incorporation de nouvelles variables, telles que la « présence de végétation » et la « hauteur de la berge », pourraient néanmoins conduire à son amélioration.

En outre, cet exercice permit de cartographier la sensibilité des berges d'un tronçon urbanisé de la rivière Montmorency. Ces résultats pourraient donc en eux-mêmes s'avérer utiles pour la gestion préventive du territoire dans ce secteur. De plus, l'interprétation de ces résultats permit de mettre en lumière que le phénomène de l'érosion résulte de divers processus et que certaines conditions aggravantes issues d'évènements passés (embâcles, glissements de terrain et autres) peuvent conduire à une sensibilité plus élevée que celle modélisée.

En somme, de par sa facilité d'implantation, ce cadre d'analyse pourrait se voir appliqué à d'autres cours d'eau du Québec, voire d'ailleurs. L'application extensive d'une telle approche pourrait ainsi permettre la formulation de contraintes naturelles à l'aménagement du territoire et/ou conduire à des études plus poussées dans les zones présentant à la fois une sensibilité élevée et la présence de vulnérabilité. Dans la perspective où les changements climatiques anticipés se traduiront par une intensification des phénomènes d'érosion le long des cours d'eau, les instances décisionnelles (municipalités, municipalités régionales de comté, organismes de bassins versants et ministères gouvernementaux et fédéraux) auraient avantage à se doter d'un tel cadre d'analyse afin de mettre en place rapidement des mesures préventives, dans les zones sensibles ciblées, et ainsi être mieux préparées à faire face à ce type de phénomène dans le futur.

9. BIBLIOGRAPHIE

- Abernethy, B. et Rutherford, I.D. (2001). The distribution and strength of riparian tree roots in relation to riverbank reinforcement. *Hydrological Processes*, 15: 63-69.
- Abernethy, B. et Rutherford, I.D. (1998). Where along a river's length will vegetation most effectively stabilise stream banks. *Geomorphology*, 23: 55-75.
- Agouris, P. Doucette, P. et Stefanidis, A. (2004). Automation and digital photogrammetric workstations. *In Manual of photogrammetry 5^e edition*. Ed. McGlone, J.C., American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, États-Unis, pp. 949-982.
- Aleotti, P. et Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58: 21-44.
- Ali, T.A. (2004). On the selection of an interpolation method for creating a terrain model (TM) from LiDAR data. *Proceeding of the American Congress on Surveying and Mapping (ACSM) Conference, Nashville, TN, USA*, 18 p.
- Almansa, A., Cao, F., Gousse, Y. et Rougé, B. (2002). Interpolation of digital elevation models using AMLE and related methods. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(2): 314-325.
- Anderson, E.S., Thompson, J.A. et Austin, R.E. (2005). LiDAR density and linear interpolator effects on elevation estimates. *International Journal of Remote Sensing*, 26 (18): 3889-3900.
- ASCE Task Committee. (1998a). River width adjustment - I: Processes and mechanisms. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 124(9): 881-902.
- ASCE Task Committee. (1998b). River width adjustment - II: Modelling. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 124(9): 903-917.
- Ashmore, P. et Church, M. (2001). The impact of climate change on rivers and river processes in Canada. *Bulletin of the Geological Survey of Canada no.555*, p. 1-48.
- Bagnold, R.A. (1960). Some aspects of river meanders. *United States Geological Survey, Professional Paper 282-E, Washington*, p. 135-144.
- Baltsavias, E.P. (1999). A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 54: 83-94.
- Beck, J.R. (2006). Streambank erosion hazard mapping: concepts, methodology and application on the Venoge river (Switzerland). *Thèse de doctorat, École Polytechnique fédérale de Lausanne*, 206 p.

- Beltaos, S. (2003). Threshold between mechanical and thermal breakup of river ice cover. *Cold regions Science and Technology*, 37: 1-13.
- Beltaos, S. (1997). Onset of river ice breakup. *Cold regions Science and Technology*, 25: 183-196.
- Beltaos, S., Burrell, B.C., Davar, K.S., Dublin, J., Ismail, S., Lane, R.J. et Prowse, T.D. (1989). New Brunswick river ice manual. Eds. Elhadi, N.E., Lockhart, J.G., The New-Brunswick subcommittee on river ice, Environment Canada New Brunswick, Inland waters Directorate Department of the Environment.
<http://www.gnb.ca/0009/0369/0004/index-e.asp#toc> (consulté le 17 février 2010).
- Bodansky, E., Gribov, A. et Pilouk, M. (2002). Smoothing and compression of lines obtained by raster-to-vector conversion", LNCS 2390, Springer, p. 256-265. *In* ArcInfo 9.2 Desktop Help.
- Boland, J. et 16 co-auteurs. (2004). Camera and sensing systems. *In* Manual of photogrammetry 5^e edition. Ed. McGlone, J.C., American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, États-Unis, pp. 629-636.
- Bolduc, A. M., Paradis, S.J., Parent, M., Michaud, Y. et Cloutier, M. (2003). Géologie des formations superficielles Québec. Commission géologique du Canada, Québec, dossier publique 3835, échelle 1:50000.
- Boucher, J.-P. et Picard, F. (1994). Cartographie des zones inondables – Rivière Montmorency, du rapide des Trois-Sauts jusqu'à l'île Enchanteresse. Ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction du milieu hydrique, Service de l'hydrologie et de la cartographie, Rapport no. DH-94-01, 25 p.
- Boudreau, A., Bellemare, J.F., Leclerc, M. et Shooner, G. (1988). Projet Sainte-Marguerite - Avant-projet phase I - : Étude des répercussions du détournement de la rivière Aux Pékans sur les saumons de la rivière Moisie. Rapport sectoriel II présenté à la direction Environnement d'Hydro-Québec 238 p.
- Bouillon, A. (2001). Les zones d'inondation à effet de glace de la rivière Montmorency : Essai d'une méthode basée sur l'arpentage et la dendrochronologie pour établir une zone à effet de glace à Beauport. Pour le compte de la Ville de Beauport. Communauté métropolitaine de Québec, 20 p.
- Bourque, A. et Simonet, G. (2007). Québec : Vivre les changements climatiques au Canada. Eds. Lemmen, D.S., Warren, F.J., Lacroix, J. et Bush, E., pp. 171-226, Gouvernement du Canada, Ottawa.
- Bovee, S.K. (1978). The incremental method of assessing habitat potential for coolwater species with management implications. American Fisheries Society, Special Publication, 11: 340-346.
- Bridge, J.S. (2003). Rivers and floodplains: forms, processes and sedimentary record. Blackwell Publishers, Malden, États-Unis, 491 p.

- Bridge, J.S. (1993). The interaction between channel geometry, water flow, sediment transport and deposition in Braided rivers. *In Braided rivers*. Eds. Best, J.L. et Bristow, C.S., pp.13-63, Geological Society of London Special Publication, no. 75.
- Brierly, G.J. et Flyirs, K.A. (2005). *Geomorphology and river management: applications of the river styles framework*. Blackwell, Oxford, Royaume-Uni, 398 p.
- Brinkman, R.F., et O'Neill, C. (2000). LiDAR and photogrammetric mapping. *The Military Engineer*, mai-juin : 56-57.
- Brooks, G.R., Lawrence, D.E., Fung, K., Bégin, C. et Perret, D. (1997). Flooding from the July 18-21, 1996 rainstorm in the Saguenay area, Québec: fluvial geomorphic effects and slope stability along selected major river reaches, Geological Survey of Canada, Open file 3498, 81 p.
- Bryan, K. (1928). Historical evidence on changes in the channel of the Rio Puerco, a tributary of the Rio Grande in New Mexico. *Journal of Geology*, 36: 265-282.
- Castonguay, S., Tremblay, A. et Lavoie, D. (2002). Carte de compilation géologique, Québec-Chaudière – Les ponts géologiques de l'est du Canada : Transect 2. Commission géologique du Canada, Québec, Dossier public 4314, échelle 1 :125000.
- CBRM, Conseil de Bassin de la Rivière Montmorency. (2007). Portrait du bassin versant, Plan directeur de l'eau du Conseil de bassin de la rivière Montmorency. *In* <http://pde.rivieremontmorency.com/101.htm> (pages consultés le 1^{er} février 2010).
- Chaplot, V., Darboux, F., Bourenane, H., Leguédois, S., Silvera, N., Phachomphon, K. (2007). Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density. *Geomorphology*, 77(1–2):126–141.
- Charlton, M.E., Large, A.R.G. et Fuller, I.C. (2003). Application of airborne LiDAR in river environments: the River Coquet, Northumberland, UK. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28: 299–306.
- Charlton, R. (2008). *Fundamentals of fluvial geomorphology*. Routledge Taylor and Francis Group, New-York, États-Unis, 234 p.
- Chorley, R.J. et Dale, P.F. (1984). Cartographic problems in stream delineation. *In River Networks*. Eds. Jarvis, R.S. et Woldenberg, M.J., Hutchinson Ross Publishing Company, Stroudsburg, États-Unis, pp. 331-344.
- Church, M. (1996). Channel morphology and typology. *In River flows and channel forms*. Eds. Petts G. et Calow, P., Blackwell Science, Cambridge, pp. 185-202.
- Church, M. (1988). Floods in Cold Climate. *In Flood Geomorphology*. Eds. Baker, V.R., Kochel, R.C. et Patton, P.C., pp.205-229, John Wiley and Sons. New York.

- Clouâtre, E., Dubois, J.-M. et Poulin, A. (1996). SIG et délimitation régionale des zones à risque de glissement de terrain: Hull-Gatineau. *Le Géographe canadien*, 40 (4): 367-386.
- Cojan, I. et Renard, M. (1999). *Sédimentologie*. Dunod, Paris, 418 p.
- Consuegra, D., Lance, J.-M. et Musy, A. (1999). Modélisation conceptuelle de la dynamique érosive des cours d'eau : application à la cartographie des dangers liés aux érosions de la Venoge. *Ingénieurs et Architectes Suisses*, 9 : 154-163.
- Cosandey, C. et Robinson, M. (2000). *Hydrologie continentale*. Armand Colin, Paris, 360p.
- Costa, J.E. et O'Connor, J.E. (1995). Geomorphically effective floods. *In* Natural and anthropogenic influences in fluvial geomorphology. Eds. Costa, J.E., Miller, A.J., Potter, K.W. et Wilcock, P.R., pp. 45-56, American Geophysical Union Geophysical Monograph 89, Washington DC.
- Cottin, A. (2008). Adaptation du SHOALS à la cartographie sédimentaire côtière peu profonde dans la Baie des Chaleurs, Québec, Canada. Thèse de doctorat en sciences de la terre Institut national de la recherche scientifique centre Eau Terre Environnement, Université du Québec, Québec, 259 p.
- Cressie, N.A.C. (1993). *Statistics for spatial data*. John Wiley and Sons, New-York, 900 p.
- Dai, F.C., Lee, C.F., Li, J. et Xu, Z.W. (2001). Assessment of landslide susceptibility on the natural terrain of Lantau Island Hong Kong. *Environmental Geology*, 40 (3): 381-391.
- Darby, S. E. (2005). Refined hydraulic geometry data for British gravel-bed rivers. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce*, 131(1): 60-64.
- Darby, S. E. et Thorne, C. R. (1996). Numerical simulation of widening and bed deformation of straight sand-bed rivers (I) model development. *Journal of Hydraulic Engineering-Asce* 122(4):184-193.
- Day, T.J. et Anderson, J.C. (1976). Observation on river ice, Thomsen River, Bank Island, District of Franklin, Canadian Geological Survey Paper 76-1B.
- Dhatt, G., Touzot, G. et Lefrancois, E. (2005). *Méthode des éléments finis*. Lavoisier, Paris, 601 p.
- Dionne, J.-C. (2001). Relative sea-level in St-Lawrence estuary from deglaciation to present day. *In* Deglacial History and Sea-Level Changes, Northern New England and Adjacent Canada. Eds. Weddle, T.K. et Retelle, M.J., Geological Society of America Special Paper 351, p. 271-284.

- Dionne, J.-C. (1977). La mer de Goldthwait au Québec. *Géographie physique et Quaternaire*, 31(1-2) : 61-80.
- Dixon, L.F.J., Barker, R., Bray, M., Farres, P., Hooke, J., Inkpen, R., Merel, A., Payne, D. et Shelford, A. (1998). Analytical photogrammetry for geomorphological research. *In* Landforms monitoring and analysis. Eds. Lane, S.N., Richards, K.S. et Chandler, J.H., John Wiley and Sons, New-York, États-Unis, pp. 63-94.
- Drouin, A. et Saint-Laurent, D. (2010). Comparaison de méthodes et paramètres d'interpolation dans la réalisation des modèles numériques d'élévation (MNE) de haute précision pour la représentation microtopographique des plaines inondables. *Journal des Sciences hydrologiques*, 55(4): 526-539.
- Dubois, J.-M.M., Bernatchez, P., Bouchard, J.-D., Daigneault, B., Cayer, D. et Dugas, S. (2005). Évaluation du risque d'érosion du littoral de la Côte-Nord du Saint-Laurent pour la période de 1996-2003. Conférence régionale des élus de la Côte-Nord, 291 p.
- El-Sheimy, N., Valeo, C. et Habib, A. (2005). Digital terrain modelling :Acquisition, manipulation and applications. Artech House remote sensing library, Norwood, MA, USA, 256 p.
- Environnement Canada. (2010a). Normales et moyennes climatiques au Canada 1971-2000 - Poste Aéroport International Jean-Lesage (Québec). *In* <http://climate.weatheroffice.gc.ca> (page consultée le 1er février 2010).
- Environnement Canada. (2010b). Normales et moyennes climatiques au Canada 1971-2000 - Poste Forêt Montmorency. *In* <http://climate.weatheroffice.gc.ca> (page consultée le 1er février 2010).
- Environnement Canada. (1994). Convention entre le gouvernement du Canada et le gouvernement du Québec relativement à la cartographie et à la protection des plaines d'inondation, et au développement durable des ressources en eau. 16 p. + annexes.
- FEMA. (1999). Riverine Erosion Hazard Areas: Mapping Feasibility Study. Federal Emergency Management Agency, États-Unis, 154 p.
- Fortin, P. (2002). Post-traitement, validation et intégration des données LiDAR dans le modèle numérique de terrain du fleuve Saint-Laurent. Service météorologique du Canada, Environnement Canada, Rapport technique RT-120, Sainte-Foy, 47 p.
- Fowler, A. (2000) The lowdown on LiDAR. *Earth Observation Magazine*, 7: 27-30
- Faessler, C. (1940). Étude physiographique sur la Côte de Beaupré. *Le Naturaliste Canadien*, 67 (4-5): 112-136.
- Faessler, C. et Laverdière, J.-W. (1936). Quelques observations sur la géologie de la Côte de Beaupré. *Le Naturaliste Canadien*, 63(2): 32-44.

- Franca, M.J.R.P. (2005). A field study of turbulent flows in shallow gravel-bed rivers. Thèse de doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 282 p.
- Gautier, E. Piégay, H. et Bertaina, P. (2000). A methodological approach of fluvial dynamics oriented towards hydrosystem management: case study of the Loire and Allier rivers. *Geodinamica Acta*: 1: 29-43.
- Gélinas, P. (1969). Topographie de la roche de fond de la région de Québec. Carte manuscrite non publiée, Service d'hydrogéologie du Ministère des richesses naturelles. *In*. A. Hudon (1970) Géomorphologie et formations quaternaires de la région de Montmorency, pp. 130, Mémoire de maîtrise, Département de géographie, Université Laval, 154 p.
- Gilvear, D. et Bryant, R. (2003). Analysis of aerial photography and other remotely sensed data. *In* Tools in fluvial geomorphology. Eds. Kondolf, G.K. et Piégay, H., John Wiley and Sons. New-York, États-Unis, pp. 135-170.
- Gilvear, D., Wintterbottom, S. et Sichingabula, H. (2000). Character of channel planform change and meander development: Luangwa river Zambia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25: 421-436.
- Goudie, A.S. (2003). *Encyclopedia of geomorphology – Volume 1*. Routledge Taylor and Francis Group, New-York, États-Unis, 1156 p.
- Goupil, J.Y. (2002). Protection des rives, du littoral et des plaines inondables: guide des bonnes pratiques. Service de l'aménagement et de la protection des rives et du littoral, Ministère de l'Environnement et de la Faune, Publication du Québec, Québec, 170 p.
- Gouvernement du Québec. (2005). Cartographie des zones exposées aux glissements de terrain dans les dépôts meubles, Saguenay-Lac-Saint-Jean: Guide d'utilisation des cartes de zones de contraintes et d'application du cadre normatif, Québec, 65 p.
- Graf, W.L. (1984). A probabilistic approach to the spatial assessment of river channel instability. *Water Resources Research*, 20 (7): 953-962.
- Guenther, G.C., Cunningham, A.G, LaRocque, P.E. et Reid, D.J. (2000). Meeting the accuracy challenge in airborne LiDAR bathymetry. *Proceedings of EARSEL of the LiDAR workshop LiDAR*, Dresden, Allemagne, 16-17 juin, p. 1-27
- Guillande, R., Gelugne, P., Berdintzeff, J.-M., Brousse, R., Chorowicz, J., Desfontaines, B. et Parrot, J.-F. (1993). Cartographie automatique de zones à aléas de mouvements de terrain sur l'île de Tahiti à partir de données digitales. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 164 (4): 577-583.
- Gurnell, A.M., Downward, S.D. et Jones, R. (1994). Channel planform change on the river Dee meanders, 1876-1992. *Regulated Rivers Research and Management*, 9: 187-204.

- Hamblin, W.K. et Christiansen, E. H. (2004). *Earth's dynamic systems - 10th edition*. Upper Saddle River, New-Jersey, Prentice Hall, 760 p.
- Hedman, E.R., Kastner, W.M. et Hejl, H.R. (1974). *Kansas streamflow characteristics, part 10 – Selected streamflow characteristics as related to active-channel geometry of streams in Kansas*. Kansas Water Resources Board Technical Report no. 10, 21 p.
- Heniche, M., Leclerc, M. Secrétan, Y. et Ouarda, T. (1999). *Travaux d'atténuation des risques de crue à l'eau libre de la rivière Montmorency dans le secteur des Îlets – Phase 2- : mise à jour de l'analyse hydrologique, dimensionnement des travaux d'atténuation et analyse de l'impact sur les risques résiduels de dommage aux résidences*. INRS-Eau, Rapport no. R555, 176 p.
- Hickin, E. J. et Nanson, G. C. (1975). *Character of channel migration on the Beatton River, Northwest British-Columbia, Canada*. Geological Society of America Bulletin. No 86 : 487-494.
- Hilldale, R.C. et Raff, D. (2008). *Assessing the ability of airborne LiDAR to map river bathymetry*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33: 773–783.
- Hirschboeck, K.K., Ely, L.L. et Maddox R.A. (2000). *Hydroclimatology of meteorologic floods*. *In Inland floods hazards: human, riparian and aquatic communities*. Ed. Wohl, E.E., pp. 39-72, Cambridge University Press, New York.
- Howard, A. D. et Knutson, T.R. (1984). *Sufficient Conditions for River Meandering: A Simulation Approach*. *Water Resources Research*, 20(11): 1659-1667.
- Hjulström, F. (1935). *Studies of the morphological activity of river as illustrated by the River Fryis*. *Bulletin of the Geological Institute of Uppsala*, 25: 221-527.
- Hudon, A. (1970). *Géomorphologie et formations quaternaires de la région de Montmorency*. Mémoire de maîtrise, Département de géographie, Université Laval, 154 p.
- Jasek, M. (2003). *Ice jam release surges, ice runs and breaking fronts: fiels measurements, physical descriptions and research needs*. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 30: 113-127.
- Jensen J. R. (2007). *Remote sensing of the environment – An Earth resource perspective, 2e édition*. Pearson Printice Hall, États-Unis, 592 p.
- Johnson, R.A. (1983). *Stream channel response to extreme rainfall events: The Hurricane Camille storm in central Nelson County*. Mémoire de maîtrise, Université de Virginie, États-Unis.
- Kemeny, J. et Turner, K. (2008). *Ground-based LiDAR: Rock Slope Mapping and Assessment*. Central Federal Lands Highway Division, Dakota, États-Unis, Publication No. FHWA-CFL/TD-08-00, 113 p.

- Kitanidis, P.K. (1997). *Introduction to Geostatistics : Applications in Hydrology*. Cambridge University Press, Cambridge, 249 p.
- Knighton, D. (1998). *Fluvial forms and processes a new perspective*. Arnold, London, 383 p.
- Knox, J.C. (2003). North American palaeofloods and future floods: responses to climatic change. *In Palaeohydrology : understanding global change*. Eds. Gregory, K.J. et Benito, G., pp. 143-164, Wiley, Chichester, UK.
- Kochel, R.C. (1988). Geomorphic impact of large floods: Review and new perspective on magnitude and frequency. *In Flood geomorphology*. Eds. Baker, V.R., Kochel, R.C. et Patton, P.C., pp.169-187, John Wiley and Sons, New York.
- Lallier, P.-E. (1998). *Les crues glacielles récentes de la rivière Montmorency près de Québec*. Mémoire de Baccalauréat, Université Laval, 65 p.
- Lamarche, L. (en prép.). *Paléo-environnements holocènes et dynamique estuarienne et fluviale du Saint-Laurent dans la région de Québec*, Thèse de doctorat en sciences de la terre, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement, Québec
- Lancaster, S. T. et Bras, R.L. (2002). A simple model of river meandering and its comparison to natural channels. *Hydrological Processes*, 16: 1-26.
- Lance, J.-M. et Consuegra, D. (1998). *Bassin versant de la Venoge Etude des dangers liés à l'érosion*. IATE/HYDRAM, École Polytechnique de Lausanne, Suisse, 41p + annexes.
- Lane, E. W. (1955). The design for stable channels. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 120: 1234-1260.
- Lawler, D. M. (1993). The measurement of river bank erosion and lateral channel change: a review. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18: 777-821.
- Lawler, D.M. (1992). Process dominance in bank erosion system. *In Lowland floodplain rivers : geomorphological perspectives*. Eds. Carling, P. et Petts, J.E., pp. 117-143, John Wiley and Sons, Chichester.
- Lawler, D.M., Thorne, C.R. Hooke, J.M. (1997). Bank erosion instability. *In Applied fluvial geomorphology for river engineering*. Eds. Thorne, C.R., Hey, R.D. et Newson, M.D., pp. 137-172, John Wiley and Sons, Chichester.
- Leclerc, M., Dupuis, P., Bouchard, J.-D., Morneau, F., Savard, J.-P. et Desjarlais, C. (2008). *Analyse coûts-avantages de solutions à la problématique d'érosion littorale à Pointe-aux-Outardes*. Pour le compte de la Municipalité de Pointe-aux-Outardes et le Ministère de la Sécurité publique en collaboration avec le Consortium OURANOS et divers partenaires. INRS-ETE et Aquap Praxis Inc. Rapport no. 10136-100, 200 p.

- Leclerc, M., Boudreau, P., Roy, N., Secrétan, Y., El Adlouni, S., Ouarda, T., Chaumont, D., Falardeau, I., et Morneau, F. (2006). Contribution à la recherche d'une solution intégrée au risque d'inondations à Châteauguay. Ville de Châteauguay, Ministère de la Sécurité publique et INRS-ETE, Rapport no. R841, 280 p.
- Leclerc, M., Morse, B., Francoeur, J., Heniche, M., Boudreau P. et Secretan, Y. (2001). Analyse de risques d'inondations par embâcles de la rivière Montmorency et identification de solutions techniques innovatrices – Rapport de la Phase I – Préfaisabilité. INRS-Eau et Université Laval, Rapport no. R577, 118 p.
- Leclerc, M., Doyon, B., Heniche, M., Secretan, Y., Lapointe, M., Driscoll, S., Marion, J. et Boudreau, P. (1998). Simulation hydrodynamique et analyse morphodynamique de la rivière Montmorency en crue dans le secteur des Îlets. INRS-Eau et Ville de Beauport, Rapport no. R522, 134 p.
- Leclerc, M., Boudreault, A., Bechara, J. et Corfa, G. (1995). Two-dimensional hydrodynamic modelling: a neglected tool in the instream flow incremental methodology. *American Fisheries Society*, 24 (5): 645-662.
- Ledoux, B. (2006). La gestion du risque inondation, Éditions Tec et Doc, Paris, 770 p.
- Le Guellec, A. (2007). Automated sensor block adjustment and local satellite positioning: Benefits, and perspectives for mapping applications. *Revue Française de Photogrammetrie et de Télédétection*, 185: 31-38.
- Leopold, L.B. Wolman, M.G. et Miller, J.P. (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*, W.H., Freeman Publisher, San-Francisco, États-Unis, 522 p.
- Leopold, L. B. and M. G. Wolman. (1957). River channel patterns: braided, meandering and straight. *United States Geological Survey, Professional Paper 282-B*, Washington, 51 p.
- Leopold, L.B. et Maddock, T.Jr. (1953). The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. *Geological Survey professional paper*, 252, 57 p.
- Lewin, J. et Manton, M.M.M. (1975). Welsh floodplain studies: the nature of floodplain geometry, *Journal of Hydrology*, 25: 37-50.
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., Chipman, J.W. (2004). *Remote sensing and images interpretation – Fifth edition*. John Wiley and Sons, New-York, 763 p.
- Liu, X., Zhang, Z., Peterson, J. et Chandra, S. (2007). LiDAR-derived high quality ground control information and DEM for image orthorectification. *Geoinformatica*, 11: 37–53.
- Lloyd, C.D., et Atkinson, P.M. (2006). Deriving ground surface digital elevation models from LiDAR data with geostatistics. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(5): 535–563.

- Lloyd, C.D. et Atkinson, P.M. (2002). Deriving DSMs from LiDAR data and kriging. (2002). *International Journal of Remote Sensing*, 23 (12): 2519-2425.
- Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire D.J. et Rhind D.W. (2005). *Geographic Information Systems and Science*. New York, John Wiley and Sons, 487 p.
- Maguire, D.J., Batty, M. et Goodchild, M.F. (2005). *GIS spatial analysis and modelling*. ESRI Press, Redlands California, 480 p.
- Mackay, J.R. et Mackay, D.K. (1977). The stability of ice-push features, Mackenzie River, Canada. *Canadian Journal of Earth Science*, 14: 2213-2225.
- Markham, A.J. et Thorne, C.R. (1992). Geomorphology of gravel-bed river bends. *In Dynamics of gravel-bed rivers*. Eds. Billi, P., Hey, R.D., Thorne, C.R. et Tacconi, P., pp. 433-456, John Wiley and Sons, New York.
- Mertes, L.A.K. (2000). Inundation hydrology. *In Inland floods hazards: human, riparian and aquatic communities*. Ed. Wohl, E.E., pp. 145-166, Cambridge University Press, New York.
- Messier, F. (2007). Détermination de la ligne des hautes eaux dans le cadre de l'application de la politique de protection des rives du littoral et des plaines inondables : le cas des petits cours d'eau non instrumentés. Mémoire de maîtrise, Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval, Québec, 221 p.
- Miall, A.D. (1977). A review of the braided-river depositional environment. *Earth Science Reviews*, 13:1-62.
- Michel, B. (1992). Limit equilibrium of ice jams. *Cold regions Science and Technology* 20: 107-117.
- Mikhail, E.M., Bethel, J.S. McGlone, J.C. (2001). *Introduction to modern photogrammetry*. John Wiley and Sons Inc., 479 p.
- Ministère des Richesses Naturelle du Québec. (1967). *Crués des 3 et 4 novembre 1966 – versant nord du Saint-Laurent*. Direction des Services Hydrologiques, Québec, 13 p.
- Morhardt, J.E. (1986). *Instream methodologies*. Report of EA Engineering Science and Technology Inc. to Electrical Power Institute. Palo Alto, California.
- Morse, B., Leclerc, M., Delcourt, H., Francoeur, J. et Boudreau, P. (2002). Développement de solutions techniques innovatrices pour le contrôle des embâcles de la rivière Montmorency – Rapport de la Phase II – Faisabilité. INRS-ETE et Université Laval, Rapport no. R577b, 178 p.
- Nanson, G.C. et Croke, J.C. (1992). A genetic classification of floodplains, *Geomorphology*, 4: 459-486.

- Notabaert, B. Overstate, G., Givers, G. ET Posen J. (2009) Qualitative and quantitative applications of LiDAR imagery in fluvial geomorphology *Earth Surface Processes. Landforms* 34, 217–231 (2009)
- Osterkamp W.R. et Hedman, E.R. (1982). Perennial-streamflow characteristics related to channel geometry and sediment in Missouri river basin. Geological Survey Professional Paper 1242, États-Unis, 37 p.
- Osterkamp, W.R. et Hedman, E.R. (1977). Variation of width and discharge for natural high-gradient stream channels: *Water Resources Research*, 13 (2): 256-258.
- Ouellet, V., Morin, J., Champoux, O. et Martin, S. (2003). Validation des données LiDAR du tronçon Montréal/Trois-Rivières, pour la modélisation de la végétation émergente. Rapport technique RT-130, Service météorologique du Canada, Environnement Canada, Québec, 25 p.
- OURANOS. (2004). S'adapter aux changements climatiques. Consortium OURANOS, Montréal, Canada, 91 p.
(http://www.ouranos.ca/fr/pdf/ouranos_sadapterauxcc_fr.pdf).
- Pe'eri, S. et Philpot, W. (2007). Increasing the existence of very shallow-water LiDAR measurements using the red-channel waveforms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45 (5):1217-1223.
- 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: 1085-1101.
- Provencher, L. et Dubois, J.-M.M. (2007). Précis de télédétection – volume 4 : méthodes de photointerprétation et d'intégration d'image. Presses de l'Université du Québec, Saint-Nicolas, Québec, 468 p.
- Prowse, T. D. et Gridley, N. C. (1993). Environmental aspects of river ice. National Hydrology Research Institute, Saskatoon, 155 p.
- Rakotondranaly, N. (2001). Développement et validation d'une méthodologie pour l'identification et l'évaluation des dangers liés à l'érosion des berges des cours d'eau. HYDRAM, École Polytechnique de Lausanne, Suisse, 53 p. + annexes.
- Richardson, W. R. (2002). Simplified Model for Assessing Meander Bend Migration Rates. *Journal of Hydraulic Engineering* 128 (12): 1094-1097.
- Riley, S.J. (1972). A comparison of morphometric measures of Bankfull. *Journal of Hydrology*, 17: 21-31.
- Riopel, S., Couture, R. et Tewari, K. (2007). Méthode paramétrique de cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain en milieu pergélisolé : le site pilote Travaillant-Thunder dans la vallée du fleuve Mackenzie, TNO, Canada. Rapport # ?, Commission géologique du Canada, 12 p.

- Ritter, D.F., Kochel, R.C. et Miller, J.R. (2002). Fluvial processes. *In Process geomorphology* – 4^e édition. Eds. Ritter, D.F., Kochel, R.C. et Miller, J.R., pp. 189-231, McGraw-Hill, Boston.
- Robitaille, A. (1983). Les crues glacielles de la rivière Montmorency. Mémoire de Baccalauréat, Université Laval, 65 p.
- Rosgen, D. et Silvey, H. L. (1996). Applied river morphology. Wildland Hydrology Pagosa Springs, Colarado, États-Unis, 390 p.
- Sabourin, R.J.E. (1962). Notes sur la géomorphologie d'une partie de la Côte de Beaupré. Cahiers de géographie du Québec, 7(13) : 27-36.
- Saha, A.K., Gupta, R.P. et Arora, M.K. (2002). GIS-based landslide hazard zonation in the Bhagirathi (Ganga) valley, Himalayas. *International Journal of Remote Sensing*, 23: 357–369.
- Saint-Laurent, D. et Schneider, M. (2004). Application d'un système d'information géographique à l'analyse cartographique des berges sensibles à l'érosion (rivière du Lièvre, Québec, Canada). *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 44 : 71-86.
- Satale, D.M. et Kulkarni M.N. (2003). LiDAR in mapping. *Proceedings of the Map India Conference*, Noida, India, 5 p.
- Schenk, T. (1999). Photogrammetry and laser altimetry. *Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Workshop*, Vol 32 (3/W14), La Jolla, USA, 10 p.
- Scheidegger, A.E. (1966). Effect of map scale on stream orders. *Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology*, 11 (3): 56-61.
- Shi, W.Z. et Tian, Y. (2006). A hybrid interpolation method for the refinement of a regular grid digital elevation model. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(1):53–67.
- Schumm, S.A. (1981). Evolution and response of the fluvial system – sedimentologic implications. *In Recent and ancient nonmarine depositional environments: Models for exploration*. Eds. Ethirdge, F. et Flores, R., pp.19-39, Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special publication, 31 p.
- Schumm, S.A. (1977). *The fluvial system*. Wiley, New-York, 338 p.
- Simon, A. et Collison, A.C.J. (2002). Quantifying the mechanical and hydrologic effects of riparian vegetation on streambank stability. *Earth Surface Processes and Landforms* 27: 527-546
- Simon, A. (1989). A model of channel response in disturbed alluvial channels. *Earth Surface Processes and Landforms*, 14: 11-26.

- Simon, A. et. Downs, P.W. (1995). An Interdisciplinary Approach to Evaluation of Potential Instability in Alluvial Channels. *Geomorphology* 12(3): 215-232.
- Smith, D. G. et Pearce C. M. (2002). Ice jams-caused fluvial gullies and scour holes on northern river flood plains. *Geomorphology*, 42: 85-95.
- Smith, S.A. et Smith, N.D. (1980). Sedimentation in anastomosed river systems: examples from alluvial valleys near Banff, Alberta. *Journal of Sedimentary Petrology*, 50:157-164.
- Tao, Z., McCormick, M.P. et Wu, D. (2008). A comparison method for spaceborne and ground-based LiDAR and its application to the CALIPSO LiDAR. *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 91 (3-4): 639-644.
- Thoma, D.P., Gupta, S.C., Bauer, M.E. et Krichoff, C.E. (2005). Airborne laser scanning for riverbank erosion assessment. *Remote Sensing of Environment*, 95: 493-501.
- Thomas, D.S.G. et Goudie, A. (2000). *The dictionary of physical geography*. Blackwell Publishers, Malden, États-Unis, 610 p.
- Thompson, A. (1986). Secondary flows and the pool-riffle unit: a case study of the processes of processes meander development. *Earth Surface Processes and Landforms*, 11: 631-641.
- Thorne, C.R. (1997). Channel types and morphological classification. *In Applied fluvial geomorphology for river engineering*. Eds. Thorne, C.R., Hey, R.D. et Newson, M.D., pp. 175-222, John Wiley and Sons, Chichester.
- USACE. (2002). Engineering and design photogrammetric mapping. EM 1110-1-1000, Department of the army, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, 371 p. (<http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/em1110-1-1000/toc.htm>)
- VSS. (1999). Schweizer Norm SN 670 010b Bodenkennziffern. Report nr., Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS), Zürich, Switzerland.
- Wharton, G. (1992). Flood estimation from channel size: guidelines for using the channel-geometry method. *Applied Geography*, 12: 339-359.
- William, G.P. (1978). Bankfull discharge of rivers. *Water Resources Research*, 14:1141-1154.
- Wilson, J.P. Gallant, J.C. (2000). *Terrain Analysis: Principles and applications*. Wiley, New-York, 479 p.
- Winker, D. et Hunt, B. (2007) First Results from CALIOP. Proceeding of the the 87th AMS Annual Meeting, spaceborne LiDAR session, San Antonio, USA, 4 p.
- Winterbottom, S. et Gilvear, D. (2000). A GIS-based approach to mapping probabilities of river bank erosion: regulated river Tummel Scotland. *Regulated Rivers Research and Management*, 16: 127-140.

- Wintle, B.A., Elith, J. et Potts, J.M. (2005). Fauna habitat modelling and mapping: A review and case study in the Lower Hunter Central Coast region of NSW. *Austral Ecology*, 30: 719–738.
- Wohl, E.E. (2000). Geomorphic effects of floods. *In* *Inland floods hazards: human, riparian and aquatic communities*. Ed. Wohl, E.E., pp. 167-193., Cambridge University Press, New York.
- Wolman, M.G. et Gerson, R. (1978). Relative scales of time and effectiveness of climate in watershed geomorphology. *Earth surface processes*, 3 : 189-203.
- Wolman, M.G. et Miller, J.P. (1960). Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. *Journal of Geology*, 68: 54-74.
- Wood, J.D. et Fisher P.F. (1993). Assessing interpolation accuracy in elevation models. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 13: 48-56.
- Xhardé, R. (2007). Applications des techniques aéroportées vidéographiques et LiDAR à l'étude des risques naturels en milieu côtier. Thèse de doctorat en sciences de la terre, Institut national de la recherche scientifique, centre Eau Terre Environnement, Université du Québec, Québec, 252 p.

ANNEXES

Annexe 1 : Inventaire des couvertures de photographies aériennes et d'orthophotos disponibles pour le site d'étude

Année	Échelle/résolution	Type	Émulsion	Couverture*	Fournisseur
2007	NA 10 cm	Orthophotos	Couleur	Complète	Ville de Québec et Groupe Alta
2006	1:20000 10 cm	Orthophotos	Couleur	Complète	Communauté métropolitaine de Québec et Groupe Alta
2005	1:8000 20 cm	Orthophotos	Couleur	Incomplète	Ville de Québec et Groupe Alta
2003	1:8000 20 cm	Orthophotos	Couleur	Incomplète	Ville de Québec et Groupe Alta
2002	1:15000	Photographies	Panchromatique	Complète	Groupe Alta (anciennement Photocartotheque québécoise)
1998	1:15000	Photographies	Panchromatique	Incomplète	Groupe Alta (anciennement Photocartotheque québécoise)
1995	1:5000	Photographies	Panchromatique	Incomplète	Communauté métropolitaine de Québec et Groupe Alta
1993	1:15000	Photographies	Panchromatique	Complète	Groupe Alta (anciennement Photocartotheque québécoise)
1992	1:50000	Photographies	Panchromatique	Incomplète	Communauté métropolitaine de Québec
1990	1:5000	Photographies	Panchromatique	Incomplète	Groupe Alta (anciennement Photocartotheque québécoise)
1989	1:5000	Photographies	Panchromatique	Incomplète	Ville de Québec et Groupe Alta
1987	1:20000	Photographies	Panchromatique	Incomplète	NA
1986	1:5000	Photographies	Panchromatique	Incomplète	Groupe Alta (anciennement Photocartotheque québécoise)
1984	1:5000	Photographies	Panchromatique	Incomplète	Ville de Québec et Groupe Alta
1979	1:5000	Photographies	Panchromatique	Incomplète	NA
1977	1:10000	Photographies	Panchromatique	Incomplète	Groupe Alta (anciennement Photocartotheque québécoise)
1976	1:5000	Photographies	Panchromatique	Incomplète	Groupe Alta (anciennement Photocartotheque québécoise)
1968	1:8400	Photographies	Panchromatique	Incomplète	Groupe Alta (anciennement Aérophotos)
1965	1:15840	Photographies	Panchromatique	Complète	Groupe Alta (anciennement Photocartotheque québécoise)
1963	1:9600	Photographies	Panchromatique	Incomplète	Groupe Alta (anciennement Photocartotheque québécoise)
1960	1:30000	Photographies	Panchromatique	Incomplète	Photothèque nationale de l'air
1960	1:35000	Photographies	Panchromatique	Incomplète	NA
1950	1:40000	Photographies	Panchromatique	Complète	Photothèque nationale de l'air
1950	1:9600	Photographies	Panchromatique	Incomplète	Photothèque nationale de l'air
1948	1:25000 40 cm	Orthophotos	Panchromatique	Incomplète	Photothèque nationale de l'air

* La couverture est complète lors qu'elle couvre tout le site déterminé pour cette étude.

Annexe 2a : Rapport d'orientation du stéréo-modèle Q63307-126-125

RESULTS OF THE DVP STEREO ORIENTATIONS

(17-03-2008 13:39:33)

IMAGES USED

Image Name : C:\pierre-luc2\photo\Q63307-126.tif

Image date : 2008/3/17

Image time : 11:31:12

Image size : 124385876

Image Name : C:\pierre-luc2\photo\Q63307-125.tif

Image date : 2008/3/17

Image time : 11:30:58

Image size : 124385860

RESULTS OF INTERIOR ORIENTATION

Date : 17-03-2008

Time : 13:40:54

Results of Transformations

Left image

No	Xmm	Ymm	OrthoX	OrthoY	AffineX	AffineY
1	105.450	-105.450	-0.189	-0.186	0.019	0.041
2	105.450	105.450	-0.245	0.168	-0.019	-0.041
3	-105.450	105.450	0.226	0.268	0.019	0.041
4	-105.450	-105.450	0.207	-0.250	-0.019	-0.041

Right image

No	Xmm	Ymm	OrthoX	OrthoY	AffineX	AffineY
1	105.450	-105.450	-0.204	-0.199	0.005	0.018
2	105.450	105.450	-0.221	0.192	-0.005	-0.018
3	-105.450	105.450	0.214	0.235	0.005	0.018
4	-105.450	-105.450	0.211	-0.228	-0.005	-0.018

RESULTS (MM) OF RELATIVE ORIENTATION

Date : 17-03-2008

Time : 13:48:16

Focal length Image #0 : 152.190

Focal length Image #1 : 152.190

Bx : 85.775

By : 1.251

Bz : -0.212

Phi : 0.043

Omega : 0.073

Kappa : -0.236

Number	Xmodel	Ymodel	Zmodel	Py
1	0.907	0.392	-150.969	-0.011
2	-7.520	60.768	-147.580	0.004
3	84.640	80.389	-154.864	-0.002
4	70.413	-7.020	-155.754	0.008
5	49.642	-72.236	-155.912	-0.005
6	-14.231	-64.435	-147.903	0.005

Standard error : 0.007

RESULTS OF ABSOLUTE ORIENTATION

Date : 09-09-2008

Time : 10:51:00

Number	Xgnd	Dx	Ygnd	Dy	Zgnd	Dz
51	251072.953	0.535	5201836.516	3.344	218.206	0.227
52	250968.876	-0.488	5201537.423	-2.816	238.461	-0.187
54	250966.929	-2.735	5202705.277	-0.945	179.572	0.110
55	250759.201	2.110	5203123.601	-0.598	211.237	-0.574
56	250911.678	-0.374	5202962.920	-0.401	187.184	0.617
65	251260.646	0.951	5202727.000	1.416	175.725	-0.193

Standard Deviation : Mx = 1.500 My = 1.938 Mz = 0.375

Standard Deviation : Mxy = 2.450

Ground Coordinates of Principal Points of Exposures

Left : 250848.371 5201956.791 1698.685 [0.614 0.384 0.203]

Right : 251552.491 5202419.914 1699.941 [0.542 0.471 0.246]

Left Phi : -0.2050 [0.0002]

Omega : 0.1012 [0.0004]

Kappa : 32.4986 [0.0001]

Right Phi : -0.1295 [0.0003]

Omega : 0.1396 [0.0003]

Kappa : 32.2627 [0.0001]

Annexe 2b : Rapport d'orientation du stéréo-modèle Q63307-179-180

RESULTS OF THE DVP STEREO ORIENTATIONS

(17-03-2008 13:55:35)

IMAGES USED

Image Name : E:\Documents and Settings\boutinma\Mes documents\pierre-luc2\photo\Q63307-179.tif

Image date : 2008/3/17

Image time : 11:29:31

Image size : 124386364

Image Name : E:\Documents and Settings\boutinma\Mes documents\pierre-luc2\photo\Q63307-180.tif

Image date : 2008/3/17

Image time : 11:29:52

Image size : 124386140

RESULTS OF INTERIOR ORIENTATION

Date : 17-03-2008

Time : 13:57:13

Results of Transformations

Left image

No	Xmm	Ymm	OrthoX	OrthoY	AffineX	AffineY
1	105.450	-105.450	-0.219	-0.168	-0.004	0.035
2	105.450	105.450	-0.199	0.181	0.004	-0.035
3	-105.450	105.450	0.212	0.239	-0.004	0.035
4	-105.450	-105.450	0.206	-0.252	0.004	-0.035

Right image

No	Xmm	Ymm	OrthoX	OrthoY	AffineX	AffineY
1	105.450	-105.450	-0.223	-0.174	-0.006	0.024
2	105.450	105.450	-0.191	0.194	0.006	-0.024
3	-105.450	105.450	0.211	0.222	-0.006	0.024
4	-105.450	-105.450	0.203	-0.242	0.006	-0.024

RESULTS (MM) OF RELATIVE ORIENTATION

Date : 17-03-2008

Time : 13:59:13

Focal length Image #0 : 152.190

Focal length Image #1 : 152.190

Bx : 86.636

By : -2.005

Bz : -0.173

Phi : 0.231

Omega : 0.205

Kappa : 0.041

Number	Xmodel	Ymodel	Zmodel	Py
1	-1.422	-8.910	-151.804	0.005
2	-7.156	92.463	-145.059	-0.002
3	75.504	94.783	-148.789	0.003
4	89.565	2.709	-152.752	-0.005
5	86.301	-87.495	-156.678	0.003
6	7.139	-94.427	-151.463	-0.003

Standard error : 0.004

RESULTS OF ABSOLUTE ORIENTATION

Date : 25-04-2008

Time : 15:26:18

Number	Xgnd	Dx	Ygnd	Dy	Zgnd	Dz
60	251767.904	-2.203	5199202.850	0.541	199.635	0.095
63	251336.734	0.151	5200117.794	0.330	201.701	-0.014
64	251616.898	2.052	5199130.312	-0.872	208.361	-0.081

Standard Deviation : Mx = 1.740 My = 0.622 Mz = 0.072

Standard Deviation : Mxy = 1.848

Ground Coordinates of Principal Points of Exposures

Left : 250856.153 5199690.641 1691.100 [1.336 1.298 0.580]

Right : 251602.884 5200095.730 1701.365 [1.385 1.354 0.624]

Left Phi : -0.5942 [0.0007]

Omega : 0.5968 [0.0008]

Kappa : 29.8094 [0.0003]

Right Phi : -0.2911 [0.0007]

Omega : 0.6600 [0.0008]

Kappa : 29.8501 [0.0003]

Annexe 2c : Rapport d'orientation du stéréo-modèle Q63307-180-181

RESULTS OF THE DVP STEREO ORIENTATIONS

(17-03-2008 13:17:38)

IMAGES USED

Image Name : C:\pierre-luc2\photo\Q63300-180.tif

Image date : 2008/1/9

Image time : 8:53:8

Image size : 128499824

Image Name : C:\pierre-luc2\photo\Q63300-181.tif

Image date : 2008/3/17

Image time : 13:13:27

Image size : 124384472

RESULTS OF INTERIOR ORIENTATION

Date : 17-03-2008

Time : 13:28:20

Results of Transformations

Left image

No	Xmm	Ymm	OrthoX	OrthoY	AffineX	AffineY
1	105.450	-105.450	-0.183	-0.170	0.004	0.023
2	105.450	105.450	-0.196	0.164	-0.004	-0.023
3	-105.450	105.450	0.191	0.216	0.004	0.023
4	-105.450	-105.450	0.188	-0.211	-0.004	-0.023

Right image

No	Xmm	Ymm	OrthoX	OrthoY	AffineX	AffineY
1	105.450	-105.450	-0.188	-0.167	-0.001	0.041
2	105.450	105.450	-0.207	0.147	0.001	-0.041
3	-105.450	105.450	0.187	0.249	-0.001	0.041
4	-105.450	-105.450	0.208	-0.229	0.001	-0.041

RESULTS (MM) OF RELATIVE ORIENTATION

Date : 17-03-2008

Time : 13:30:35

Focal length Image #0 : 152.190

Focal length Image #1 : 152.190

Bx : 91.339

By : -0.311

Bz : 0.006

Phi : -0.159

Omega : 0.497

Kappa : -0.087

Number	Xmodel	Ymodel	Zmodel	Py
1	-6.283	-7.520	-153.645	-0.009
2	4.427	100.222	-153.400	0.005
3	69.268	82.104	-150.328	-0.008
4	77.404	12.522	-152.346	0.012
5	86.460	-86.751	-154.234	-0.005
6	-3.236	-86.549	-154.203	0.005

Standard error : 0.008

RESULTS OF ABSOLUTE ORIENTATION

Date : 02-05-2008

Time : 08:06:04

Number	Xgnd	Dx	Ygnd	Dy	Zgnd	Dz
46	253854.933	2.450	5198668.158	-0.885	166.609	0.044
47	254057.143	-2.860	5198704.804	1.326	157.440	-0.086
49	254886.980	0.410	5198467.025	-0.441	165.120	0.042

Standard Deviation : Mx = 2.187 My = 0.955 Mz = 0.061

Standard Deviation : Mxy = 2.386

Ground Coordinates of Principal Points of Exposures

Left : 254376.371 5198079.619 1707.234 [0.402 0.500 0.173]

Right : 255158.267 5198563.574 1702.520 [0.400 0.384 0.211]

Left Phi : -0.2756 [0.0003]

Omega : -1.0104 [0.0002]

Kappa : 31.9510 [0.0001]

Right Phi : -0.1477 [0.0002]

Omega : -0.5039 [0.0002]

Kappa : 31.8669 [0.0001]

Annexe 2d : Rapport d'orientation du stéréo-modèle Q63307-202-201

RESULTS OF THE DVP STEREO ORIENTATIONS

(12-03-2008 13:35:03)

IMAGES USED

Image Name : C:\pierre-luc2\photo\Q63307-202.tif

Image date : 2008/1/8

Image time : 14:23:17

Image size : 128500988

Image Name : C:\pierre-luc2\photo\Q63307-201.tif

Image date : 2008/1/8

Image time : 14:23:0

Image size : 128500992

RESULTS OF INTERIOR ORIENTATION

Date : 12-03-2008

Time : 14:00:15

Results of Transformations

Left image

No	Xmm	Ymm	OrthoX	OrthoY	AffineX	AffineY
1	105.450	-105.450	-0.170	-0.158	0.008	0.039
2	105.450	105.450	-0.204	0.139	-0.008	-0.039
3	-105.450	105.450	0.185	0.236	0.008	0.039
4	-105.450	-105.450	0.189	-0.217	-0.008	-0.039

Right image

No	Xmm	Ymm	OrthoX	OrthoY	AffineX	AffineY
1	105.450	-105.450	-0.175	-0.165	0.004	0.026
2	105.450	105.450	-0.194	0.153	-0.004	-0.026
3	-105.450	105.450	0.182	0.217	0.004	0.026
4	-105.450	-105.450	0.186	-0.205	-0.004	-0.026

RESULTS (MM) OF RELATIVE ORIENTATION

Date : 17-03-2008

Time : 13:37:14

Focal length Image #0 : 152.190

Focal length Image #1 : 152.190

Bx : 85.753

By : -0.478

Bz : 0.013

Phi : -0.179

Omega : -0.277

Kappa : -0.117

Number	Xmodel	Ymodel	Zmodel	Py
--------	--------	--------	--------	----

1	-8.221	-0.694	-154.389	-0.012
2	8.908	103.856	-151.566	0.014
3	49.028	80.180	-155.564	-0.020
4	86.111	-3.356	-152.816	0.016
5	91.349	-99.450	-152.353	-0.008
6	5.157	-79.796	-152.737	0.009

Standard error : 0.013

RESULTS OF ABSOLUTE ORIENTATION

Date : 25-04-2008

Time : 11:15:12

Number	Xgnd	Dx	Ygnd	Dy	Zgnd	Dz
43	252819.392	0.378	5197981.394	-0.273	159.536	0.094
57	252355.545	-0.698	5199348.457	-0.388	171.147	-0.120
59	251813.076	-0.291	5198905.625	0.852	200.690	-0.521
60	251767.904	0.611	5199202.850	-0.191	199.635	0.548

Standard Deviation : $M_x = 0.522$ $M_y = 0.497$ $M_z = 0.386$

Standard Deviation : $M_{xy} = 0.720$

Ground Coordinates of Principal Points of Exposures

Left : 252101.828 5198617.788 1696.920 [0.417 0.598 0.212]

Right : 252825.787 5199072.818 1702.096 [0.453 0.433 0.198]

Left Phi : 0.2303 [0.0003]

Omega : 1.0024 [0.0003]

Kappa : 32.4707 [0.0001]

Right Phi : -0.0696 [0.0002]

Omega : 0.8645 [0.0003]

Kappa : 32.3537 [0.0001]

Annexe 2e : Rapport d'orientation du stéréo-modèle Q65347-70-69

RESULTS OF THE DVP STEREO ORIENTATIONS

(04-03-2008 18:51:04)

IMAGES USED

Image Name : C:\pierre-luc2\photo\Q65347-70.tif

Image date : 2008/1/8

Image time : 12:57:46

Image size : 348783948

Image Name : C:\pierre-luc2\photo\Q65347-69.tif

Image date : 2008/1/8

Image time : 12:57:46

Image size : 348783948

RESULTS OF INTERIOR ORIENTATION

Date : 04-03-2008

Time : 18:54:41

Results of Transformations

Left image

No	Xmm	Ymm	OrthoX	OrthoY	AffineX	AffineY
1	105.700	-105.700	-0.193	-0.174	-0.002	0.033
2	105.700	105.700	-0.204	0.160	0.002	-0.033
3	-105.700	105.700	0.190	0.239	-0.002	0.033
4	-105.700	-105.700	0.207	-0.225	0.002	-0.033

Right image

No	Xmm	Ymm	OrthoX	OrthoY	AffineX	AffineY
1	105.700	-105.700	-0.180	-0.143	0.004	0.065
2	105.700	105.700	-0.211	0.120	-0.004	-0.065
3	-105.700	105.700	0.189	0.272	0.004	0.065
4	-105.700	-105.700	0.203	-0.250	-0.004	-0.065

RESULTS (MM) OF RELATIVE ORIENTATION

Date : 08-05-2008

Time : 11:08:46

Focal length Image #0 : 152.550

Focal length Image #1 : 152.550

Bx : 100.563

By : -1.334

Bz : -0.328

Phi : 0.083

Omega : -0.325

Kappa : -3.621

Number Xmodel Ymodel Zmodel Py

2	0.880	92.789	-152.767	0.009
3	87.912	92.397	-149.510	0.009
4	95.380	-2.063	-149.141	0.005
6	20.320	-58.160	-156.370	0.014
7	94.837	-96.966	-152.398	-0.003
9	6.833	-59.222	-156.425	-0.010
10	51.416	73.447	-155.173	-0.025

Standard error : 0.012

RESULTS OF ABSOLUTE ORIENTATION

Date : 09-05-2008

Time : 09:15:55

Number	Xgnd	Dx	Ygnd	Dy	Zgnd	Dz
51	251072.953	-0.060	5201836.516	2.881	218.206	0.167
54	250966.929	-3.277	5202705.277	-2.649	179.572	-1.805
65	251260.646	-0.315	5202727.000	1.322	175.725	0.512
67	251193.023	-0.304	5204304.327	0.732	202.626	-0.259
68	251472.732	1.647	5204604.506	-0.084	207.486	0.539
69	250718.807	2.309	5202131.729	-2.201	237.948	0.846

Standard Deviation : Mx = 1.778 My = 1.934 Mz = 0.878

Standard Deviation : Mxy = 2.628

Ground Coordinates of Principal Points of Exposures

Left : 250900.524 5203729.910 2912.909 [0.468 0.419 0.211]

Right : 252653.956 5203737.019 2892.507 [0.401 0.403 0.185]

Left Phi : 0.4807 [0.0001]

Omega : 0.3118 [0.0002]

Kappa : 360.9889 [0.0001]

Right Phi : 0.5580 [0.0001]

Omega : -0.0141 [0.0001]

Kappa : 357.3711 [0.0000]

Annexe 2f : Rapport d'orientation du stéréo-modèle Q02707-18-17

RESULTS OF THE DVP STEREO ORIENTATIONS

(04-03-2008 14:01:26)

IMAGES USED

Image Name : C:\pierre-luc2\photo\Q02707-18.tif

Image date : 2008/1/8

Image time : 10:35:36

Image size : 313298508

Image Name : C:\pierre-luc2\photo\Q02707-17.tif

Image date : 2008/1/8

Image time : 10:36:8

Image size : 313297660

RESULTS OF INTERIOR ORIENTATION

Date : 04-03-2008

Time : 14:05:38

Results of Transformations

Left image

No	Xmm	Ymm	OrthoX	OrthoY	AffineX	AffineY
1	105.825	-105.825	-0.093	-0.027	-0.009	0.055
2	105.825	105.825	-0.073	0.030	0.009	-0.055
3	-105.825	105.825	0.075	0.136	-0.009	0.055
4	-105.825	-105.825	0.091	-0.139	0.009	-0.055

Right image

No	Xmm	Ymm	OrthoX	OrthoY	AffineX	AffineY
1	105.825	-105.825	-0.062	-0.018	-0.012	0.059
2	105.825	105.825	-0.065	-0.009	0.012	-0.059
3	-105.825	105.825	0.038	0.135	-0.012	0.059
4	-105.825	-105.825	0.088	-0.109	0.012	-0.059

RESULTS (MM) OF RELATIVE ORIENTATION

Date : 04-03-2008

Time : 17:33:50

Focal length Image #0 : 153.510

Focal length Image #1 : 153.510

Bx : 92.533

By : 1.989

Bz : -0.163

Phi : 0.009

Omega : -2.026

Kappa : 0.684

Number Xmodel Ymodel Zmodel Py

1	-6.385	103.013	-152.075	-0.014
2	75.087	96.206	-151.708	0.021
3	73.466	9.405	-151.418	-0.044
4	-1.835	-19.935	-155.922	0.038
5	-14.569	-97.617	-151.911	-0.035
6	32.044	-78.721	-156.168	0.040

Standard error : 0.034

RESULTS OF ABSOLUTE ORIENTATION

Date : 21-04-2008

Time : 09:22:39

Number	Xgnd	Dx	Ygnd	Dy	Zgnd	Dz
1	251231.272	0.533	5202028.024	0.787	197.750	0.114
3	251173.288	0.030	5202764.178	0.680	176.079	-0.219
4	250995.692	-0.114	5203199.067	-0.628	181.846	0.110
5	251334.298	-0.449	5201730.480	-0.840	230.336	-0.004

Standard Deviation : Mx = 0.354 My = 0.738 Mz = 0.135

Standard Deviation : Mxy = 0.819

Ground Coordinates of Principal Points of Exposures

Left : 251305.495 5203213.959 2770.445 [0.536 0.440 0.142]

Right : 252839.005 5203160.881 2753.826 [0.507 0.359 0.296]

Left Phi : 0.5024 [0.0001]

Omega : 0.4864 [0.0002]

Kappa : 356.7810 [0.0000]

Right Phi : 0.6253 [0.0001]

Omega : -1.5360 [0.0002]

Kappa : 357.4852 [0.0001]

Annexe 2g : Rapport d'orientation du stéréo-modèle Q02707-19-18

RESULTS OF THE DVP STEREO ORIENTATIONS

(04-03-2008 17:31:01)

Image Name : C:\pierre-luc2\photo\Q02707-19.tif
Image date : 2008/1/8
Image time : 16:5:24
Image size : 313298872

Image Name : C:\pierre-luc2\photo\Q02707-18.tif
Image date : 2008/1/8
Image time : 15:35:36
Image size : 313298508

RESULTS OF INTERIOR ORIENTATION

Date : 04-03-2008

Time : 17:32:48

Results of Transformations

Left image

No	Xmm	Ymm	OrthoX	OrthoY	AffineX	AffineY
1	105.825	-105.825	-0.053	0.020	0.002	0.064
2	105.825	105.825	-0.047	-0.008	-0.002	-0.064
3	-105.825	105.825	0.058	0.109	0.002	0.064
4	-105.825	-105.825	0.042	-0.120	-0.002	-0.064

Right image

No	Xmm	Ymm	OrthoX	OrthoY	AffineX	AffineY
1	105.825	-105.825	-0.083	-0.037	-0.007	0.050
2	105.825	105.825	-0.080	0.026	0.007	-0.050
3	-105.825	105.825	0.069	0.137	-0.007	0.050
4	-105.825	-105.825	0.094	-0.126	0.007	-0.050

RESULTS (MM) OF RELATIVE ORIENTATION

Date : 04-03-2008

Time : 18:08:25

Focal length Image #0 : 153.510

Focal length Image #1 : 153.510

Bx : 89.746

By : -0.417

Bz : -0.818

Phi : 0.317

Omega : -1.049

Kappa : -3.037

Number	Xmodel	Ymodel	Zmodel	Py
--------	--------	--------	--------	----

2	37.886	108.608	-155.172	-0.000
3	27.582	37.299	-155.125	0.000
1	87.906	99.726	-154.331	0.000
5	96.887	-97.165	-150.608	-0.006
6	97.001	-97.492	-150.580	0.006
7	42.069	-103.328	-145.021	-0.000

Standard error : 0.004

RESULTS OF ABSOLUTE ORIENTATION

Date : 06-05-2008

Time : 13:29:46

Number	Xgnd	Dx	Ygnd	Dy	Zgnd	Dz
1	251231.272	-0.149	5202028.024	0.657	197.750	-0.183
2	250904.415	-0.029	5202898.709	0.867	186.033	0.012
3	251173.288	0.137	5202764.178	0.078	176.079	-0.044
4	250995.692	-0.140	5203199.067	-0.919	181.846	0.045
5	251334.298	0.180	5201730.480	-0.683	230.336	0.169

Standard Deviation : Mx = 0.137 My = 0.707 Mz = 0.115

Standard Deviation : Mxy = 0.720

Ground Coordinates of Principal Points of Exposures

Left : 249761.894 5203208.642 2770.198 [0.495 0.479 0.260]

Right : 251258.128 5203196.849 2778.232 [0.598 0.528 0.132]

Left Phi : -0.8445 [0.0001]

Omega : 1.9068 [0.0002]

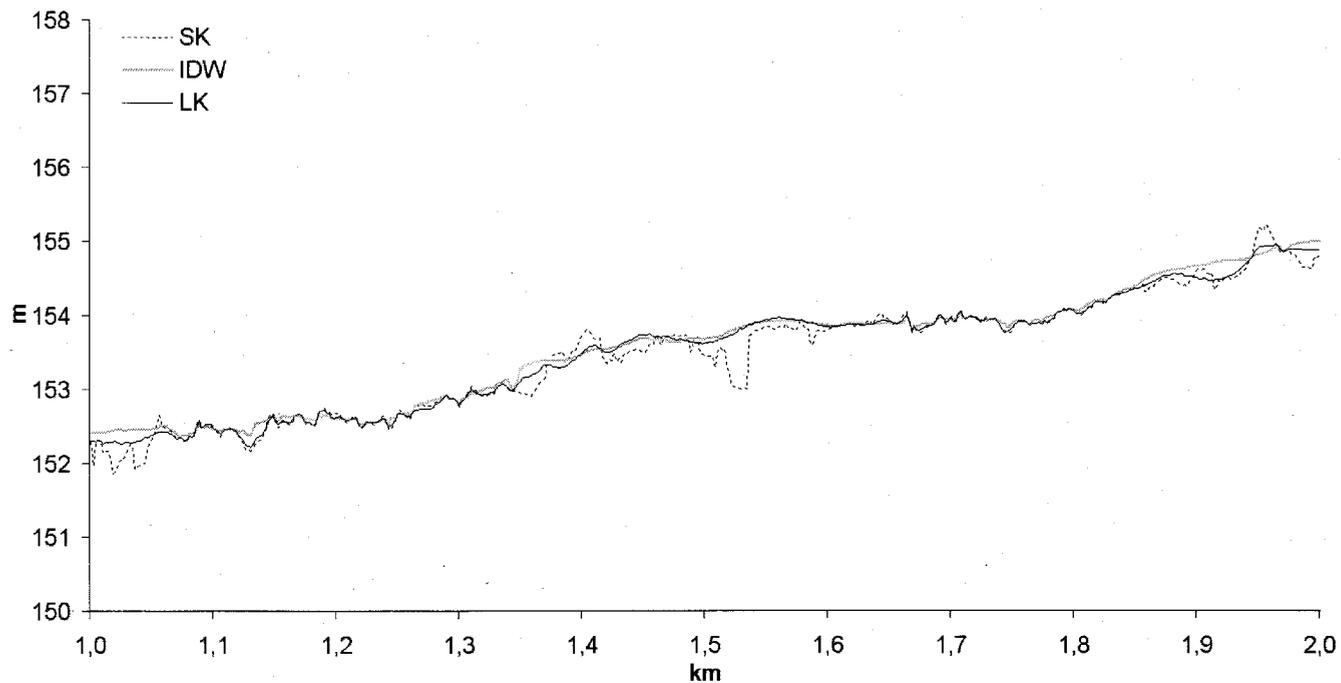
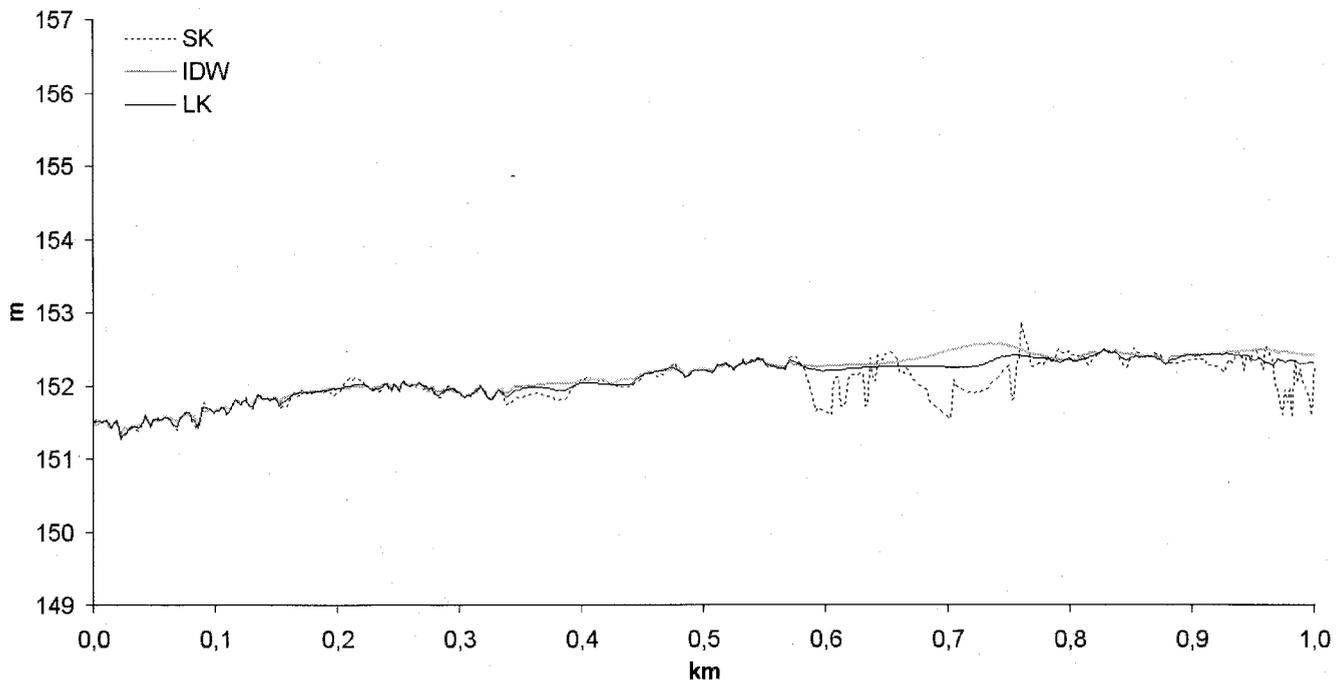
Kappa : 359.8251 [0.0001]

Right Phi : -0.5239 [0.0001]

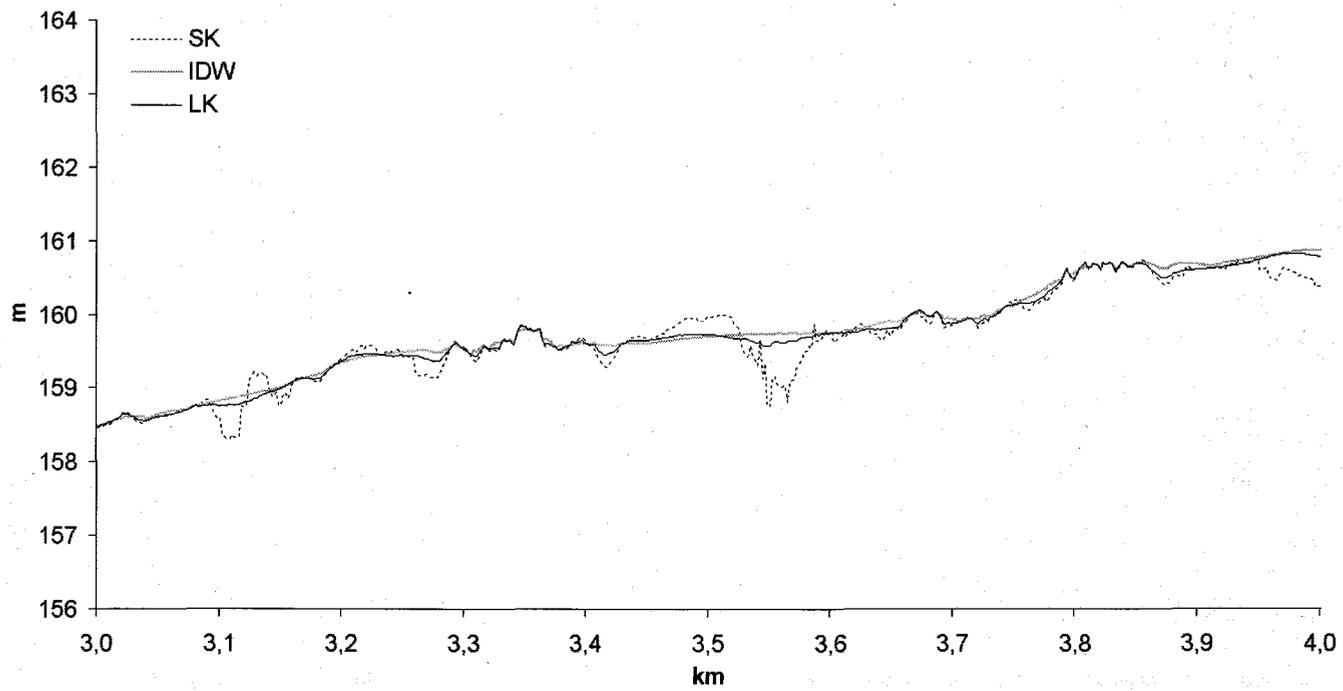
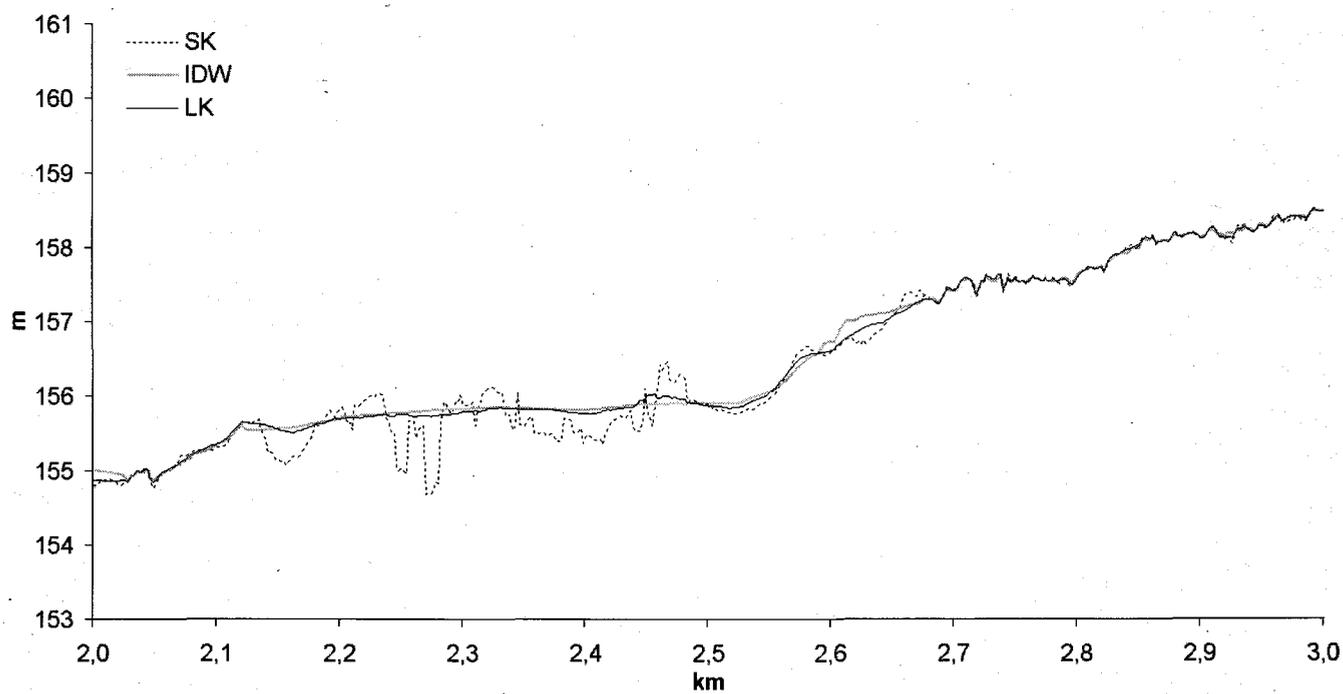
Omega : 0.8585 [0.0002]

Kappa : 356.7784 [0.0000]

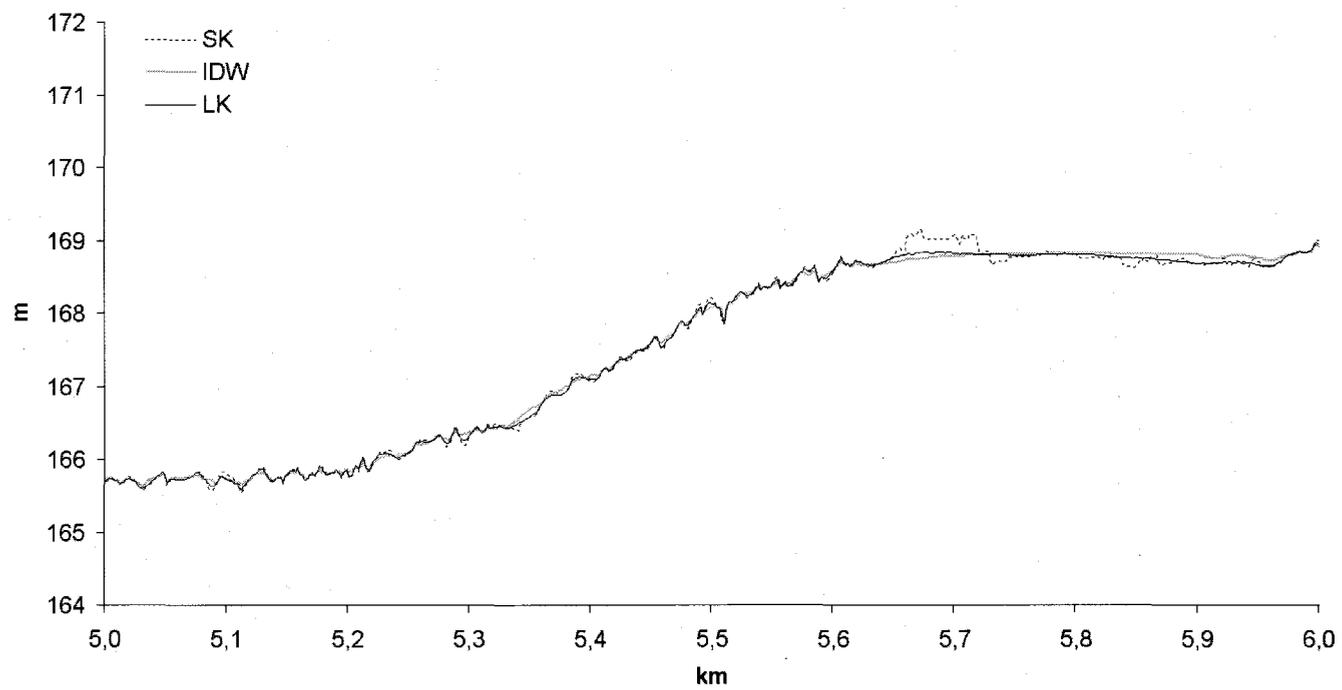
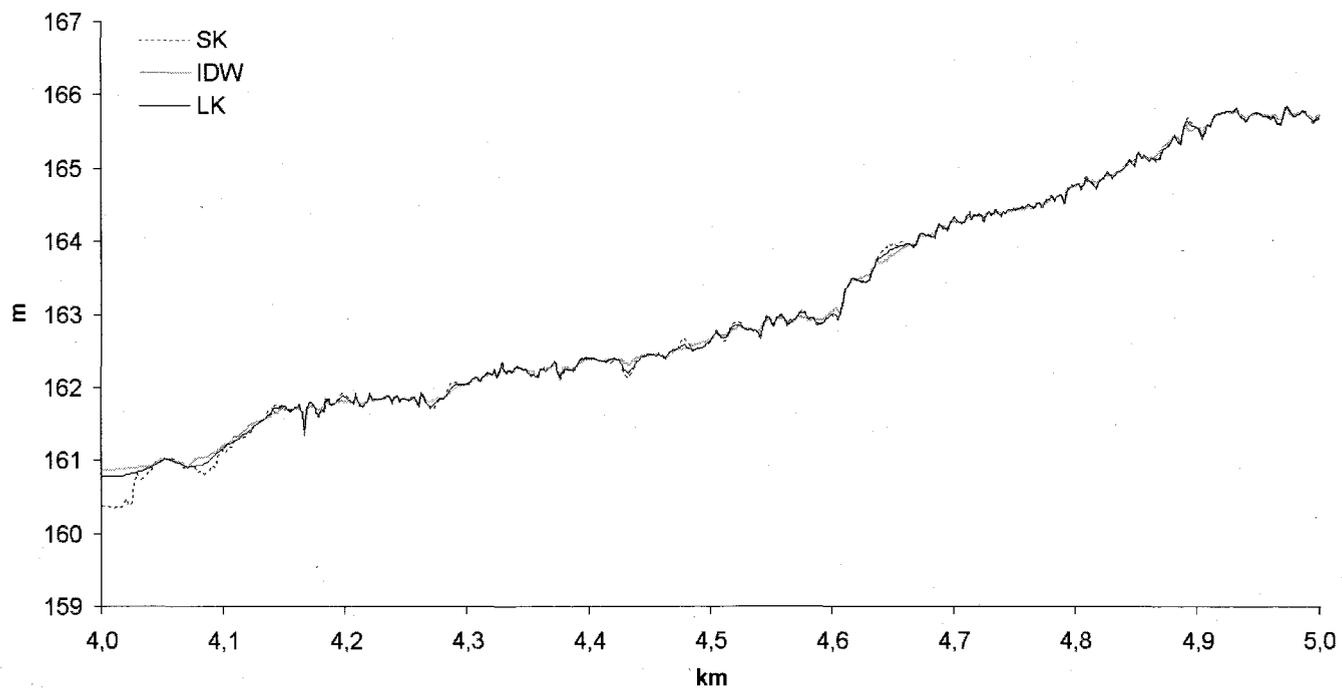
Annexe 3 : Profils en coupe produits à partir des MNT eau illustrant le comportement des interpolateurs inverse de la distance (IDW), krigeage linéaire (LK) et krigeage avec spline (SK). Exagération verticale de 60.



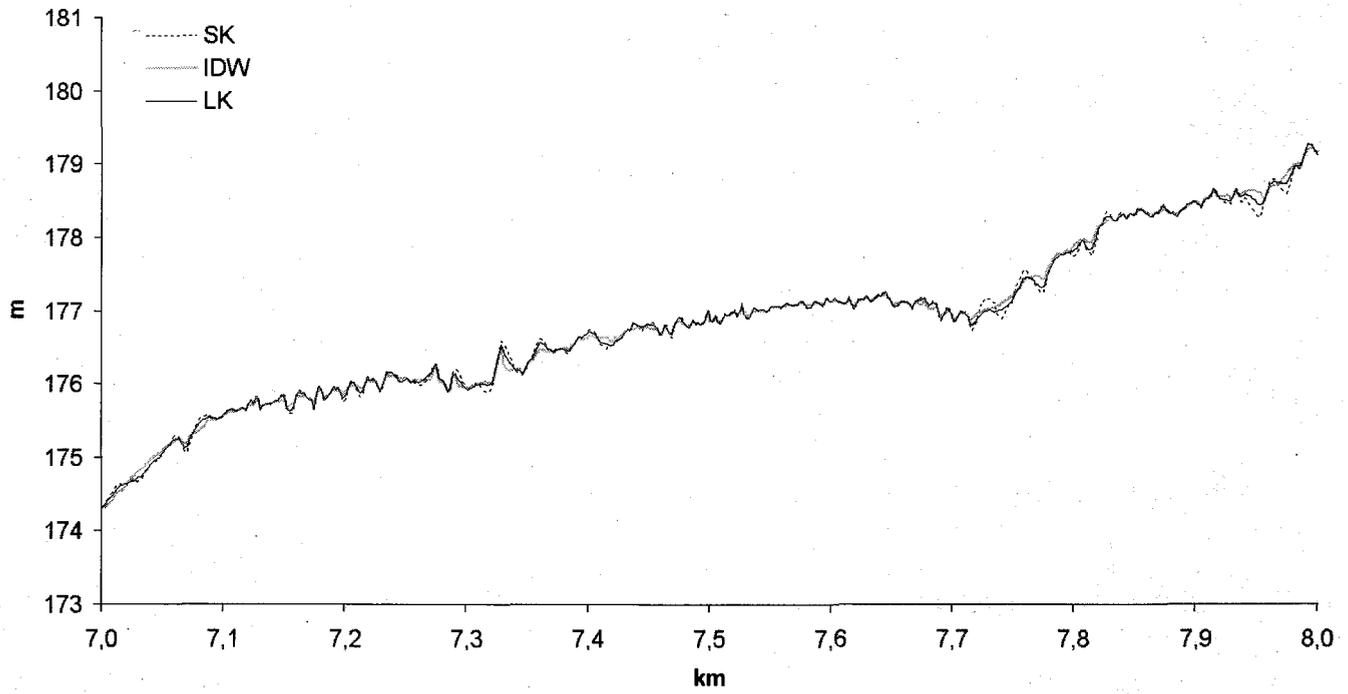
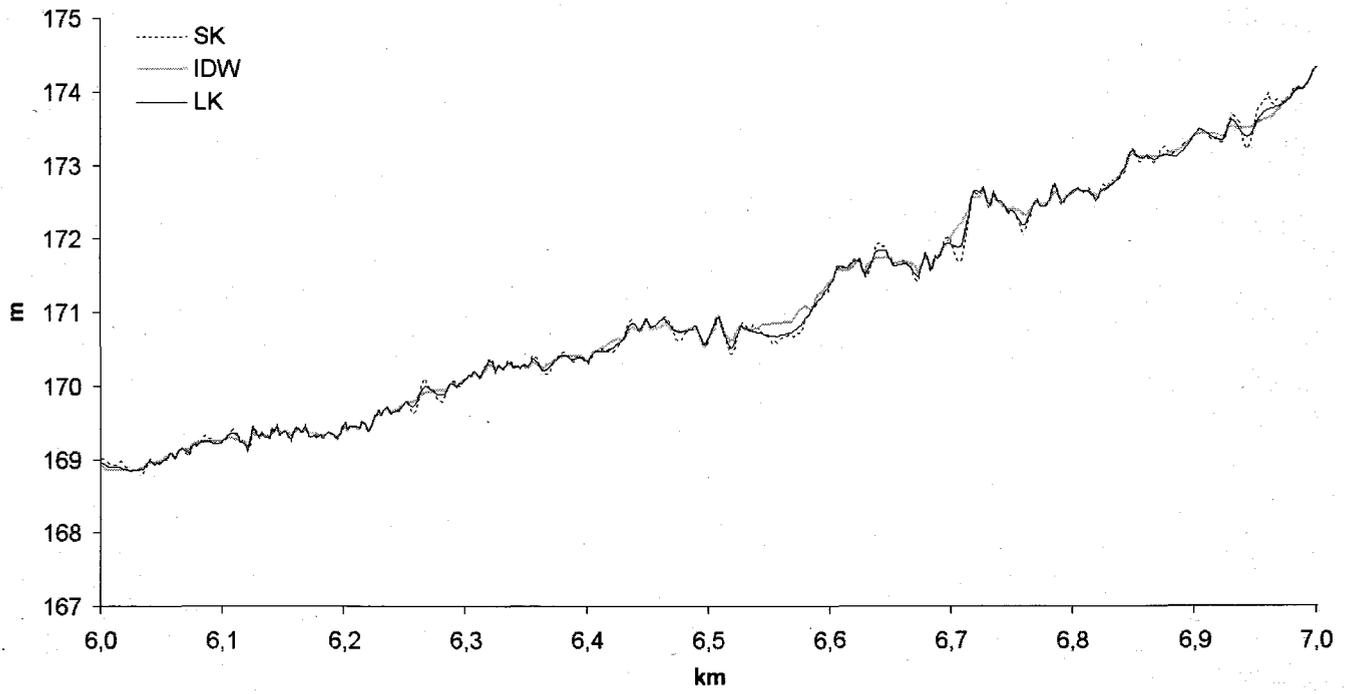
Suite annexe 3



Suite annexe 3



Suite annexe 3



Suite annexe 3

