

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR
ARIANE DROUIN

ÉLABORATION D'UN MODÈLE DE REPRÉSENTATION DES NIVEAUX
D'INONDATION À PARTIR D'UN SIG – RIVIÈRE SAINT-FRANÇOIS
(AXE SHERBROOKE-DRUMMONDVILLE)

OCTOBRE 2008

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

REMERCIEMENTS

Il découle d'une maîtrise de nombreux apprentissages professionnels et personnels, et un grand sentiment d'avancement et d'accomplissement, puisque, en fait, la poursuite d'un projet de recherche est constituée d'une succession de problèmes et de solutions, de hauts et de bas, et de découragements et d'enthousiasme inouï. Lors de ce parcours, de nombreuses personnes m'ont appuyée et aidée. La réalisation de ce projet de maîtrise n'aurait pu être possible sans l'aide et le soutien de ces personnes, que je remercie du fond du cœur.

Tout d'abord, je souhaite sincèrement remercier ma directrice de recherche, le Dr Diane Saint-Laurent, pour sa confiance en moi dès le début de notre collaboration, pour son encadrement, ses conseils et ses encouragements de même que pour son immense disponibilité et son toujours très grand souci de m'aider dans l'accomplissement de mon projet de maîtrise.

Je remercie également les Dr Denis Leroux et Léo Provencher, les membres de mon comité d'orientation, pour leurs commentaires constructifs, leur intérêt pour mon projet et pour la révision de mon mémoire. Et, merci également au Dr Denis Leroux pour son aide et l'apport de son expertise dans la portion géomatique de ma recherche et au Dr Léo Provencher pour sa minutie et son éthique de travail exemplaire. Je tiens également à remercier sincèrement M. Pierre-André Bordeleau pour tout le temps, et l'énergie consacrés à l'avancement de mes réflexions et de mon projet de maîtrise. Merci également pour sa disponibilité, ses conseils et son soutien technique tout au long de la réalisation de ma recherche.

Un grand merci également à Marlies Hahni pour son incroyable travail réalisé sur le terrain de même que pour son écoute, son soutien et surtout son amitié. Merci aussi à Marie-Ève Gauthier pour sa présence jours après jours, ses encouragements, son dynamisme et sa spontanéité rafraîchissante. Un merci également à Patricia Duplessis pour son support et ses encouragements. Je souhaite aussi mentionner mes collègues du LIAGE (Laboratoire Interdisciplinaire d'Application en Géomatique Environnementale), Mushombe Muma et Ghassen Ibrahim, ainsi que les personnes m'ayant aidé lors de mes travaux de terrain soient Batiste Cutaña et Marc Laurencelle.

Je tiens également à remercier particulièrement mon copain, ma famille et mes amis pour leur présence, leur soutien moral et leurs encouragements.

Enfin, je désire remercier les différents organismes subventionnaires qui ont appuyé financièrement ce projet de recherche, dont le Conseil de recherches en sciences naturelles et génie du Canada (CRSNG) et le Fond québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT), ainsi que le Centre d'études universitaires de l'Université du Québec à Trois-Rivières (C.E.U.) et le Décanat des études des cycles supérieurs de l'UQTR pour son aide à la diffusion.

AVANT-PROPOS

Ce mémoire de maîtrise est composé de deux articles scientifiques et d'un résumé du projet de maîtrise conformément aux règles des études de cycles supérieurs dans le cadre de la réalisation d'une maîtrise en sciences de l'environnement. La première partie du mémoire résume les grandes lignes du projet en y intégrant la problématique, les objectifs, un résumé de la méthodologie ainsi que des résultats. Le deuxième chapitre présente le premier article déjà publié dans la revue électronique internationale Environnement urbain / Urban Environment. L'article a pour titre *Élaboration d'un modèle de simulation des niveaux d'inondation à partir d'un SIG et application à un site : Rivière Saint-François à Sherbrooke*. Cet article a été publié dans un numéro spécial sur les inondations en milieux urbains et périurbains dans la revue dirigé par l'Institut national de la recherche scientifique – Urbanisation, Culture et Société (INRS-UCS). Enfin, le troisième chapitre présente un second article qui sera soumis à la revue électronique Hydrological Sciences Journal / Journal des sciences hydrologiques et ayant pour titre *La comparaison de méthodes et paramètres d'interpolation afin de réaliser des modèles numériques d'élévation (MNE) de haute précision pour la représentation microtopographique des plaines inondables*. À la fin du mémoire, sont présentés, en annexes, les instructions aux auteurs pour les deux revues (cf. Annexe A et C) et la lettre de l'éditeur confirmant le statut de l'article pour la Revue Environnement urbain / Urban Environment (cf. Annexe B).

Par ailleurs, ce projet de maîtrise s'inscrit dans un programme de recherche dirigé par la professeure Diane Saint-Laurent, lequel programme porte principalement sur la «Reconstitution chronologique des inondations et paléo-inondations en regard aux changements climatiques – versant sud du fleuve Saint-Laurent», projet subventionné par le CRSNG (2002-2007) et le fond institutionnel de l'UQTR (2002-2005).

RÉSUMÉ

Les plaines inondables sont soumises à diverses pressions anthropiques, en plus d'être affectées par les variations du régime hydrique, dont les crues printanières et les inondations qui causent parfois des dommages considérables aux populations riveraines et aux infrastructures. Dans ce contexte, il apparaît nécessaire d'identifier spatialement et de façon précise les zones les plus à risques lors des débordements, afin d'améliorer la sécurité des populations et de protéger les infrastructures en place, et parallèlement de mieux comprendre la dynamique fluviale associée à ces milieux riverains. Ce projet de recherche vise l'élaboration et l'application d'un modèle de représentation des niveaux d'inondation, à partir d'un Système d'information géographique (SIG), le long du tronçon fluvial de la rivière Saint-François, entre Sherbrooke et Drummondville. Le projet a pour objectif la cartographie des niveaux d'inondation en milieu urbain, semi-naturel et naturel, impliquant la réalisation de modèles numériques d'élévation (MNE) de haute précision, afin de représenter la microtopographie des secteurs riverains. Au niveau de la démarche méthodologique, des travaux de terrain réalisés à l'aide d'un GPS et d'une station totale ont d'abord été effectués, afin d'obtenir des données ponctuelles d'élévation. Par la suite, des modèles numériques d'élévation ont été créés à partir des données recueillies. Il faut rappeler que de nombreux facteurs influencent la qualité des modèles numériques d'élévation, dont les données sources et les méthodes et paramètres d'interpolation utilisés notamment. Différentes méthodes d'interpolation - et les paramètres qui leurs sont reliés - ont été comparées au moyen d'un SIG afin d'identifier celles étant les plus efficaces dans un cadre microtopographique et considérant les données d'élévation utilisées. L'efficacité de chacune des méthodes d'interpolation a été vérifiée au moyen de la validation croisée, et les erreurs (*Root Mean Square Error* – RMSE) de celles-ci, ont été calculées afin d'identifier la méthode et les paramètres d'interpolation représentant le plus adéquatement la microtopographie des terrains à l'étude. Afin d'améliorer la validation de la qualité des méthodes d'interpolation, des tests statistiques, des cartes de l'erreur et des évaluations visuelles en trois dimensions ont été réalisés. La méthode d'interpolation la plus performante, c'est-à-dire celle du krigeage simple, a ensuite été utilisée pour créer les MNE. De plus, la précision moyenne des MNE réalisés au moyen de la méthode du krigeage simple est de 27 cm. Les modèles numériques d'élévation ont ensuite été couplés à des niveaux d'eau afin

de délimiter de façon précise les zones inondées lors de divers débordements de la rivière. Les résultats du modèle de représentation des niveaux d'inondation sont présentés sous forme de cartes détaillées. Ces dernières permettent d'identifier les populations et les infrastructures riveraines les plus touchées au moment des débordements de la rivière, mais également de visualiser l'étendue des nappes d'eau sur les plaines d'inondation et de localiser les zones plus à risques dépendamment des divers niveaux d'inondation. Cette cartographie pourrait très certainement être utilisée comme outil d'aide à la décision ou comme outil de planification dans la gestion et l'aménagement du territoire.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ii
AVANT-PROPOS	iv
RÉSUMÉ	v
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xi
CHAPITRE 1.....	1
INTRODUCTION	2
1.1 Problématique	3
1.2 Revue de littérature.....	5
1.2.1 Cartographie des zones inondables	5
1.2.2 SIG et modèles numériques d'élévation (MNE)	10
1.2.2.1 Les facteurs influençant la qualité des MNE	11
1.2.2.2 L'évaluation de la qualité des MNE.....	15
1.3 Objectifs de recherche	17
1.4 Méthodologie	18
1.4.1 Sites à l'étude	19
1.4.2 Travaux de terrain.....	21
1.4.3 Modèles numériques d'élévation (MNE)	23
1.4.3.1 Test des méthodes d'interpolation	23
1.4.3.2 Évaluation de la qualité des méthodes d'interpolation	26
1.4.4 Données hydrologiques	28
1.4.5 Réalisation du modèle de représentation des niveaux d'inondation	29
1. 5 Résultats et interprétation	30
1.5.1 Modèles numériques d'élévation (MNE)	30
1.5.1.1 Tests des méthodes et paramètres d'interpolation	30
1.5.1.2 Évaluation de la qualité des méthodes d'interpolation	30
1.5.2 Réalisation du modèle de représentation des niveaux d'inondation	35
CONCLUSION	39
RÉFÉRENCES	42

CHAPITRE 2	46
Résumé	48
Abstract.....	48
1. Introduction	49
2. Les secteurs à l'étude	52
3. Approches méthodologiques	54
3.1. Le modèle de simulation et la cartographie des niveaux d'inondation en milieu urbain.....	54
3.2. Recension des points d'élévation sur le terrain	56
3.3. Création des modèles numériques d'élévation (MNE)	58
3.4. Données hydrologiques et courbes de tarage	60
3.5. Principales difficultés méthodologiques rencontrées	61
4. Résultats et discussion.....	62
4.1. Présentation des cartes des niveaux d'inondation.....	62
4.2. Autres résultats	65
5. Conclusion.....	66
Remerciements	68
Références bibliographiques	69
CHAPITRE 3.....	80
RÉSUMÉ	82
MOTS CLÉS	82
1. INTRODUCTION.....	83
2. MATÉRIEL ET MÉTHODES	85
2.1. Choix des sites à l'étude et travaux de terrain	85
2.2. Test des méthodes et paramètres d'interpolation	86
2.3. Évaluation de la qualité des méthodes d'interpolation	86
3. RÉSULTATS	89
3.1. Tests des méthodes et paramètres d'interpolation	89
3.2. L'évaluation de la qualité des méthodes d'interpolation.....	90
4. DISCUSSION	94
REMERCIEMENTS.....	99
RÉFÉRENCES	100

ANNEXE A	115
ANNEXE B	120
ANNEXE C	122

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Les sites à l'étude et leur localisation	20
Tableau 1.2 Description des sites à l'étude	23
Tableau 1.3 RMSE des points «test» des méthodes d'interpolation (en mètres) pour chacun des 9 sites à l'étude.....	31
Tableau 1.4 La précision en mètres des MNE des 9 sites à l'étude.....	38
Tableau 3.1 Les paramètres d'interpolation pouvant être modifiés dépendamment des différentes méthodes d'interpolation	102
Tableau 3.2 Les combinaisons de paramètres d'interpolation donnant les erreurs (RMSE) les plus faibles pour chaque méthode d'interpolation pour le site RIC-2	103
Tableau 3.3 RMSE des points «test» des méthodes d'interpolation (en mètres) pour chacun des neuf sites à l'étude.....	104
Tableau 3.4 Ordination des méthodes d'interpolation les unes par rapport aux autres pour chacun des neuf sites à l'étude	105
Tableau 3.5 Nombre d'apparition de chacune des méthodes d'interpolation dans la classe supérieure.....	106
Tableau 3.6 Nombre de points «test» d'élévation avec une erreur absolue plus élevée que 60 cm dépendamment de chaque méthode d'interpolation pour l'ensemble des sites à l'étude.....	107

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Schéma méthodologique du projet.....	19
Figure 1.2 Différence entre les données ponctuelles d'élévation et les surfaces topographiques interpolées.....	25
Figure 1.3 Schéma explicatif des tests des méthodes et paramètres d'interpolation.....	26
Figure 1.4 MNE en trois dimensions réalisé au moyen de la méthode d'interpolation de l'inverse de la distance (IDW) pour le site RIC-2	28
Figure 1.5 Exemple de carte de l'erreur du troisième type pour le site WIN-2	33
Figure 1.6 Carte des niveaux d'inondation pour le site WIN-1.....	36
Figure 1.7 Carte des niveaux d'inondation pour le site SHE-2	37
Figure 2.1 Localisation du bassin versant de la rivière Saint-François et des sites à l'étude	71
Figure 2.2 Schéma méthodologique du modèle de simulation des niveaux d'inondation	72
Figure 2.3 Exemple de l'échantillonnage par transects réalisé à la station totale	73
Figure 2.4 Schéma explicatif de la validation croisée	74
Figure 2.5 Représentation des inondations de 1982 et 2003 (Site SHE-2).....	75
Figure 2.6 Les pentes et la localisation de la limite supérieure de la berge (Site SHE-2)	76
Figure 2.7 Les limites d'inondation pour quatre débits différents (Site SHE-2)	77
Figure 2.8 Les limites d'inondation en fonction de la variation des niveaux d'eau (Site SHE-2).....	78
Figure 2.9 Les limites d'inondation en fonction de la variation des débits (Site SHE-2)	79
Figure 3.1 Schéma explicatif de la validation croisée	108
Figure 3.2 Exemple de carte de l'erreur (type 1) pour le site WIN-2	109
Figure 3.3 Exemple de carte de l'erreur (type 2) pour le site WIN-2	110
Figure 3.4 MNE en trois dimensions réalisé au moyen de la méthode d'interpolation de l'inverse de la distance (IDW) pour le site WIN-2	111
Figure 3.5 MNE en trois dimensions réalisé au moyen de la méthode d'interpolation du krigeage universel (UK) pour le site WIN-2	112

Figure 3.6 MNE en trois dimensions réalisé au moyen de la méthode d'interpolation du réseau de triangles irréguliers (TIN) pour le site WIN-2.....	113
Figure 3.7 MNE en trois dimensions réalisé au moyen de la méthode d'interpolation du krigeage ordinaire (OK) pour le site WIN-2	114

CHAPITRE 1

RÉSUMÉ DU PROJET DE RECHERCHE

INTRODUCTION

Bien que les inondations¹ aient toujours été un sujet d'intérêt au Québec, ce sont les événements du délugé du Saguenay en 1996 qui ont entraîné une prise de conscience réelle de la vulnérabilité des digues et des barrages sur nos rivières et cours d'eau, et des dangers encourus par les populations riveraines face à de tels événements extrêmes. À la suite de ces événements hors du commun, plusieurs études ont été réalisées et le gouvernement du Québec à mis sur pied une importante Commission scientifique et technique sur la gestion des barrages (CSTGB), mieux connue sous le nom de la Commission Nicolet, laquelle devait analyser cet événement de façon détaillée et soumettre une série de recommandations au gouvernement afin d'éviter, à l'avenir, de telles situations catastrophiques. La Commission en est venue à la conclusion qu'il fallait se doter de normes plus strictes quant à la construction et à la gestion des barrages. De là est née la Loi sur la sécurité des barrages (CEHQ) qui instaure des mesures sur la construction, la modification et l'exploitation des barrages à forte contenance. La Commission Nicolet a également fait des recommandations sur l'aménagement du territoire au regard des zones inondables (Ministère du Conseil exécutif du Québec, 1997). Suite à ces travaux, un document d'orientation sur la gestion des zones inondables a été entériné en 1997. Puis en août 1998, le gouvernement québécois lançait le Programme de détermination des cotes de crues (PDCC) de récurrence de 20 et 100 ans.

Les recherches réalisées au Québec (et ailleurs dans le monde) jusqu'à présent touchent de nombreux aspects du phénomène des inondations. On peut mentionner la prévision du risque des inondations (Blin, 2001 ; Couture, 2001 ; Lavallée *et al.*, 2000 ; Secretan *et al.*, 2003), la protection face à celles-ci et les mesures structurales et non

¹ Définition d'une inondation : Submersion temporaire, naturelle ou artificielle, d'un espace terrestre. Cette submersion affecte généralement des terrains avoisinant un cours ou un plan d'eau à niveaux variables (par exemple lit majeur et parties basses d'une vallée, plaine côtière). Elle se produit lorsque de l'eau en excès ne peut être évacuée par les voies naturelles (lit mineur des cours d'eau) ou artificielles prévues à cet effet (drains ou réseaux d'assainissement).

Définition d'une crue : Phénomène hydrologique de base, c'est l'augmentation plus ou moins brutale du débit et par conséquent de la hauteur d'un cours d'eau. Les causes de l'augmentation du débit peuvent être diverses : précipitation atmosphérique, fonte des neiges, débâcle glaciaire, vidange de réservoir, etc. L'écoulement (superficiel) des eaux en se concentrant dans le réseau hydrographique produit la crue qui peut produire des inondations (dans des "zones inondables").

(Définitions provenant du dictionnaire français d'hydrologie du Comité National Français des Sciences hydrologiques / Commission de terminologie : <http://www.ciq.ensmp.fr/~hubert/glu/indexdic.htm>).

structurales de mitigation (Dutta *et al.*, 2006), les mesures d'urgence en cas d'inondation (Tucker, 2000), les inondations en lien avec les changements climatiques ou la déforestation (Saint-Laurent et Hähni, 2008), les inondations et la présence de barrages (Groupe conseil Genivar, 2001 ; Pitman, 2003) les inondations en milieu urbain ou agricole (Hollis, 1975 ; Saint-Laurent, 2008 ; Saint-Laurent et Hähni, 2008), les impacts environnementaux, économiques ou sociaux des inondations (Blin, 2001), et l'évolution chronologique de ce phénomène (Jones, 1998 ; Jones 2002 ; Saint-Laurent et Saucet, 2003). La cartographie des zones inondables et l'étendue des zones inondées sont aussi des aspects traités dans l'analyse des inondations.

Les inondations ont des conséquences parfois graves qui peuvent affecter les infrastructures urbaines existantes (ponts, routes, digues, etc.) et peuvent également modifier les milieux riverains naturels ou semi-naturels (érosion des berges, apports sédimentaires, etc.). Les inondations peuvent aussi causer des inconvénients majeurs aux populations riveraines, notamment par l'envahissement des eaux de débordement qui endommagent les résidences et qui s'accompagnent de coûts substantiels pour les propriétaires touchés. En milieu agricole, ce sont souvent les bâtiments de ferme qui sont touchés par les fortes crues ou les inondations. Dans certains cas, des inondations dites catastrophiques ont même entraîné des pertes nettes au niveau des infrastructures urbaines, des bâtiments agricoles et du bétail (cf. *Le Nouvelliste*, juin 1942, juin 1943 et avril 1982).

1.1 Problématique

Les rives sont depuis toujours des milieux convoités pour leurs attraits physiques, leur accessibilité et leurs ressources. Malgré les politiques gouvernementales qui visent la protection des rives et des écosystèmes riverains, ces milieux demeurent toujours l'objet de nombreuses pressions anthropiques. L'occupation progressive des plaines inondables au cours des dernières décennies fait de ces milieux des zones vulnérables pour les populations riveraines et les différentes infrastructures qui s'y trouvent. Dans le contexte où les inondations constituent un enjeu majeur pour les municipalités touchées par ce phénomène, il devient important d'analyser de façon détaillée les zones à risque dans les différents secteurs (zones urbaines, agricoles, etc.) soumis à

des inondations périodiques. Parallèlement, les zones naturelles ou semi-naturelles en bordure des rives, plus ou moins affectées par les activités anthropiques, sont aussi des zones vulnérables aux impacts des crues et des inondations, notamment par l'érosion des berges ou encore par les apports de sédiments contaminés provenant des rejets industriels. À titre d'exemple, il devient intéressant de délimiter l'étendue des nappes d'eau lors de crues importantes afin d'évaluer les apports sédimentaires le long des plaines inondables et mieux comprendre la dynamique fluviale associée aux inondations périodiques.

La cartographie des inondations et des plaines inondables se présente comme un moyen efficace de faire progresser nos connaissances face à ce phénomène naturel, tout en améliorant la sécurité des populations, et permet d'évaluer et de représenter l'étendue des zones submergées lors d'inondations. Sachant, par ailleurs, que la topographie influence la répartition et l'étendue des nappes d'eau sur les plaines d'inondation, la connaissance de la topographie riveraine s'avère essentielle afin d'identifier les zones plus à risques lors des débordements. De plus, peu d'études ont été réalisées jusqu'à présent sur la représentation des inondations à grande échelle, c'est-à-dire sur des territoires restreints mais avec une grande précision. La microtopographie peut, par contre, influencer les secteurs submergés lors d'inondations et par le fait même l'affectation des bâtiments et populations ainsi que la déposition des sédiments. La connaissance de la microtopographie des plaines inondables est donc d'une grande importance dans la cartographie de haute précision des zones affectées par les inondations.

La cartographie des inondations est d'une grande utilité pour les secteurs riverains périodiquement affectés par les inondations puisqu'elle peut aider à réduire la vulnérabilité face à ce phénomène ou du moins aider à l'amélioration de la préparation face à celui-ci. Partout dans le monde, certaines rivières et certains secteurs riverains sont davantage soumis aux inondations. Au Québec, les rivières Chaudière et Saint-François débordent fréquemment en raison, entre autre, de leur écoulement sud-nord. Plus particulièrement, le bassin de la rivière Saint-François situé au centre-sud du Québec est un des bassins versants du Québec le plus fréquemment soumis aux inondations et aux crues. En effet, on dénombre, par exemple, dans la municipalité de Sherbrooke, une inondation à tous les deux ans approximativement (Saint-Laurent et

Hähni, 2008). Les diverses municipalités et secteurs riverains de la Saint-François sont donc périodiquement soumis à des épisodes de débordements de la rivière pouvant entraîner des conséquences notamment sur les infrastructures urbaines. Cette fréquence des inondations dans le bassin de la rivière Saint-François peut expliquer les efforts mis en place afin de prédire et réduire les risques en lien avec ce phénomène naturel.

1.2 Revue de littérature

1.2.1 Cartographie des zones inondables

De nombreuses méthodes de cartographie des zones inondables ont été expérimentées. Plusieurs de ces méthodes utilisent la télédétection et/ou la photogrammétrie. L'utilisation de photographies aériennes pour l'observation de phénomènes géomorphologiques de l'environnement fluvial remonte à plusieurs années (Provencher et Dubois, 2007). La photogrammétrie assistée par ordinateur permet la création automatique de modèles numériques d'élévation (MNE), très utiles notamment en géomorphologie fluviale lorsque leur précision est suffisante (Chandler, 1999 ; Gilvear et Bryant, 2003). La photogrammétrie digitale offre de nombreux avantages par rapport aux méthodes d'enquête de terrain et de photogrammétrie traditionnelle. En effet, en plus de permettre la création automatique de modèles numériques d'élévation (MNE), la photogrammétrie digitale rend possible l'obtention d'un MNE d'une bonne précision en beaucoup moins de temps que la photogrammétrie traditionnelle. Elle permet également la couverture d'un plus grand territoire et l'utilisation d'un plus grand nombre de données (Chandler, 1999).

Bien que la photogrammétrie assistée par ordinateur soit une technique moderne et efficace, elle est encore peu utilisée par rapport à la télédétection. Ces deux techniques d'acquisition d'informations ont, en fait, des finalités et des limites bien différentes. La télédétection satellitaire est plus largement employée puisqu'elle permet l'utilisation d'une grande variété d'images provenant de différents satellites et ayant des caractéristiques particulières. De plus, l'utilisation d'images satellites permet la couverture d'un territoire encore plus étendu que les photographies aériennes.

Cependant, dépendamment du capteur et de la plate-forme utilisés, la résolution et la taille des objets détectables au sol peuvent être variables. L'utilisation par exemple de l'imagerie satellitaire est intéressante pour des rivières avec un large chenal, qui couvrent un grand territoire et qui ne nécessitent pas une résolution spatiale trop importante (Gilvear et Bryant, 2003). Toutefois, les nouveaux satellites permettent, de plus en plus, l'obtention d'images satellitaires ayant une fine résolution (1 mètre et moins). Un autre avantage non négligeable de la télédétection pour l'étude des zones inondables est que l'acquisition d'images satellitaires peut être beaucoup moins coûteuse que les enquêtes de terrain. Par contre, le traitement des données peut s'avérer plus long. La technique généralement utilisée lors de la cartographie des zones inondables au moyen de la télédétection consiste à observer sur les images satellites la limite de l'étendue d'eau lors d'une crue. En effet, il est possible d'acquérir des images pour des dates précises (Bates et De Roo, 2000). L'étendue de l'inondation est alors délimitée à partir d'une interprétation visuelle ou par une analyse spectrale. Il y a ensuite comparaison entre les limites des surfaces d'eau avant et pendant l'inondation. À titre d'exemple, Bates et De Roo (2000) ont réalisé une cartographie de la hauteur d'eau à chaque moment lors d'une inondation au moyen d'un modèle hydrologique. Les principales variables introduites dans ce modèle étaient l'hydrographe des débits, la pente et la largeur du chenal, la hauteur des berges (*bankful depth*), le niveau d'eau initial dans le chenal, la friction du chenal et de la plaine d'inondation, et un modèle numérique d'élévation (MNE). Afin de valider ce modèle, les résultats de celui-ci ont été comparés à des images SAR (*Synthetic Aperture Radar*) et à des photos aériennes. Le modèle de Bates et De Roo (2000) a ainsi permis de prédire correctement l'étendue des zones inondées jusqu'à 81,9 %, ce qui est une amélioration par rapport aux autres méthodes mentionnées par ces auteurs. Cependant, cette technique ne permet pas nécessairement de cartographier l'étendue maximale de la crue (Brivio et al., 2002). Pour pallier à cette limitation, Brivio et al. (2002) ont développé une nouvelle technique ajoutant les informations provenant de la topographie. Une matrice calculant la difficulté d'un cours d'eau à atteindre une certaine hauteur a ainsi été dérivée à partir de la topographie, mais également à partir des données d'utilisation du territoire, de la rugosité des surfaces et de la végétation. Cette matrice a ensuite été intégrée à l'analyse des images SAR, permettant ainsi de cartographier l'étendue maximale de la crue, malgré l'absence d'images de ce moment

précis. La validation de la technique a ensuite été réalisée par une comparaison avec une carte des zones inondées.

D'autres méthodes combinent des images satellitaires avec un modèle hydrologique. Les images satellitaires servent alors à délimiter l'étendue de l'inondation, tandis que le modèle hydrologique avec ses données de débit permet le calcul de la hauteur d'eau de la rivière. Par exemple, Overton (2005) s'est servi d'images Landsat TM (Bande 5) utilisant des longueurs d'onde de l'Infrarouge pour distinguer les zones mouillées des zones sèches lors d'inondations. Au total, 21 images ont été utilisées correspondant à différents débits. Une interpolation a par la suite été réalisée pour introduire des données entre les débits connus et ainsi préciser le modèle. Une relation entre la hauteur de la rivière et la zone d'inondation a alors pu être réalisée permettant de faire des simulations d'inondation.

Certains travaux se concentrent encore davantage sur le modèle hydrologique en intégrant des données encore plus spécifiques, comme par exemple, la pente du chenal, la présence de digues, de talus (remblais), de dépressions, les types de dépôts, la capacité d'infiltration de ceux-ci, et la couverture végétale (Bates et De Roo, 2000 ; De Roo *et al.*, 2000). Dans ces études, l'utilisation de la télédétection est mise de côté, bien qu'un modèle numérique d'élévation soit tout de même utilisé et qu'il y ait une validation des résultats à l'aide d'images SAR et de données de débit (De Roo *et al.*, 2000).

En télédétection, Townsend et Walsh (1998) ont démontré que l'utilisation de l'imagerie satellitaire radar (SAR) plutôt qu'optique (ex. Landsat) permettait d'obtenir de meilleurs résultats dans la délimitation des zones inondées lors de périodes de crue en milieu couvert. En effet, le SAR utilise la portion des micro-ondes du spectre électromagnétique tandis que les capteurs optiques utilisent les longueurs d'onde du visible et de l'Infrarouge. Les longueurs d'onde des micro-ondes permettent une plus grande pénétration de la couverture forestière, et donc une «visibilité» accrue des étendues d'eau en milieu forestier. Townsend et Walsh (1998) ont créé une approche permettant de modéliser le potentiel d'inondation d'une plaine inondable. Pour représenter la topographie, un modèle numérique d'élévation a été créé à partir de courbes de niveau d'intervalle de 5 pieds (1,52 mètres) extraites de cartes

topographiques ainsi qu'à partir de points d'élévation et de l'hydrographie. Le potentiel d'inondation a ainsi pu être calculé en chaque endroit de la plaine en soustrayant le niveau d'inondation (hauteur d'eau) à l'élévation provenant du MNE, les données négatives indiquant les endroits inondés. Des surfaces de potentiel d'inondation ont ainsi pu être créées pour chaque récurrence d'inondation (10-50 et 100-500 ans).

Enfin, au niveau de la télédétection, une dernière technique d'acquisition de données est de plus en plus utilisée. Celle-ci est relativement récente et permet la cueillette de données sur la topographie. Cette technique est celle du laser aéroporté connu sous le nom de LiDAR (*Light Detection And Ranging*). Cette technique a été utilisée par Marks et Bates (2000) pour représenter la topographie lors de travaux sur la prédition de l'étendue d'une inondation. Le principal avantage du LiDAR est sa précision. En effet, il fournit une précision horizontale de plus ou moins 5 cm (positionnement) avec une résolution spatiale de 3 m, et une précision verticale de plus ou moins 15 cm (la précision varie dépendamment des sources). Marks et Bates (2000) ont combiné un MNE fait à partir des données topographiques du LiDAR à un modèle hydrologique à deux dimensions de manière à créer une carte des zones inondables. Puis, ils ont comparé ce modèle à la méthode traditionnelle de création d'un MNE à partir des courbes de niveau, aussi couplé à un modèle hydrologique. Les résultats de la méthode du LiDAR sont concluants et permettent un plus grand usage du modèle hydrologique à deux dimensions, car cette méthode résout le problème du manque de données topographiques. Par contre, jusqu'à ce jour, un territoire assez restreint a été échantillonné au moyen du LiDAR et l'acquisition de données topographiques au laser implique d'importants coûts. De plus, il reste encore quelques améliorations à apporter à la technique surtout en lien avec la végétation qui peut parfois créer certaines aberrations dans les données d'élévation.

Il existe aussi d'autres approches que celle de la télédétection pour cartographier les zones inondables. Certaines s'appuient sur l'utilisation des courbes de niveau qui servent de données de base à la création de cartes de zones inondables. Ces courbes de niveau sont utilisées pour réaliser des modèles numériques d'élévation représentant la topographie de la zone d'étude (Mark et Bates, 2000 ; Wise, 2000). Enfin, Tourolle (2003) utilise des données x, y, z provenant de levés topographiques qui sont ensuite interpolées avec la méthode du krigeage pour donner un modèle numérique

d'élévation. Dans ce cas, le MNE n'est pas utilisé pour des plaines alluviales, mais plutôt pour des zones côtières de manière à définir lesquelles sont à risque par rapport au niveau marin extrême. D'autres études utilisent, quant à elles, un ensemble de données différentes pour évaluer la topographie de la zone d'étude. À titre d'exemple, Secretan *et al.* (2003) ont utilisé des données telles que des semis de points, des lignes de rupture de pente, des orthophotographies et des données d'arpentage, et ce afin de représenter le plus fidèlement possible le relief des plaines inondables. Afin de calculer la profondeur de submersion lors d'événements d'inondation, un maillage hydrodynamique a été réalisé. Ce maillage intègre différentes couches d'informations, telles que la topographie, le substrat, le frottement, etc., qui permettent la réalisation de la simulation hydrologique. Une relation niveau-débit a également été estimée et a été utilisée pour calculer le débit lors d'un événement en particulier. Ainsi, le niveau d'eau a été lié au régime hydrologique et des cartes de profondeur de submersion ont été réalisées pour trois événements d'inondation. Enfin, Blin (2001) a utilisé des données provenant de la photogrammétrie, d'un laser, d'un DGPS et d'une station totale. Ces différentes données ont servi à la construction d'un modèle numérique d'élévation. Des simulations hydrodynamiques ont également été réalisées de manière à déterminer les niveaux d'eau pour des crues de référence. Ainsi, en soustrayant l'altitude provenant du MNE aux niveaux d'eau, une hauteur de submersion a pu être calculée. Cette hauteur de submersion permet d'identifier les bâtiments affectés par la crue des eaux.

En regard de ces différentes techniques de cartographie, on constate que des données diverses peuvent être utilisées pour la réalisation des cartes des zones inondables. Ces données sont de précision variable et elles influent sur la précision de la cartographie elle-même. Ainsi, il faut choisir les données de base en fonction de la précision désirée, mais également en fonction de l'étendue du territoire étudié. Les méthodes utilisant la télédétection, par exemple, permettent d'étudier un grande territoire, cependant la résolution des images est généralement au-delà du mètre. En effet, l'acquisition de données peut être coûteuse et/ou de longue durée, et il est donc important de s'assurer de la précision idéale au projet, car généralement plus les données sont précises, plus elles sont longues et dispendieuses à obtenir. En fin de compte, différentes approches existent permettant de simuler les inondations, cependant le choix de l'approche

dépend notamment des objectifs visés et des superficies couvertes (De Roo *et al.*, 2000).

1.2.2 SIG et modèles numériques d'élévation (MNE)

Les systèmes d'information géographique (SIG) s'avèrent d'excellents outils pour permettre l'analyse et l'affichage d'informations spatiales (Pitman, 2003) et parallèlement, réduire le temps de travail. Les systèmes d'information géographique sont d'ailleurs souvent utilisés soit, pour créer un modèle numérique d'élévation (MNE) ou pour intégrer des variables à un modèle hydrologique par exemple. Plus précisément, leur apport dans la création de MNE devient presque incontournable. Rappelons qu'un modèle numérique d'élévation peut se définir comme une «représentation de la topographie de la Terre dans un format numérique, c'est-à-dire au moyen de coordonnées et de descriptions numériques de l'altitude» (Ressources naturelles Canada, 2005). Le relief est un facteur déterminant pour de nombreux phénomènes et processus environnementaux. De manière à représenter le relief et ainsi mieux comprendre les phénomènes et processus naturels qui nous entourent, les représentations de la topographie sous forme de modèles numériques d'élévation (MNE) sont, depuis le milieu des années 1980, de plus en plus utilisées. La réalisation de MNE se fait maintenant presque en tout temps à l'aide d'un système d'information géographique (SIG). En effet, les SIG permettent la création rapide des MNE puisqu'ils intègrent un grand nombre de données. Les MNE peuvent être utilisés, entre autres, pour la planification de routes, pour des applications militaires, pour la modélisation hydrologique, pour la cartographie des inondations, etc. Avec l'avancement des recherches sur les MNE, la qualité de la représentation topographique réalisée est devenue une préoccupation importante. Il ne suffit pas simplement de représenter la topographie, mais il faut que cette représentation soit le plus fidèle possible à la réalité de terrain, et cette correspondance entre le terrain et la représentation réalisée doit également pouvoir être évaluée. La réalisation d'un MNE peut être faite à partir de nombreux logiciels et nécessite le choix et l'utilisation de différentes variables. Il devient donc essentiel pour les chercheurs de comparer les différents choix qui s'offrent à eux. De plus, la qualité des MNE repose sur de nombreux facteurs qu'il est important de connaître et de maîtriser avant la réalisation d'une matrice topographique.

1.2.2.1 Les facteurs influençant la qualité des MNE

Afin d'obtenir des valeurs d'élévation pour tous les endroits de la surface analysée, il faut réaliser une interpolation des valeurs connues. L'interpolation à l'aide d'un SIG permet la création d'une surface continue à partir de valeurs ponctuelles échantillonnées. En effet, la cueillette de données en tout point sur un territoire est difficile et dispendieuse, c'est pourquoi l'interpolation est utile car elle fournit des valeurs en des endroits non échantillonnés (McCoy et Johnston, 2001). L'utilisation de cette technique est possible car les éléments distribués dans l'espace sont aussi corrélés spatialement. Il existe différents types d'interpolations ayant chacune leurs particularités et donc, plus appropriées pour certaines situations et types de données. L'inverse de la distance (*Inverse Distance Weighting* - IDW), le spline, le krigage (*Kriging*) et les réseaux de triangles irréguliers ou *Triangulated Irregular Network* (TIN) sont des types d'interpolation souvent utilisés en géomatique et pour la représentation du relief (Chaplot *et al.*, 2006).

La méthode de l'inverse de la distance (IDW) s'appuie sur un principe de base en géographie selon lequel les éléments rapprochés les uns des autres se ressemblent davantage. C'est une méthode déterministe de moyenne pondérée selon laquelle les valeurs sont estimées en effectuant la moyenne des valeurs des points échantillonnés dans le voisinage. Ainsi, plus un point est près de la valeur à estimer, plus il a d'influence ou de poids dans le processus d'interpolation (McCoy et Johnston, 2001). Toutefois, cette méthode peut présenter des inconvénients, tels que la création «d'œil-de-bœuf», c'est-à-dire de cercles autour de certaines valeurs, et également la limitation des valeurs interpolées à l'intervalle des valeurs échantillonnées (Arnaud et Emery, 2000).

La fonction spline, quant à elle, estime les valeurs en utilisant une fonction mathématique qui minimise la courbure d'ensemble de la surface donnant une surface douce passant exactement, ou très proches, des points échantillonnés (McCoy et Johnston, 2001). Les splines d'interpolation passent exactement par les points échantillonnés, tandis que les splines de lissage passent à proximité de ceux-ci. Avec cette méthode, par contre, les valeurs estimées peuvent être inférieures ou supérieures aux valeurs échantillonnées (Arnaud et Emery, 2000).

Pour ce qui est du krigage, qualifié de méthode géostatistique, il permet de créer une surface de prédiction, en plus de fournir des mesures sur la précision des prédictions. Le krigage assigne un poids aux valeurs mesurées des alentours pour produire une prédiction des endroits non mesurés. Cependant, le poids n'est pas seulement déterminé par la distance entre les points connus et les points prédits, mais également à partir de l'arrangement spatial de l'ensemble des points échantillonnés. En plus de fournir des prédictions pour les endroits sans données, le krigage permet également d'estimer la dépendance statistique des variables connues à l'aide d'un variogramme. Le variogramme permet la construction d'une estimation locale basée sur la géométrie des données et sur les caractéristiques de la régionalisation (Arnaud et Emery, 2000).

Enfin, une autre méthode d'interpolation mentionnée précédemment est celle du réseau de triangles irréguliers ou *Triangulated Irregular Network* (TIN). Elle consiste à subdiviser l'espace géographique en triangles et puis à interpoler à chaque endroit, par une combinaison linéaire pondérée, des valeurs voisines (Arnaud et Emery, 2000). Le TIN représente une surface composée d'un ensemble de triangles contigus mais non chevauchants. L'avantage principal des TIN est qu'ils incorporent les échantillons originaux des points, c'est-à-dire que les points échantillonnés gardent leur position dans le modèle, permettant ainsi de préserver la précision des données d'entrée. De plus, les TIN sont efficaces dans l'interpolation de données d'élévation distribuées irrégulièrement dans l'espace (Pedrini, 2001). Cependant, cette méthode d'interpolation est moins efficace lorsqu'il y a peu de données échantillonnées. Le TIN est la méthode d'interpolation la plus souvent utilisée (Bates et De Roo, 2000 ; Dempsey et al., 2000 ; Lang et Erickson, 2003 ; Marks et Bates, 2000 ; Secretan et al., 2003 ; Wise, 2000).

À la lumière des différentes comparaisons effectuées entre les méthodes d'interpolation, aucune ne surclasse systématiquement les autres. Elles ont chacune leurs avantages dépendamment du type de données, de leur distribution, de l'échelle du phénomène étudié, des caractéristiques du terrain, etc. Dans bien des cas, il est préférable de tester les différentes méthodes avant de faire un choix définitif. Toutefois, la réalisation d'un modèle numérique d'élévation ne dépend pas seulement de la méthode d'interpolation utilisée, comme il pourrait le sembler à première vue. Effectivement, comme le mentionne MacEachren et Davidson (1987), l'exactitude des valeurs estimées dépend de cinq facteurs inter-reliés. Le premier facteur est la

précision des valeurs mesurées. Il existe différentes méthodes et instruments servant à obtenir de l'information topographique comme par exemple les courbes de niveau, les photos aériennes, les images satellites, le LIDAR, l'IFSAR, le GPS, la station totale, etc. Ces différentes méthodes et instruments permettent l'obtention d'informations topographiques de précisions variables. La station totale, par exemple, fournit des données d'une précision au millimètre, le LiDAR, quant à lui, permet l'obtention de données d'élévation d'une précision d'environ 15 cm, tandis que l'utilisation de courbes de niveau implique généralement une précision au-delà du mètre. La précision des données de base aura évidemment une incidence sur la précision des valeurs estimées. Si la précision des valeurs de base est de 15 cm, il sera impossible de fournir des valeurs estimées avec une précision supérieure à 15 cm. Par ailleurs, l'étendue du territoire à l'étude varie également en fonction des méthodes de cueillette de données, certains instruments fournissent des données d'une grande précision, cependant le territoire qu'elles couvrent est beaucoup plus restreint.

Le second facteur influençant l'exactitude d'un MNE est «l'intensité» des données ou la taille de l'échantillon. Pour MacEachren et Davidson (1987), l'intensité des données est le facteur ayant la plus grande importance sur la précision des estimations. La taille de l'échantillon serait plus importante dans l'estimation de valeurs intermédiaires que la localisation des points échantillonnés et les méthodes d'interpolation. Effectivement, la précision des valeurs estimées peut varier avec l'intensité de l'échantillonnage puisqu'elle détermine la proximité des points échantillonnés. La précision des valeurs estimées est donc inversement reliée à la distance entre les points échantillonnés et positivement reliée à la densité des données. Comme le démontre MacEachren et Davidson (1987), la précision des estimations augmente à un taux décroissant avec l'augmentation de la taille de l'échantillon.

Le troisième facteur est celui de la localisation des données échantillonnées. Dépendamment de la méthode et de l'instrument utilisés lors de la collecte des données, le patron d'échantillonnage peut être différent. Il existe, en effet, différents modèles de collecte de données d'élévation. Les données peuvent être échantillonnées de façon totalement aléatoire (indépendant), le long de transects, ou bien de façon non-indépendante en prenant des points aux endroits particuliers du territoire comme une rupture de pente, les creux ou les sommets. Ces différents modèles d'échantillonnage

font en sorte de distribuer différemment les points échantillonnés, ce qui peut avoir un effet sur les estimations. Plusieurs études ont été réalisées suivant ces modèles (Ayeni, 1982 ; Morrison, 1971 ; Peucker, 1979 ; Shepard, 1984) et aucun consensus se dégage quant à l'utilisation d'un échantillon indépendant ou spécifique (non-indépendant).

Le quatrième facteur concerne la variabilité de la surface représentée par l'auto-corrélation spatiale et la magnitude de changement de la surface par unité de distance. En fait, les différents terrains ont une influence sur l'estimation des données en raison de la variation de leur surface topographique. Par exemple, en certains endroits, les variations topographiques peuvent être importantes sur de courtes distances, tandis qu'ailleurs les variations sont minimes. Ces variations peuvent influencer largement la précision des valeurs estimées. Par conséquent, il est très difficile d'établir quelle est la méthode d'interpolation la plus appropriée. Dans plusieurs travaux, on compare les effets de différents terrains par rapport aux méthodes d'interpolation. Généralement, l'incertitude tend à se regrouper dans les endroits accidentés où l'élévation change rapidement (Weng, 2002). C'est pourquoi les terrains accidentés nécessitent habituellement un nombre plus élevé de points d'échantillonnage pour bien représenter ces variations topographiques.

Enfin, le cinquième facteur influençant la précision des MNE consiste en la méthode d'interpolation utilisée. Il existe un grand nombre d'interpolations différentes. Les plus fréquemment utilisées tel que décrit en 1.2.2.1 sont : le krigeage, l'inverse de la distance, le spline, l'interpolation radiale, et le réseau de triangles irréguliers. Comme vu précédemment, ces méthodes d'interpolation sont basées sur des principes différents et par conséquent, elles produisent des surfaces topographiques distinctes. Dans plusieurs études, on compare différentes méthodes d'interpolation de manière à identifier la plus appropriée en fonction de la taille de l'échantillon, du type de terrain, de l'échelle, etc. (Anderson *et al.*, 2005 ; Chaplot *et al.*, 2006 ; Desmet, 1997 ; Lloyd et Atkinson, 2002 ; Weber et Englund, 1994). Bien que selon certaines études, les méthodes d'interpolation ne soient pas le facteur le plus influant sur l'exactitude des MNE, il n'en demeure pas moins qu'il est possible de faire un choix judicieux de manière à diminuer l'erreur d'un MNE et ainsi en améliorer sa qualité.

1.2.2.2 L'évaluation de la qualité des MNE

L'évaluation de la qualité des MNE est un aspect très important dans la réalisation d'un MNE. Cet aspect ne doit pas être négligé car il ne suffit pas seulement de représenter la topographie, mais cette représentation doit être aussi fidèle que possible à la réalité de terrain. Il existe plusieurs manières de valider ou d'évaluer la qualité des MNE. L'incertitude des MNE est souvent mesurée, en premier lieu, à l'aide de mesures statistiques. En effet, pour quantifier l'incertitude, il est nécessaire de comparer les élévations originales avec les élévations provenant de la surface topographique réalisée. On mesure donc l'écart entre les deux ensembles de données d'élévation. La mesure la plus couramment utilisée pour quantifier cet écart est le RMSE (*Root Mean Square Error*) ou en français «la racine carrée de l'erreur moyenne au carré» (Anderson *et al.*, 2005 ; Brivio *et al.*, 2002 ; Chaplot *et al.*, 2006 ; Desmet, 1997 ; Fisher, 1998 ; Weng, 2002 ; Wise, 2000). L'erreur moyenne (ME pour *Mean Error*) est moins utilisée car elle additionne des valeurs positives (sous-estimation) et des valeurs négatives (sur-estimation) ce qui ne permet pas d'observer le comportement réel d'une méthode d'interpolation (Fisher, 1998 ; Lloyd et Atkinson, 2002 ; MacEachren et Davidson, 1987). Le RMSE annule l'effet des sur et sous-estimations, en raison de la mise au carré et de la racine carrée, c'est pourquoi il est grandement utilisé. Weber et Englund (1994) utilisent, quant à eux, l'erreur moyenne au carré, cependant cette dernière semble également moins appropriée puisqu'elle ne permet pas de connaître l'erreur réelle en mètres du MNE à cause de la mise au carré des erreurs réelles. Weber et Englund (1994) améliorent toutefois la comparaison de l'erreur entre différents types de terrain et différentes méthodes d'interpolation, en normalisant l'erreur moyenne au carré, c'est-à-dire en divisant l'erreur moyenne au carré de chaque méthode d'interpolation par la grande moyenne de l'ensemble des erreurs. Cela permet une comparaison plus juste de la performance relative des méthodes d'interpolation.

Par contre, comme le mentionne Weng (2002), le RMSE n'est pas suffisant pour quantifier l'incertitude des MNE puisque celui-ci ne permet pas d'évaluer la distribution spatiale de l'erreur. Pour pallier à ce manque, Weng (2002) suggère l'utilisation de méthodes alternatives pour compléter l'évaluation de la qualité des MNE telles que des indices d'auto-corrélation spatiales et des variogrammes, mais surtout un élément fort important, la carte de précision. Les cartes de précision ou cartes de l'erreur permettent

de visualiser les erreurs les plus importantes sur les territoires à l'étude (Weng, 2002). L'erreur peut ainsi être évaluée spatialement. Il résulte des cartes de précision que l'incertitude se concentre davantage dans les zones accidentées où l'élévation change rapidement. MacEachren et Davidson (1987) utilisent également le même genre de cartes pour identifier les zones avec de plus grandes erreurs.

Une autre méthode d'évaluation utilisée par certains auteurs est la validation croisée (Anderson *et al.*, 2005 ; Chaplot *et al.*, 2006 ; Desmet, 1997 ; Lloyd et Atkinson, 2002 ;). La validation croisée consiste à enlever certains points de l'ensemble de données d'élévation avant de réaliser l'interpolation puis ensuite, de comparer l'élévation de ces points à l'élévation de la surface topographique du MNE. Cela permet de vérifier si la surface topographique interpolée se rapproche de la réalité du terrain représentée par les points enlevés de la base de données. La validation croisée peut être utilisée en combinaison avec les diverses mesures statistiques mentionnées précédemment.

Enfin, Desmet (1997) utilise une technique très originale d'évaluation de la qualité des MNE. Comme généralement les MNE servent de base à l'étude de phénomènes naturels, il utilise des analyses de terrain pour vérifier la performance de différentes méthodes d'interpolation. Chaplot *et al.* (2006) mentionnent justement que les MNE devraient être examinés au moyen de l'évaluation des dérivées des surfaces topographiques, tels que l'angle de la pente, la courbure de la pente, le réseau de drainage, etc. Les analyses de terrain utilisées par Desmet (1997) sont au nombre de cinq : le gradient de la pente, l'orientation de la pente (ou direction de l'exposition), la courbure du profil, la zone de drainage supérieure et le modèle dynamique d'érosion. Pour chacune de ces données dérivées des MNE, Desmet (1997) compare la performance de différentes méthodes d'interpolation. Si le MNE représente bien les différentes analyses de terrain c'est que la méthode d'interpolation utilisée est appropriée et donne des résultats convenables. Le gradient de la pente, son orientation et la courbure du profil sont de bons indicateurs de la performance des méthodes d'interpolation. Cependant, l'utilisation d'un modèle dynamique d'érosion est, dans ce cas-ci, un peu exagérée. L'utilisation des dérivées des MNE permet à Desmet (1997) de conclure que les interpolations du plus proche voisin et du krigage ne sont pas appropriées pour les zones très planes, car elles produisent des escaliers, ce qui ne

représente pas la réalité de terrain et résulte en une accumulation de l'écoulement le long des escaliers.

1.3 Objectifs de recherche

L'objectif général du présent projet de recherche vise à élaborer et à appliquer un modèle de représentation des niveaux d'inondation sur les plaines inondables à partir d'un système d'information géographique (SIG). L'application de cette méthode se fera le long du tronçon fluvial de la rivière Saint-François situé entre les municipalités de Sherbrooke et Drummondville, lequel tronçon est périodiquement affecté par les inondations (Saint-Laurent et al., 2001 ; Saint-Laurent et Saucet, 2003). Cet objectif repose sur la création d'une base de données sur la topographie de certains secteurs riverains de la rivière Saint-François et sur la représentation des niveaux d'eau de la rivière en fonction de l'élévation et de la topographie des différents terrains localisés soit en milieu urbain, agricole ou le long des plaines alluviales.

Le premier objectif spécifique (1) vise à représenter la microtopographie des plaines inondables. Il repose sur la réalisation de modèles numériques d'élévation (MNE) de haute précision lesquels dépendent en grande partie des données d'élévation utilisées et de l'utilisation de méthodes d'interpolation appropriées. Cela nécessite donc l'obtention de données topographiques de haute précision provenant de relevés systématiques sur le terrain. Puisque les données topographiques des bases de données numériques disponibles sont d'une précision bien en-dessous de ce qui est nécessaire dans l'élaboration de la méthode, telle que proposée dans cette étude, il a été nécessaire d'établir un plan d'échantillonnage et de sélectionner différents sites afin de permettre la cueillette de données précises de localisation et d'élévation topographique lors des travaux de terrain. De plus, les données d'élévation doivent être interpolées afin de transformer les données ponctuelles en une surface topographique (le modèle numérique d'élévation). Il existe un grand nombre de méthodes d'interpolation (voir sections précédentes), lesquelles produisent toutes des surfaces topographiques différentes. Ce sous-objectif implique donc également le test et la validation de la qualité de ces méthodes d'interpolation afin d'identifier la meilleure

méthode en fonction des données d'élévation utilisées et de la microtopographie des plaines inondables.

Le second objectif spécifique (2) vise à cartographier les secteurs riverains affectés par les inondations. Il implique deux types de milieux différents soient les zones urbaines et les zones de plaines alluviales en milieu naturel et semi-naturel. Pour les zones urbaines, cet objectif vise à délimiter pour différents niveaux, les routes, les bâtiments publics ou industriels, les résidences et autres infrastructures qui sont localisés dans les zones inondables. Le système de représentation couplé aux informations sur ces infrastructures permettra notamment d'identifier les secteurs riverains les plus touchés au moment des débordements de la rivière. Il devient donc possible d'identifier de façon précise les niveaux critiques au-delà desquels les constructions et les populations riveraines occupent des zones à risques élevés d'inondation. Pour les zones de plaine alluviale, cet objectif implique également une cartographie précise des zones inondées et de leur topographie. Il s'agit de délimiter précisément les zones de plaine alluviale qui seront envahies par les eaux de la rivière lors des fortes crues et des inondations majeures. Le modèle permettra d'obtenir des données quantitatives et visuelles de l'étendue des nappes d'eau pour différents niveaux de la rivière, ce qui peut être d'un grand intérêt pour les municipalités dans la gestion et l'aménagement du territoire en zone inondable ou à risques.

1.4 Méthodologie

La réalisation du modèle de représentation des niveaux d'inondation comporte quatre étapes principales : (1) la réalisation des travaux de terrain de manière à obtenir des données ponctuelles d'élévation; (2) la création des modèles numériques d'élévation pour transformer les données ponctuelles en surfaces topographiques; (3) l'utilisation de données hydrologiques afin de représenter les niveaux d'eau de la rivière lors des débordements; (4) et enfin l'assemblage des informations topographiques, hydrologiques et des infrastructures de manière à réaliser une cartographie des plaines inondables à l'étude et des inondations sur ces surfaces inondables (Figure 1.1).

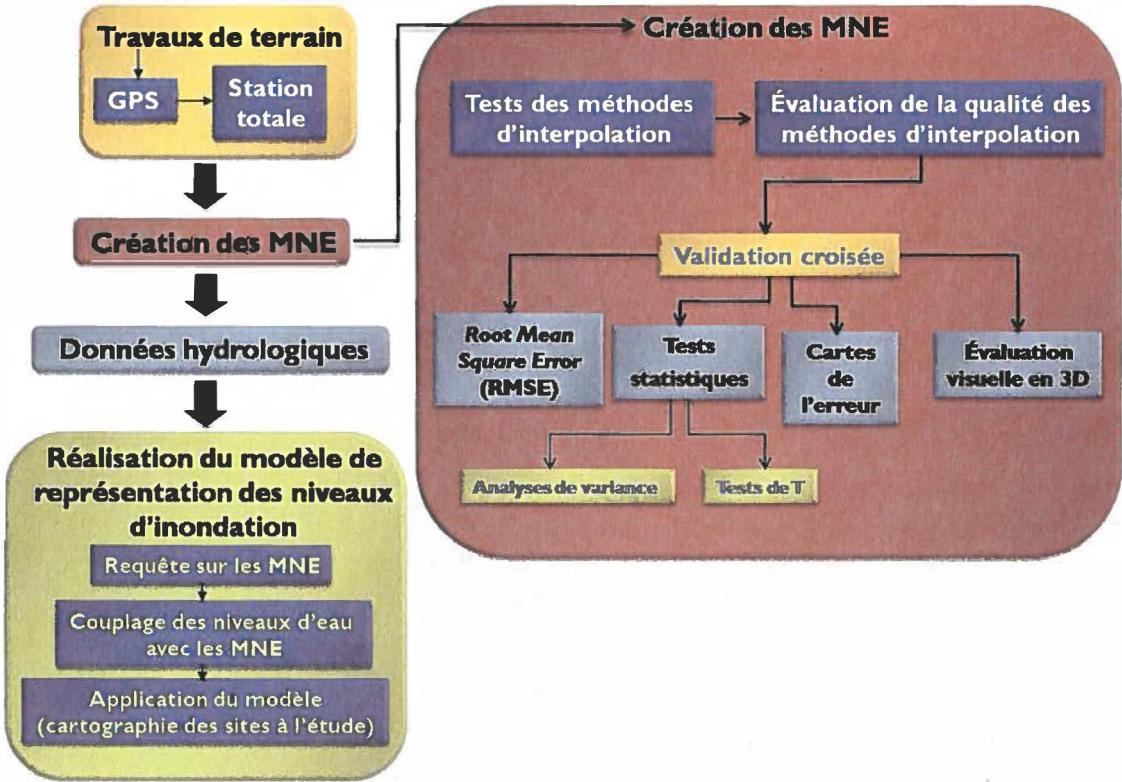


Figure 1.1
Schéma méthodologique du projet

1.4.1 Sites à l'étude

Le secteur à l'étude se situe dans le bassin versant de la rivière Saint-François, dans le centre-sud du Québec. Les sites à l'étude ont été sélectionnés à partir des données sur les inondations recensées par divers documents (Saint-Laurent *et al.*, 2001). Le tronçon fluvial entre Sherbrooke et Drummondville comporte la section la plus intéressante considérant son affectation périodique par les crues printanières et les inondations. Toutefois, l'étendue de ce tronçon d'environ 90 km de long était impossible à couvrir dans son ensemble. Une sélection de sites précis a donc été réalisée afin de pallier à cette difficulté. Ainsi, les secteurs les plus fréquemment inondés, tant pour les zones urbaines que pour les zones agricoles ou naturelles et semi-naturelles, ont été identifiés et sélectionnés à l'aide de nombreux documents tels que les cartes du risque d'inondation d'Environnement Canada et du Ministère de l'environnement du Québec (1982), les indications cartographiques de Mme Nicole Fugère, conseillère en sécurité

civile à la Direction régionale de la sécurité civile de la Montérégie et de l'Estrie (ministère de la Sécurité publique) (Nicole Fugère comm. pers.), et le tableau chronologique des inondations (Saint-Laurent *et al.*, 2001 ; Saint-Laurent et Saucet, 2003) indiquant les dates et les secteurs affectés par les inondations dans le bassin versant de la rivière Saint-François depuis 1900. Certains autres critères comme l'accessibilité et la propriété du terrain ont été pris en compte. Les sites d'étude en milieu naturel et semi-naturel ont également été sélectionnés en fonction des travaux cités précédemment.

Neuf sites ont ainsi été identifiés pour l'étude (Tableau 1.1). De ceux-ci, quatre ont été sélectionnés en zone urbaine et cinq en milieux naturels ou semi-naturels (boisés, terres agricoles, terrains en friche, etc.). La zone de récurrence de 20-100 ans des cartes du risque d'inondation a servi de limite spatiale pour chacun des sites, c'est-à-dire que les relevés topographiques ont été réalisés jusqu'à la limite supérieure de récurrence de 100 ans. La largeur des différents sites varie donc entre 75 et 250 mètres (transversale à la rive), tandis que la profondeur atteint entre 20 et 75 mètres (Tableau 1.2).

Tableau 1.1
Les sites à l'étude et leur localisation

Milieu	Site	Municipalité	Coordonnées x MTM F7	Coordonnées y MTM F7
Zones urbaines	SHE-1	Sherbrooke	196319	5029883
	SHE-2	Sherbrooke	196132	5030432
	SHE-3	Sherbrooke	195656	5031051
	RIC-2	Richmond	176895	5058521
Autres milieux (naturels, semi- naturels)	BRO-1	Bromptonville	192254	5038513
	WIN-1	Windsor	186640	5049967
	WIN-2	Windsor	183822	5052201
	RIC-1	Richmond (Melbourne)	178229	5056218
	SNI-1	Saint-Nicéphore	163673	5078937

1.4.2 Travaux de terrain

L'acquisition de données d'élévation de terrain est possible à partir de différentes techniques telles que la photogrammétrie, la télédétection et les courbes de niveau. Considérant le territoire à couvrir (micro-échelle) et la précision verticale nécessaire afin de pouvoir identifier des formes topographiques de petites dimensions, les méthodes citées précédemment ne pouvaient convenir au présent projet de recherche qui cherchait à définir une méthode cartographique beaucoup plus précise. La méthode par photogrammétrie à grande échelle aurait pu être envisagée, mais en raison des coûts élevés de cette méthode et de la superficie des secteurs couverts dans ce projet, celle-ci n'a pas été considérée. Correspondant davantage aux besoins de l'étude, les relevés topographiques au moyen d'un GPS et d'une station totale ont été préférés pour l'acquisition de l'information topographique puisque la précision verticale obtenue par ces outils est de l'ordre du centimètre.

La réalisation de relevés topographiques permet d'intégrer de l'information ponctuelle sur la topographie de certaines zones. L'accomplissement de levés de terrain au moyen d'une station totale fournit de l'information sur la topographie, bien qu'elle ne permette pas de situer spatialement avec une projection les secteurs échantillonnés. C'est pourquoi un GPS a conjointement été utilisé pour fournir des coordonnées MTM précises aux points échantillonnés à la station totale. La précision des GPS s'est grandement améliorée ces dernières années. Malgré cela, la plupart des GPS commerciaux ont une exactitude qui se situe autour de quelques mètres, ce qui était insuffisant pour les présents travaux. Afin de bien discerner la microtopographie des plaines inondables, la précision des instruments devait être beaucoup plus fine. L'obtention d'une précision autour de quelques centimètres nécessitait l'utilisation d'un GPS de haute précision. Les services d'un arpenteur-géomètre ont donc été utilisés pour réaliser les relevés GPS pour chacun des neuf sites à l'étude. Le GPS étant très sensible à la présence de la canopée des arbres qui nuit souvent à la réception des signaux provenant des satellites, cette étape a été réalisée vers la fin de l'automne, une fois le feuillage tombé. Le GPS utilisé (Trimble 5700 et 5800 en mode RTK) fonctionne à partir des points géodésiques sur lesquels on installe la base de l'appareil (station de référence). Il a donc fallu, en premier lieu, repérer les points géodésiques autour des sites à l'étude. Une fois la base installée sur le point géodésique, la partie mobile du

GPS pouvait être déplacée et les points relevés. Deux points GPS par site ont été relevés puisque l'utilisation adéquate de la station totale nécessite un premier point pour la positionner et un second pour l'orienter dans l'espace. Un GPS de ce type permet d'obtenir une précision allant de quelques millimètres à 2 centimètres, dépendamment des obstacles, de la distance entre la base et le mobile et de la réception des satellites.

La station totale utilisée pour les relevés de terrain est le modèle TCR 705 de Leica qui permet d'obtenir une précision horizontale et verticale de quelques millimètres. Les relevés à la station totale ont été réalisés le long de transects perpendiculaires à la rivière à dix mètres d'intervalle approximativement. On dénombre ainsi approximativement une quinzaine de transects par site. Le modèle d'échantillonnage utilisé suivait les ruptures de pente de manière à obtenir le plus fidèlement possible toutes les modifications de la microtopographie. Un point d'élévation a donc été relevé à chaque rupture de pente le long des transects (Tableau 1.2).

Toutefois, il est à noter que pour le site RIC-1, aucun point géodésique n'a été trouvé à proximité. Pour pallier à cette situation, une méthode alternative a été utilisée afin d'obtenir les données d'élévation. Ainsi, un point altitudinal situé près de notre site a été utilisé afin de contrer l'absence de point géodésique. Un point altitudinal ressemble à un point géodésique, cependant il ne possède pas de coordonnées géographiques précises mais simplement une élévation. Afin de localiser le point altitudinal, un GPS MAP 76S de Garmin qui donne une précision horizontale d'environ 3 mètres a été utilisé. Plusieurs points ont été relevés au GPS autour du point altitudinal et une triangulation a été réalisée par la suite pour faire la mise en station de la station totale sur le point altitudinal. La triangulation a été réalisée afin d'améliorer la précision horizontale obtenue par l'appareil. Lors de la mise en station, l'élévation du point altitudinal a été utilisée permettant ainsi d'obtenir une précision verticale du même ordre que lors de l'utilisation des points géodésiques. Il est donc possible que la précision horizontale pour ce site soit légèrement plus faible que pour les autres sites, par contre, la précision verticale est comparable à celle des autres sites vue l'utilisation du point altitudinal.

Tableau 1.2
Description des sites à l'étude

Site	Longueur (transversale à la rive)	Superficie du site	Nombre de transects	Nombre de points échantillonnés à la station totale
SNI-1	216 m	15 462 m ²	16	185
RIC-1	175 m	15 381 m ²	17	199
RIC-2	217 m	27 602 m ²	16	260
WIN-1	76 m	3 109 m ²	8	131
WIN-2	129 m	5 382 m ²	16	139
BRO-1	120 m	10 506 m ²	15	212
SHE-1	108 m	24 677 m ²	10	247
SHE-2	164 m	30 101 m ²	16	323
SHE-3	250 m	44 221 m ²	21	276

1.4.3 Modèles numériques d'élévation (MNE)

1.4.3.1 Test des méthodes d'interpolation

La réalisation de levés topographiques permet d'obtenir des données ponctuelles d'altitude. Toutefois, l'obtention de l'information topographique en tout point des sites à l'étude nécessite la réalisation d'une interpolation afin de transformer les données ponctuelles en une surface topographique (Figure 1.2). Il existe différentes méthodes d'interpolation, et donc afin d'identifier celle convenant la mieux à la topographie des sites à l'étude et aux données provenant des relevés topographiques, plusieurs méthodes ont été testées. Ces tests ont été réalisés à l'aide de différentes extensions (Geostatistical Analyst et 3D Analyst) du logiciel ArcGIS (version 9.2) de la compagnie ESRI (Environmental Systems Research Institute Inc.). Les méthodes d'interpolation qui ont été testées sont le krigeage (3 variantes : krigeage ordinaire, krigeage simple, krigeage universel), l'inverse de la distance, la fonction radiale et le réseau de triangles irréguliers. Plusieurs paramètres ont été modifiés et testés pour chacune de ces

méthodes d'interpolation, tels que le nombre de points de voisinage, la distance maximale de ces points, le modèle du semi-variogramme, la puissance, etc. Globalement, seize paramètres d'interpolation ont été modifiés afin d'obtenir les combinaisons de paramètres donnant les erreurs les plus faibles pour chacune des six méthodes d'interpolation testées. L'ensemble des tests des paramètres d'interpolation a été réalisé sur un site représentatif (RIC-2) choisi en fonction de ses dimensions, du nombre de points d'élévation relevés et de sa topographie générale. Par la suite, les meilleures combinaisons des paramètres pour chaque méthode d'interpolation ont été testées sur les huit autres sites à l'étude (Figure 1.3).

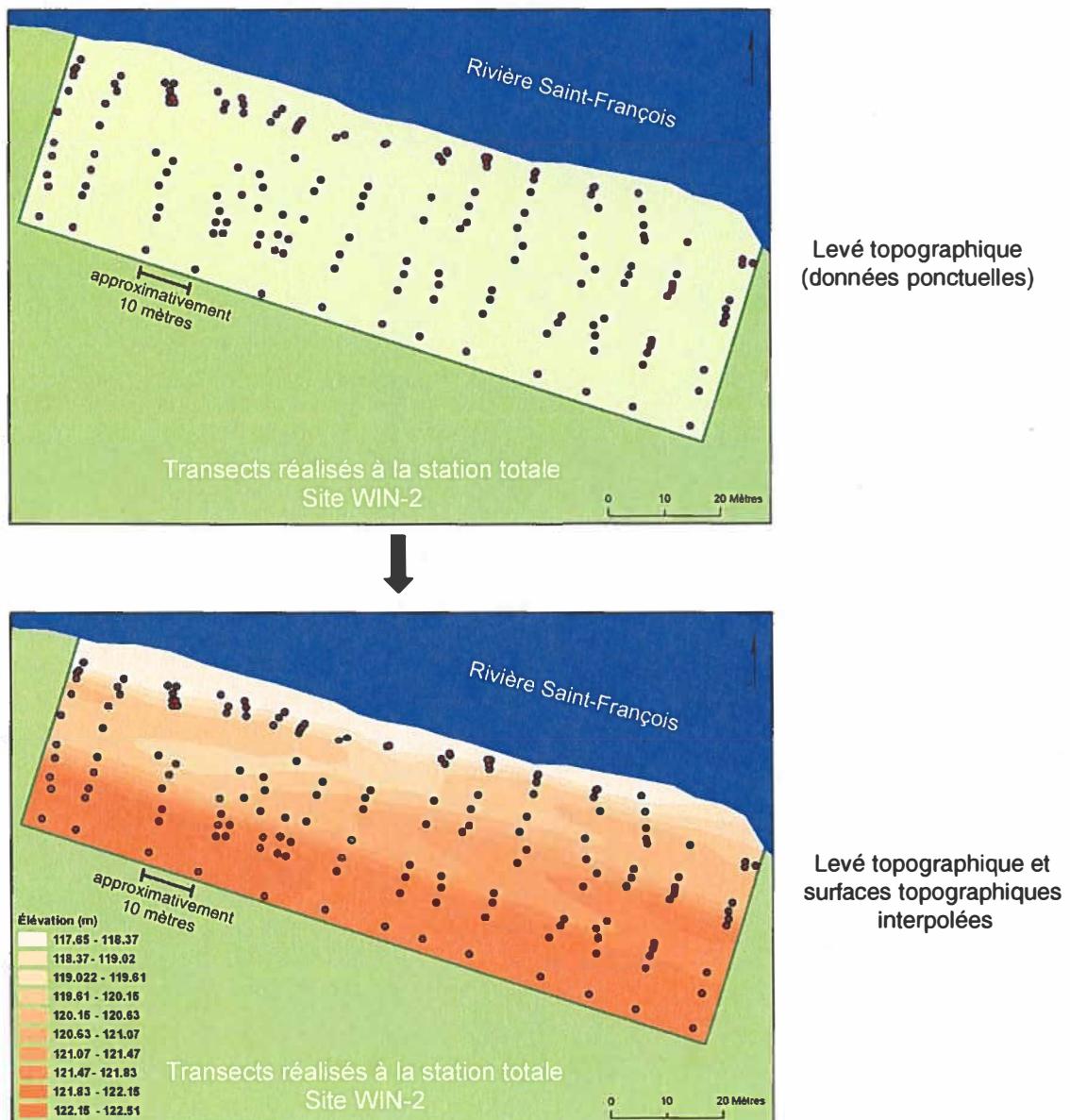


Figure 1.2

Différence entre les données ponctuelles d'élévation et les surfaces topographiques interpolées

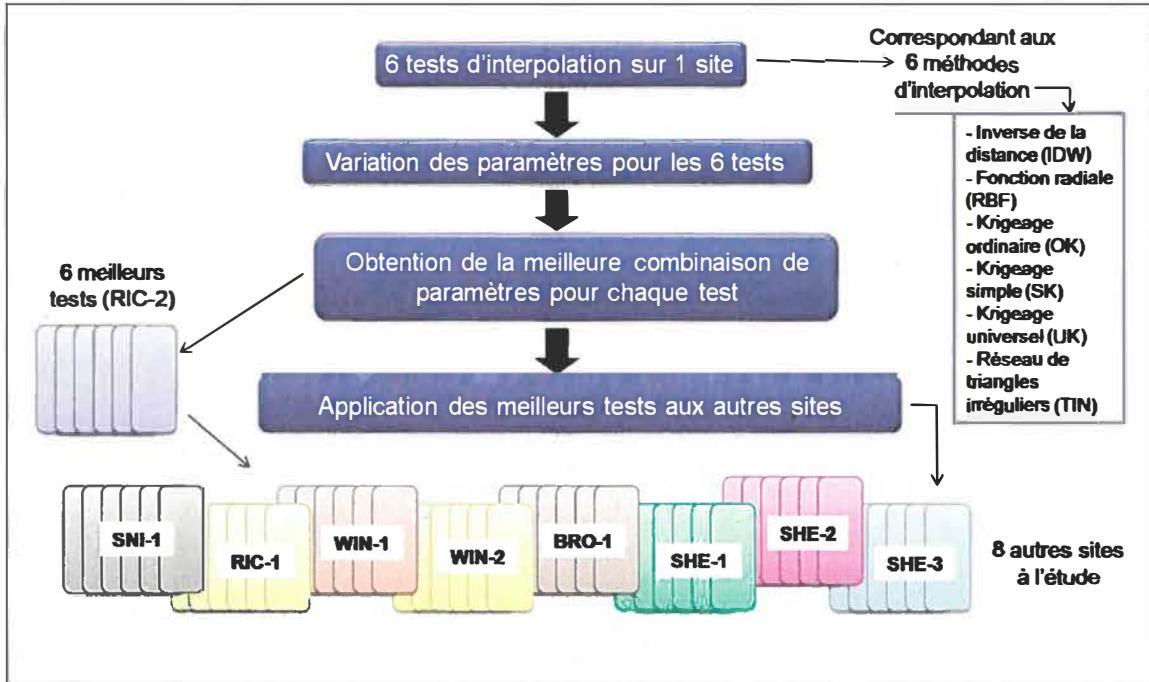


Figure 1.3
Schéma explicatif des tests des méthodes et paramètres d'interpolation

1.4.3.2 Évaluation de la qualité des méthodes d'interpolation

Pour comparer sur une base similaire les différentes méthodes d'interpolation des sites à l'étude, la technique de la validation croisée a été utilisée. Cette technique consiste à séparer le fichier de points d'élévation de chaque site à l'étude en deux parties. La première partie («*training*») est composée de la majorité des points d'élévation et sert à réaliser l'interpolation et donc, à produire la surface topographique tandis que la seconde partie («*test*») est composée de 30 points d'élévation provenant du fichier initial. Les points «*test*» sont retirés du fichier de points d'élévation avant l'interpolation et sont superposés à la surface topographique une fois l'interpolation réalisée. Ils permettent donc de comparer la différence entre les données d'élévation de terrain et les élévations produites par les différentes méthodes d'interpolation.

Ensuite, afin d'évaluer le réalisme et l'exactitude des différentes méthodes d'interpolation, plusieurs indicateurs ont été utilisés. Le RMSE (*Root Mean Square Error*) ou racine carrée de l'erreur moyenne au carré est l'indicateur le plus souvent

utilisé (Weng, 2002). Il indique l'erreur moyenne des points «test» d'élévation pour chaque méthode d'interpolation de chaque site à l'étude et permet donc de comparer la performance des différentes méthodes d'interpolation. Cependant, n'indiquant pas la structure spatiale des erreurs, trois types de cartes de l'erreur ont également été produits afin de représenter la localisation spatiale des erreurs. Le premier type est constitué de cercles de dimension variable représentant la taille des erreurs absolues des points «test» d'élévation. Le second type de carte de l'erreur indique la localisation des erreurs des points «test» supérieures à 60 centimètres (valeurs extrêmes ou *outliers*). Enfin, le troisième type de carte de l'erreur représente au moyen de deux couleurs distinctes les points «test» d'élévation. Ces dernières cartes indiquent les surestimations et sous-estimations des méthodes d'interpolation, c'est-à-dire les valeurs négatives versus les valeurs positives des points «test». Les surestimations correspondent à des points «test» avec des valeurs négatives et les sous-estimations à des points «test» avec des valeurs positives puisque l'on soustrait l'élévation des méthodes d'interpolation à l'élévation des points «test». Chaque carte de l'erreur réalisée correspond à un site à l'étude sur laquelle on peut comparer les résultats des 6 méthodes d'interpolation testées. De manière à corroborer les informations fournies par le RMSE, des tests statistiques ($p \geq 0,05$) ont également été réalisés afin de déterminer s'il y avait une différence significative entre les méthodes d'interpolation. Le premier test statistique réalisé fut l'analyse de variance (ANOVA) qui a permis de déterminer pour chaque site à l'étude s'il existait une différence significative entre l'ensemble des six méthodes d'interpolation. Lorsqu'il y avait une différence significative entre ces méthodes, des tests de t étaient ensuite réalisés afin de comparer la méthode d'interpolation ayant l'erreur la plus faible aux cinq autres méthodes d'interpolation. Les tests de t permettent la comparaison de deux méthodes d'interpolation à la fois. Ceux-ci ont permis de diviser les méthodes d'interpolation en deux classes : la classe supérieure correspondant aux méthodes d'interpolation non significativement différentes de la meilleure méthode, et la classe inférieure correspondant aux méthodes d'interpolation significativement différentes de la meilleure. Enfin, une évaluation visuelle en trois dimensions a aussi été réalisée de manière à vérifier la ressemblance des surfaces topographiques interpolées avec la topographie du terrain. Pour ce faire, les surfaces topographiques produites par chacune des méthodes d'interpolation ont été mises en trois dimensions à l'intérieur du module ArcScene du logiciel ArcGIS (ESRI) ce qui a permis de détecter les diverses anomalies produites par les méthodes

d'interpolation, c'est-à-dire les éléments ne correspondant pas à la réalité topographique du terrain. En effet, les données statistiques comme le RMSE peuvent parfois donner de très bons résultats, cependant la surface créée peut avoir certaines caractéristiques bien différentes de la réalité de terrain, d'où l'importance de vérifier la représentation visuelle obtenue à partir des différentes méthodes d'interpolation. C'est le cas du site RIC-2, où la méthode d'interpolation de l'inverse de la distance crée une erreur relativement faible de 25 cm, par contre la représentation en trois dimensions de la surface topographique présente des pics où il y a eu échantillonnage, ce qui ne correspond pas à la réalité de terrain (Figure 1.4).

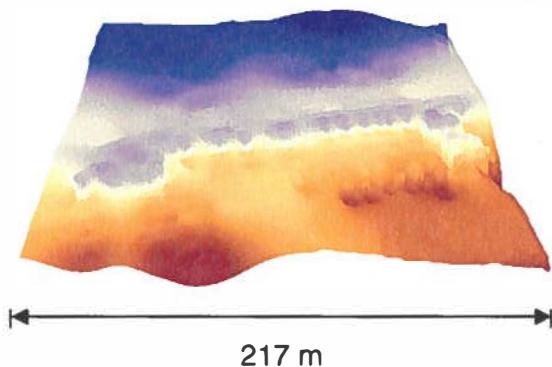


Figure 1.4

MNE en trois dimensions réalisé au moyen de la méthode d'interpolation de l'inverse de la distance (IDW) pour le site RIC-2

Les méthodes d'interpolation donnant les surfaces ressemblant le plus à la réalité de terrain (RMSE, cartes de l'erreur, tests statistiques et évaluation visuelle) ont par la suite été retenues et les modèles numériques d'élévation ont été créés à partir de celles-ci.

1.4.4 Données hydrologiques

Bien que l'étape la plus importante de la réalisation du modèle de représentation des niveaux d'inondation se situe par rapport à la réalisation de modèles numériques

d'élévation de haute précision, l'apport des données hydrologiques n'est pas négligeable. Pour l'ensemble des sites à l'étude, les données hydrologiques utilisées sont représentées par des niveaux d'eau correspondant à des élévations en mètres compatibles avec les modèles numériques d'élévation des différents sites à l'étude. Les niveaux d'eau sont utilisés afin de représenter l'étendue des nappes d'eau sur les plaines inondables lors de fortes crues provoquant des inondations.

Toutefois, pour un site (SHE-2), en plus des niveaux d'eau, les données de débits étaient également disponibles. Pour ce site, il a ainsi été possible de réaliser une courbe de tarage, c'est-à-dire une courbe mettant en relation les variables niveau-débit, ce qui a permis, pour ce site en particulier, d'associer les niveaux-débits afin d'indiquer, pour différents débits de la rivière, l'étendue des nappes d'eau sur les plaines inondables. Les données hydrologiques utilisées proviennent de sources diverses telles que le CD-ROM Hydat d'Environnement Canada, les données et graphiques du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) et des niveaux d'eau relevés à la station totale.

1.4.5 Réalisation du modèle de représentation des niveaux d'inondation

Le modèle de représentation des niveaux d'inondation est un couplage de la topographie des plaines inondables à l'étude avec les niveaux d'eau de la rivière Saint-François. Le modèle de représentation a été réalisé à l'aide du module ArcMap du logiciel ArcGIS (ESRI). Ainsi, à partir des valeurs des niveaux d'eau, une requête peut être réalisée sur la matrice topographique ce qui permet d'identifier la limite de la nappe d'eau correspondant au niveau indiqué dans la requête. Ainsi, tous les endroits ayant un niveau (une élévation) en-dessous du niveau indiqué dans la requête, et qui sont par conséquent submergés par la nappe d'eau, peuvent être identifiés. Il devient donc possible d'observer pour chaque niveau d'eau l'étendue de la nappe d'eau ayant rejoint les différentes sections de la plaine inondable.

Par la suite, une cartographie des sites à l'étude a été réalisée en ajoutant certains fichiers de la Base de données topographiques du Québec (BDTQ), tels que les cours d'eau, les routes, les bâtiments, etc. de même que des orthophotos et les limites de

récurrence des inondations provenant des cartes du risque d'inondation d'Environnement Canada et du ministère de l'Environnement du Québec (1982). Les surfaces inondées correspondant aux différents niveaux d'eau peuvent ainsi être comparées aux limites de récurrence des inondations de 20 et 100 ans, permettant ainsi d'évaluer l'ampleur ou l'importance de ces divers niveaux d'eau. Pour les secteurs à l'étude notamment en zones urbaines, les infrastructures touchées dépendamment des différents niveaux d'eau peuvent être observées. Ainsi, les infrastructures plus à risques dépendamment des sites et des niveaux d'eau ont été identifiées. Pour chacune des cartes réalisées, la requête à l'intérieur du SIG peut être modifiée de manière à observer l'étendue des nappes d'eau pour un grand nombre de niveaux différents. Plusieurs cartes ont ainsi été réalisées montrant les niveaux les plus critiques lors de fortes crues provoquant des inondations.

1. 5 Résultats et interprétation

1.5.1 Modèles numériques d'élévation (MNE)

1.5.1.1 Tests des méthodes et paramètres d'interpolation

Les tests des méthodes et paramètres n'ont pas permis de déceler les paramètres optimaux applicables à toutes les méthodes d'interpolation puisque les combinaisons donnant les plus faibles RMSE divergent dépendamment des méthodes d'interpolation. Il est donc important d'identifier, pour chacune des méthodes d'interpolation, les paramètres optimaux afin de diminuer les RMSE de quelques dizaines de centimètres.

1.5.1.2 Évaluation de la qualité des méthodes d'interpolation

Les combinaisons de paramètres d'interpolation identifiées ont permis d'obtenir pour le site représentatif (RIC-2) des RMSE variant de 16 à 50 cm dépendamment des méthodes d'interpolation. Le tableau 1.3 présente les RMSE produits par toutes les méthodes d'interpolation pour les neuf sites à l'étude.

les zones en pente. De plus, le troisième type de carte de l'erreur (Figure 1.5) représente les sur- et sous-estimations des méthodes d'interpolation par rapport aux points «*test*» d'élévation. Pour toutes les méthodes d'interpolation, il y a davantage de sous-estimation que de surestimation. Toutefois, le pourcentage varie d'une méthode à l'autre entre 45,4 et 48,5 % de surestimation et donc, entre 51,5 et 54,6 % de sous-estimation. Ainsi, il n'y a donc pas de grandes différences entre les méthodes d'interpolation au niveau du nombre de sur et de sous-estimation. Cependant, les méthodes de l'inverse de la distance et du krigeage universel produisent le plus grand nombre de sous-estimation, tandis que le réseau de triangles irréguliers produit le plus petit nombre.

Tableau 1.3
RMSE des points «test» des méthodes d'interpolation
(en mètres) pour chacun des 9 sites à l'étude

Méthode d'interpolation / Site	Inverse de la distance (IDW)	Fonction radiale (RBF)	Krigeage ordinaire (OK)	Krigeage simple (SK)	Krigeage universel (UK)	Réseau de triangles irréguliers (TIN)	\bar{x}
SNI-1	0,58	0,35	0,35	0,18	0,55	0,27	0,38
RIC-1	0,56	0,44	0,33	0,38	0,46	0,37	0,42
RIC-2	0,25	0,17	0,16	0,18	0,50	0,23	0,25
WIN-1	0,41	0,21	0,18	0,17	0,35	0,32	0,27
WIN-2	0,46	0,25	0,22	0,25	0,67	0,30	0,36
BRO-1	0,38	0,31	0,27	0,29	0,42	0,30	0,33
SHE-1	0,18	0,14	0,24	0,12	0,23	0,14	0,18
SHE-2	0,45	0,43	0,41	0,36	0,56	0,38	0,43
SHE-3	0,49	0,37	0,29	0,49	0,33	0,27	0,37
Moyenne	0,42	0,30	0,27	0,27	0,45	0,29	0,33

Les résultats de l'ensemble des sites à l'étude sont comparables à ceux du site RIC-2. Les méthodes du krigeage simple, du krigeage ordinaire, du réseau de triangles irréguliers et de la fonction radiale produisent généralement les erreurs les plus faibles, ce qui se traduit également par la moyenne des RMSE de tous les sites à l'étude. Les méthodes de l'inverse de la distance et du krigeage universel, quant à elles, produisent généralement les erreurs les plus élevées.

Les autres techniques d'évaluation de la qualité des méthodes d'interpolation ont produit des résultats comparables au RMSE. Les trois types de carte de l'erreur réalisés ont permis de localiser soit les erreurs les plus faibles ou les plus élevées, et d'identifier les méthodes d'interpolation produisant ces marges d'erreurs. Ainsi, les erreurs les plus élevées sont généralement situées près de la rivière, plus spécifiquement avant la limite supérieure de la berge. Par conséquent, on peut en déduire que les méthodes d'interpolation ont davantage de difficulté à interpoler dans

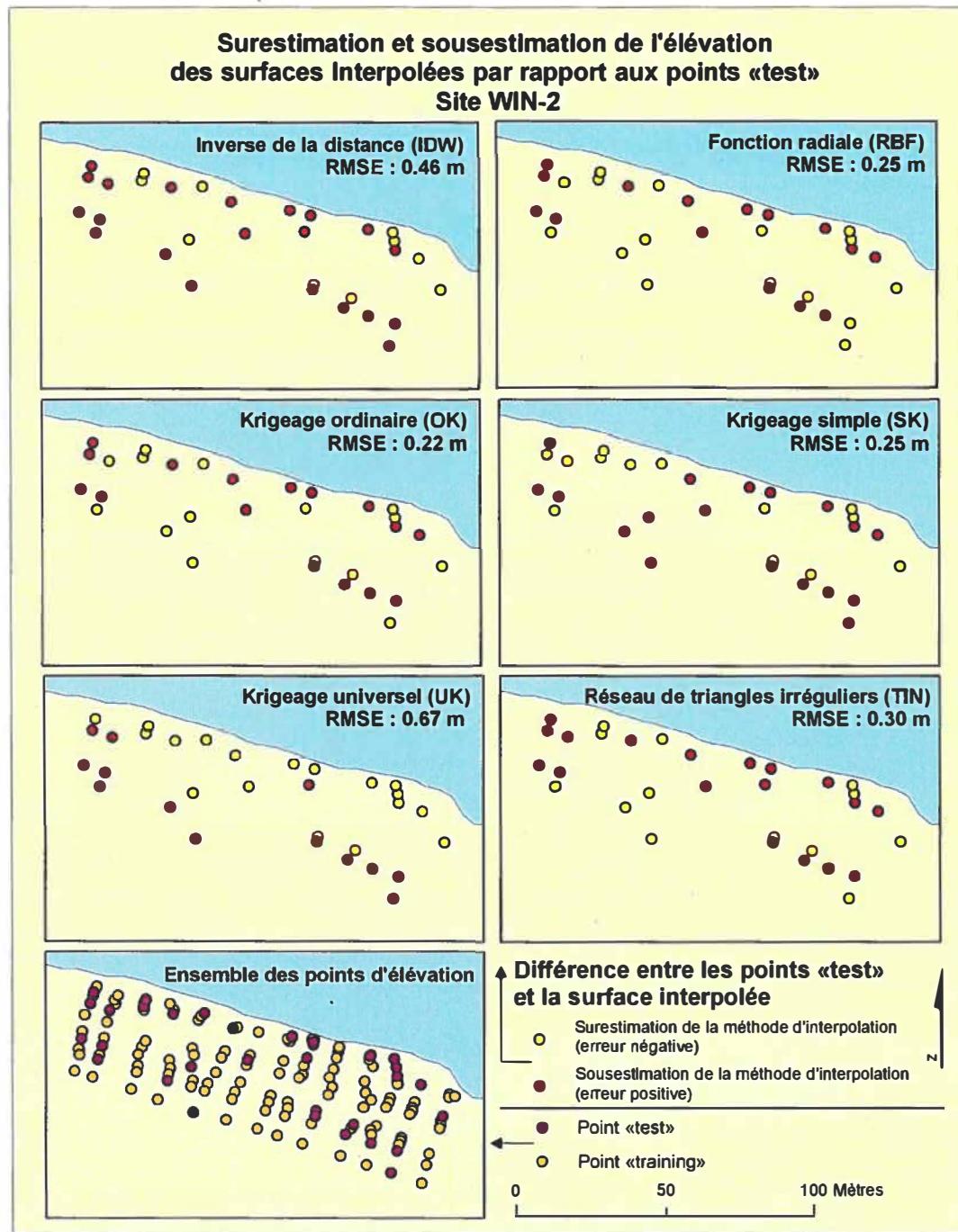


Figure 1.5
Exemple de carte de l'erreur du troisième type pour le site WIN-2

En outre, pour ce qui est des tests statistiques, les analyses de variance ont permis d'établir qu'il y avait une différence significative entre les méthodes d'interpolation pour six sites à l'étude sur neuf. Les trois sites à l'étude n'ayant pas de différence significative entre leurs méthodes d'interpolation sont RIC-1, BRO-1 et SHE-2. Quelques hypothèses ont été émises afin d'expliquer la situation de ces trois sites. Tout d'abord, la différence entre l'élévation minimale et l'élévation maximale d'un site peut avoir une certaine influence. En effet, les sites mentionnés plus haut ont trois des quatre plus grandes différences d'élévation, et ce sont également les sites dont les RMSE sont les plus élevés. Ainsi, plus les variations d'élévation - élévation minimale versus élévation maximale - pour un même site sont grandes, plus les méthodes d'interpolation ont des difficultés à interpoler convenablement, d'où des résultats relativement semblables pour toutes les méthodes d'interpolation. L'hypothèse selon laquelle l'alignement dans l'espace des sites pouvait avoir un effet a conséquemment été éliminée. Après vérification, les trois sites avec des méthodes d'interpolation non significativement différentes, les unes des autres, avaient des orientations semblables aux autres sites à l'étude. Une fois les analyses de variances terminées, des tests de t ont été réalisés. Les tests de t permettent de confirmer les résultats obtenus précédemment avec les RMSE et les cartes de l'erreur puisque les méthodes de l'inverse de la distance et du krigeage universel apparaissent très rarement dans la classe supérieure contrairement aux autres méthodes d'interpolation.

Par ailleurs, l'évaluation visuelle en trois dimensions permet également d'émettre un bémol quant à l'utilisation des méthodes de l'inverse de la distance et du krigeage universel pour interpoler la microtopographie des sites à l'étude. En effet, ces méthodes d'interpolation produisent des caractéristiques topographiques non compatibles avec la réalité de terrain. L'inverse de la distance produit des pics et des creux, c'est-à-dire des œils-de-bœuf tandis que le krigeage universel produit des surfaces rugueuses et hachurées.

Donc, à la lumière des résultats obtenus lors des tests et de l'évaluation de la qualité des méthodes d'interpolation, les méthodes d'interpolation de l'inverse de la distance et du krigeage universel doivent être évitées, puisqu'elles ne représentent pas adéquatement la microtopographie des sites à l'étude. Par contre, les méthodes du krigeage simple, de la fonction radiale, du réseau de triangles irréguliers et du krigeage

ordinaire produisent des résultats concluants (RMSE, cartes de l'erreur, tests statistiques et évaluation visuelle en trois dimensions) permettant leur utilisation pour la réalisation des modèles numériques d'élévation des sites à l'étude.

Pour les présents travaux, puisque des tests d'interpolation ont été réalisés pour l'ensemble des sites à l'étude, la méthode d'interpolation produisant le meilleur résultat pour chaque site à l'étude a été utilisée pour la réalisation du modèle numérique d'élévation. Pour l'application à d'autres sites, le krigeage simple semble être la méthode à utiliser puisque pour l'ensemble des techniques d'évaluation de la qualité des méthodes d'interpolation, il a obtenu les meilleurs résultats.

1.5.2 Réalisation du modèle de représentation des niveaux d'inondation

Couplés aux données de niveau d'eau et aux infrastructures humaines en place, les MNE ont permis de réaliser une cartographie des niveaux d'inondation pour chaque site à l'étude. Les figures 1.6 et 1.7 sont des exemples de cartographie des inondations pour deux sites à l'étude : WIN-1 et SHE-1. Pour ces cartes, les limites de variation d'un mètre des niveaux d'eau sont superposées aux MNE.

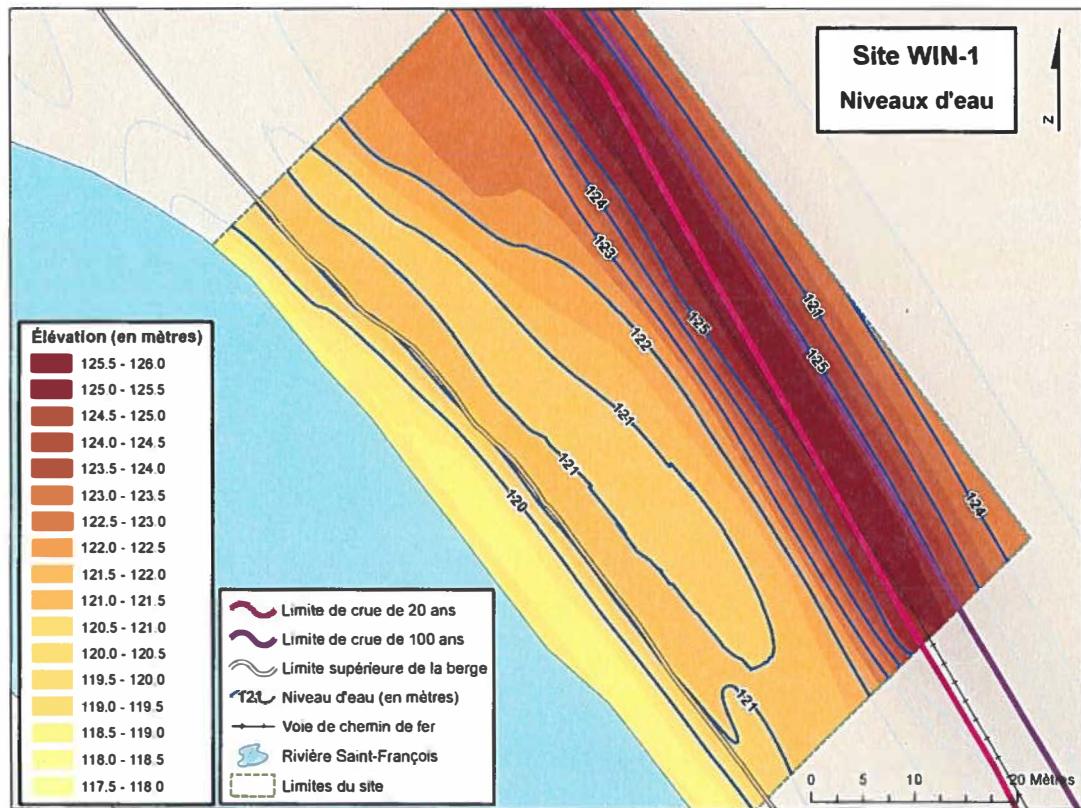


Figure 1.6
Carte des niveaux d'inondation pour le site WIN-1

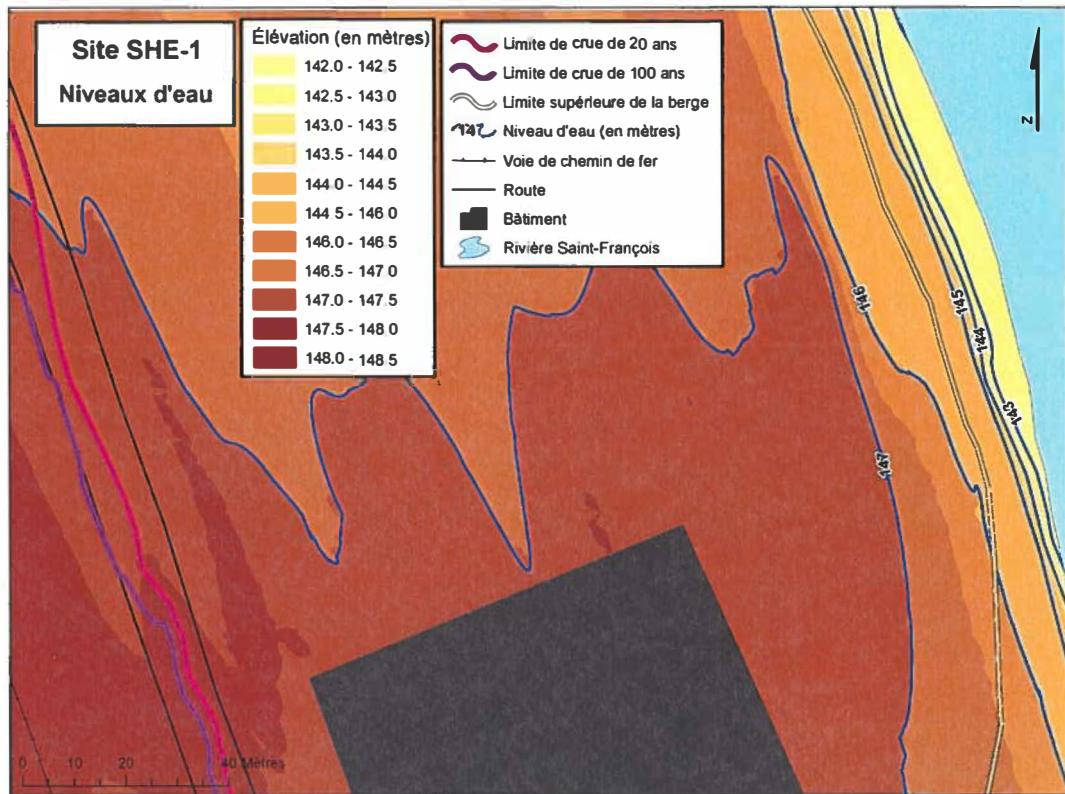


Figure 1.7
Carte des niveaux d'inondation pour le site SHE-1

Par ailleurs, pour le site SHE-2, pour lequel les données de débit étaient disponibles, il a été possible de représenter les événements d'inondation qui se sont produits antérieurement. Connaissant les débits lors de ces événements, ceux-ci ont été reliés aux niveaux d'eau de la rivière, permettant ainsi la représentation de l'étendue des nappes d'eau lors de ces inondations.

Enfin, puisqu'il était essentiel à l'origine que le modèle de représentation des niveaux d'inondation soit le plus précis possible, le tableau 1.4 présente les erreurs (RMSE) les plus faibles obtenues pour chacun des sites à l'étude. Ainsi, dépendamment des sites à l'étude, la précision des MNE varie entre 12 et 36 centimètres. Il y a une certaine différence entre ces valeurs, puisque les méthodes d'interpolation ont davantage de difficulté à interpoler lorsque les différences d'élévation d'un même site sont grandes,

d'où des erreurs plus élevées pour les sites SHE-2, RIC-1, BRO-1 et également SHE-3. Par ailleurs, le RMSE des points «*test*» d'élévation de chacun des sites à l'étude auraient pu être amélioré si des tests sur les paramètres d'interpolation avaient été réalisés sur chacun d'eux plutôt que seulement sur le site RIC-2. Ainsi, il est pertinent de croire qu'on puisse atteindre dans la majorité des cas, une précision supérieure à 30 centimètres. L'obtention de ce niveau de précision permet donc d'identifier des formes du relief de petite dimension ayant un effet sur l'accumulation ou l'écoulement de l'eau et pouvant donc influer sur l'étendue des nappes d'eau lors d'inondations.

Tableau 1.4
La précision en mètres des MNE des 9 sites à l'étude

Site	RMSE des points « <i>test</i> » (m)
SNI-1	0,18
RIC-1	0,33
RIC-2	0,16
WIN-1	0,17
WIN-2	0,22
BRO-1	0,27
SHE-1	0,12
SHE-2	0,36
SHE-3	0,27

CONCLUSION

Le projet de recherche avait pour objectif la réalisation d'un modèle de représentation des niveaux d'inondation de manière à réaliser une cartographie précise de la topographie des plaines inondables et des surfaces inondables dans le secteur fluvial de la rivière Saint-François situé entre les municipalités de Sherbrooke et Drummondville. Pour ce faire, des modèles numériques d'élévation (MNE) de haute précision ont été réalisés afin de reproduire la microtopographie des sites à l'étude. Pour créer les MNE, des méthodes d'interpolation ont été utilisées. Les tests des méthodes d'interpolation ont permis d'identifier lesquelles se sont avérées les plus efficaces pour représenter la microtopographie des zones riveraines à l'étude et ce, en fonction des données d'élévation utilisées. Suivant les tests utilisés, les méthodes de l'inverse de la distance et du krigeage universel sont à proscrire, tandis que les méthodes du krigeage simple, de la fonction radiale, du réseau de triangles irréguliers et du krigeage ordinaire représentent plus adéquatement la microtopographie des sites à l'étude. Parmi ces méthodes, le krigeage simple produit toutefois les meilleurs résultats.

Les tests des méthodes et paramètres d'interpolation ont rendu possible la réalisation de modèles numériques d'élévation de haute précision, c'est-à-dire ayant une précision de l'ordre d'une vingtaine de centimètres. Ces modèles numériques d'élévation sont assez précis pour représenter la microtopographie des plaines inondables et ainsi des formes du relief de faible dimension. Le travail réalisé au niveau des modèles numériques d'élévation a, par conséquent, permis de réaliser un modèle de représentation des niveaux d'inondation d'une précision considérablement supérieure à ce qui est généralement produit. En effet, puisque les MNE ont une précision d'environ vingt centimètres, les variations de la topographie de même que celles des niveaux d'eau supérieures à cet ordre peuvent être identifiées. Le modèle de représentation des niveaux d'inondation élaboré permet d'évaluer la limite des nappes d'eau pour différents niveaux d'inondation. Couplé à des données sur les infrastructures en place, il devient possible de déterminer les zones les plus à risque. Le modèle de représentation des niveaux d'inondation permet ainsi l'amélioration de la cartographie des inondations déjà existante, et ce en délimitant de façon précise l'étendue des nappes d'eau lors des débordements. Il serait intéressant d'utiliser, éventuellement, ce

modèle en le couplant à un autre modèle de prédition des inondations qui s'appuie sur des données précises de débits et niveaux, comme c'est le cas pour le site de Sherbrooke (SHE-2), pour lequel de telles données sont disponibles.

Par ailleurs, il faut mentionner que l'obtention de données d'élévation d'une si grande précision (quelques centimètres) implique un temps d'acquisition important. Effectivement, les travaux de terrain réalisés au GPS et à la station totale sont relativement longs, il est donc important, avant la réalisation de travaux de cette précision, de bien cibler les secteurs problématiques, c'est-à-dire, les zones les plus fréquemment inondées et celles qui impliquent la sécurité des populations riveraines et la protection des infrastructures en place (ponts, digues, etc.).

La méthode utilisée pour cartographier les inondations s'avère d'une grande précision en comparaison aux méthodes généralement utilisées (courbes de niveau, images satellites, photos aériennes). Le LiDAR permet aussi l'obtention de données d'élévation et la création de MNE d'une précision semblable à celle obtenue avec la présente méthode, toutefois les données LiDAR sont extrêmement dispendieuses et sont donc peu accessibles aux groupes ou organismes publics ou aux municipalités dont les budgets sont restreints. Le couplage de la photogrammétrie avec les données d'élévation relevées, mais sur des distances plus larges, pourrait aussi être envisagé comme un autre outil cartographique. Il pourrait permettre la couverture d'un plus grand territoire, tout en réduisant les coûts des travaux de terrain.

Le modèle de représentation des niveaux d'inondation élaboré dans le cadre de cette recherche comporte plusieurs utilités. On peut mentionner, entre autres, la cartographie détaillée des niveaux d'inondation et des infrastructures susceptibles d'être affectées par les inondations, l'amélioration du travail de contrôle et de gestion des inondations et des mesures de sécurité pour les municipalités concernées, l'utilisation en tant qu'outil d'aide à la décision dans le réaménagement des zones urbaines le long des rivières et l'utilisation comme guide pour l'aménagement des zones de plaines inondables et pour la protection des milieux naturels ou semi-naturels. Finalement, ce modèle de représentation nous amène vers l'exploration d'autres développements méthodologiques, notamment pour les modèles numériques d'élévation (MNE). Et ce

toujours dans l'objectif d'améliorer les modèles en vue d'une utilisation simple mais efficace, et surtout utile pour les différents aménagistes ou gestionnaires du territoire.

RÉFÉRENCES

- Anderson, E.S., Thompson, J.A., Austin, R.E. (2005) «LIDAR density and linear interpolator effects on elevation estimates». *International Journal of Remote Sensing*. 26 (18-20): 3889-3900.
- Arnaud, M., Emery, X. (2000). *Estimation et interpolation spatiale : méthodes déterministes et géostatistiques*, Hermès, Paris, France , 216 pp.
- Ayeni, O.O. (1982) «Optimum sampling for digital terrain models: A trend towards automation», *Photogrammetric Engineering an Remote Sensing*. 48: 1687-1694.
- Bates, P. D., De Roo, A. P. J. (2000) «A simple raster-based model for flood inundation simulation», *Journal of hydrology*. 236: 54-77.
- Blin, P. (2001) «Développement d'une nouvelle méthode de cartographie du risque unitaire d'inondation (CRUE) pour les résidences», Mémoire de maîtrise, Université du Québec, INRS-EAU.
- Brivio, P. A., Colombo, R., Maggi, M., Tomasoni R. (2002) «Integration of remote sensing data and GIS for accurate mapping of flooded areas», *International journal of remote sensing*. 23: 429-441.
- Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ) (2003) «La loi sur la sécurité des barrages», Ministère du Développement durable, de l'environnement et des parcs du Québec
<http://www.cehq.gouv.qc.ca/loisreglements/barrages/index.htm>.
- Chandler, J. (1999) «Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research», *Earth Surface processes and landform*. 24: 51-63.
- Chaplot, V., Darboux, F., Bourennane, H., Leguédois, S., Silvera, N., Phachomphon, K. (2006) «Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density», *Geomorphology*. 77: 126-141.
- Comité National Français des Sciences hydrologiques / Commission de terminologie (2003) «Dictionnaire français d'hydrologie»,
<http://www.ciq.ensmp.fr/~hubert/glu/indexdic.htm>.
- Couture, C. (2001) «Étude spatio-temporelle des inondations du bassin versant de la rivière Saint-François, Québec, Canada», Rapport d'activité de maîtrise, Université du Québec à Montréal.
- Dempsey, E. J., Marcy, D. C., Kolowith, M. A. (2000) «Two- and Three Dimensional Visualization of National Weather Service Flood Forecasts Using ArcGIS», Uniform Resource Locator gis.esri.com/library/userconf/proc03/p0138.pdf.
- De Roo, A. P. J., Wesseling, C. G., Van Deursen, W. P. A. (2000). «Physically based river basin modelling within a GIS: the LISFLOOD model», *Hydrological processes: Geocomputation in Hydrology and Geomorphology*. 14: 1981-1992.

- Desmet, P.J.J. (1997) «Effects of interpolation error on the analysis of DEMs», *Earth surface processes and landforms*. 22: 563-580.
- Dutta, D., Srikantha, H., Musiake, K. (2006) «An application of a flood risk analysis of a flood control plan in a river basin», *Hydrological processes*. 20:1365-1384.
- Environnement Canada (2001) «Relevés hydrologiques du Canada», CD ROM HYDAT.
- Environnement Canada et Ministère de l'environnement du Québec (1982) «Carte des zones inondables en eau libre, Bassin de la rivière Saint-François», Echelle 1 : 10 000, Feuilles 21E/05-100-0401, 21E/05-100-5226, 21E/05-100-5227, 21E/12-100-5228, 31H/09-100-0204, 31H/09-100-5229.
- Fisher, P. (1998) «Improved modeling of elevation error with geostatistics», *Geoinformatica*. 2 (3): 215-233.
- Gilvear, D., Bryant, R. (2003) «Analysis of aerial photography and other remotely sensed data» *In Tools in fluvial geomorphology*, Kondolf, G. M., Piégay, H., John Wiley & sons, Chippenham, United Kingdom, pp. 135-170.
- Groupe conseil GENIVAR (2001) «Évaluation de la sécurité des barrages Jules-Allard et Aylmer – Rapport hydraulique», Rapport préliminaire présenté au ministère de l'Environnement – Direction de l'hydraulique et de l'hydrique. p.56.
- Hollis, G. (1975) «The effect of urbanization on floods of different recurrence intervals», *Water Resources Research*. 11: 431-435.
- Jones, N.K. (1998) «A recent history of flooding in the Massawippi drainage basin», *Journal of Eastern Townships Studies*. 13: 41-57.
- Jones, N.K. (2002) «Flooding in the Massawippi Basin during the 20th century», *Journal of Eastern Townships Studies*. 20: 107-122.
- Lang, G., Erickson, J. (2003) «Flood hazard zone modeling for regulation development», *Uniform Resource Locator* gis.esri.com/library/userconf/proc03/p0419.pdf.
- Lavallée, D., Roy, L., Marche, C. (2000) «Un système de prévision appliqué aux crues subites de la rivière Châteauguay», *Canadian Journal of Civil Engineering*. 27: 1311-1315.
- Lloyd, C.D., Atkinson, P.M. (2002) «Deriving DSMs from LiDAR data with kriging», *International journal of remote sensing*. 23 (12): 2519-2524.
- MacEachren, A.M., Davidson, J.V. (1987) «Sampling and Isometric mapping of Continuous Geographic Surfaces», *The American Cartographer*. 14 (4): 299-320.

Marks, K., Bates, P. (2000) «Integration of high-resolution topographic data with floodplain flow models», *Hydrological processes: Geocomputation in Hydrology and Geomorphology*.14: 2109-2122.

McCoy, J., Johnston, K. (2001) «Using ArcGIS Spatial Analyst», Coll. GIS by ESRI, ESRI, Redlands, U.S.A., 230 pp.

Ministère du Conseil exécutif du Québec (1997) «Rapport Nicolet : Commission scientifique et technique sur la gestion des barrages», Québec, Ministère de l'Environnement et de la faune, pag. multiple.

Ministère des Ressources naturelles, de la faune et des parcs du Québec (2000) «Orthophotographie noir et blanc», Photocartothèque québécoise, Gouvernement du Québec, échelle 1 : 40 000.

Ministère des Ressources naturelles du Québec (2000) «Base de données topographique du Québec (BDTQ)», échelle 1 : 20 000, feuillets 21E/05-200-0202, 21E/12-200-0101, 31H/09-200-0102, 31H/09-200-0202, 31H/15-200-0202, 31H/16-200-0101, 31H/16-200-0102, 31H/16-200-0201.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (2007) «Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ)». Uniform Resource Locator <http://www.cehq.gouv.qc.ca>

Morrison, J.L. (1971) «Method produced error in isarithmic mapping», American Congress on Surveying and Mapping Cartography Division, Technical Monograph: CA-5.

Overton, I. C. (2005) «Modelling floodplain inundation on a regulated river: integrating GIS, remote sensing and hydrological models», *River research and applications*. 21: 991-1001.

Pedrini, H. (2001) «Multiresolution terrain modeling based on triangulated irregular networks», *Revista Brasileira de Geociências*. 31: 117-122.

Peucker, T.K. (1979) «Digital terrain models: An overview», Auto-Carto IV, Proceedings of the International Symposium on Cartography and Computing: Application in Health and Environment, Vol. 1, Reston, Virginia, pp. 97-107.

Pitman, S. (2003) «GIS for faster analysis of dam-break flows», Uniform Resource Locator <http://www.crwr.utexas.edu/gis/gishydro04/Introduction/TermProjects/Pitman.htm>.

Provencher, L., Dubois, J.-M.M. (2007). *Précis de télédétection. Vol. 4 : Méthodes de photointerprétation et d'interprétation d'image*, Presses de l'Université du Québec et l'Agence universitaire de la Francophonie, Québec, Canada, 468 pp.

Ressources naturelles Canada (2005) «Glossaire des termes de télédétection», In Centre canadien de télédétection, Uniform Resource Locator http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/glossary/index_f.php

- Saint-Laurent, D. (2008) «Floods in Urban and Suburban Areas», *Environnement urbain / Urban Environment*. (2)2008: IV - V.
- Saint-Laurent, D., Couture, C., McNeil, É. (2001) «Spatio-temporal analysis of floods of the Saint-François drainage basin, Québec, Canada», *Environments*. 29 (2): 73-90.
- Saint-Laurent, D., Hähni, M. (2008) «Crues et inondations majeures des villes de l'Estrie : variations climatiques et modifications anthropiques (Québec, Canada)», *Environnement urbain / Urban Environment*. (2)2008 : a50 - a72.
- Saint-Laurent, D., Saucet, J.-P. (2003) «Chronological reconstitution of floods of the Saint-François Drainage Basin, Québec, Canada», *Proceedings of the third Canadian Conference on Geotechnique and Natural Hazards*, June 8-10th, Edmonton, Alberta, Canada, pp. 89-94.
- Secretan, Y., Larouche, E. et coll. (2003) «Système d'évaluation et de gestion des risques d'inondation en milieu fluvial – Projet SEGRI», *Rapport de recherche, INRS-Eau, Terre et Environnement*.
- Shepard, D.S. (1984) «Computer mapping: The SYMAP interpolation algorithm», In *Spatial Statistics and models*, Gaile, G.L., Willmot, C.J., D Reidel Pub. Co., Boston, U.S.A., pp.133-146.
- Townsend, P. A., Walsh, S. J. (1998) «Modeling floodplain inundation using an integrated GIS with radar optical remote sensing», *Geomorphology*. 21: 295-312.
- Tourolle, J. (2003) «Apports du MNT dans l'étude des risques de submersion marine», *In Notre-Planète.info, Uniform Resource Locator*
http://www.notre-planete.info/geographie/outils/tr_sig/sig_it.php.
- Tucker, C. (2000) «Floods in Canada : an Emergency Preparedness Canada (EPC) Perspective», *Environments*. 28: 75-87.
- Weber, D.D., Englund, E.J. (1994) «Evaluation and Comparison of Spatial Interpolators II», *Mathematical Geology*. 26 (5): 589-603.
- Weng, Q. (2002) «Quantifying Uncertainty of Digital Elevation Models Derived from Topographic Maps», *In Advances in Spatial Data Handling*, Richardson, D., Van Oosterom, P., Springer-Verlag, New York, U.S.A. pp.403-418.
- Wise, S. (2000) «Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours», *Hydrological processes*. 14: 1909–1929.

CHAPITRE 2
PREMIER ARTICLE

**ÉLABORATION D'UN MODÈLE DE SIMULATION DES NIVEAUX D'INONDATION À
PARTIR D'UN SIG ET APPLICATION À UN SITE : RIVIÈRE SAINT-FRANÇOIS À
SHERBROOKE**

**DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL OF FLOOD LEVELS FROM A GIS
AND APPLICATION AT ONE SITE : SAINT-FRANÇOIS RIVER AT SHERBROOKE**

Ariane Drouin, Université du Québec à Trois-Rivières¹

¹(819) 376-5011 poste 3838

ariane.drouin@uqtr.ca

Université du Québec à Trois-Rivières

Sciences de l'environnement, département de chimie-biologie,
3351, boulevard des Forges,
Trois-Rivières, Québec, Canada, G9A 5H7

Résumé

Afin de mieux identifier spatialement les zones les plus à risques pour les populations riveraines et les infrastructures lors de fortes crues, un projet visant l'élaboration et l'application d'un modèle de simulation des niveaux d'inondation à partir d'un Système d'information géographique (SIG) a été mis en place. Ce modèle de simulation intègre à partir d'un SIG des données de débits et niveaux, et un modèle numérique d'élévation (MNE) de haute précision, rendant possible la simulation ainsi que la visualisation des différents niveaux atteints par la rivière Saint-François. Les résultats du modèle sont présentés visuellement sous forme de cartes permettant d'observer et d'identifier les limites des nappes d'eau lors des crues ou inondations majeures.

Mots clés : modèle de simulation, niveau d'inondation, modèle numérique d'élévation (MNE), Système d'information géographique (SIG), zones urbaines

Abstract

To better spatially identify the areas most at risks for the riverside populations and infrastructures during important floods, a project aiming the elaboration and application of a simulation model of flood levels from a Geographic Information System (GIS) has been set up. This simulation model integrates, within a GIS, flows and levels data, and a really precise digital elevation model (DEM), making possible simulation as well as visualization of different levels reached by the Saint-François river. The model results are presented visually in the form of maps to observe and identify the limits of water slicks during inundation or major floods.

Key words : Simulation model, flood level, digital elevation model (DEM), Geographic information system (GIS), urban areas

1. Introduction

Les plaines inondables sont depuis toujours des milieux convoités pour leurs attraits physiques, leur accessibilité et leurs ressources. Malgré les politiques gouvernementales qui visent la protection des écosystèmes riverains, ceux-ci demeurent toujours l'objet de nombreuses pressions anthropiques tels que l'urbanisation, le drainage agricole, l'assèchement des zones humides et l'artificialisation des rives, entre autres. L'occupation progressive des plaines inondables au cours des dernières décennies fait de ces milieux des zones vulnérables pour les populations riveraines et pour les différentes infrastructures qui s'y trouvent. Dans ce contexte, il nous apparaît nécessaire de mieux identifier spatialement les zones les plus à risques pour les populations riveraines et les infrastructures présentes (bâtiments, routes, etc.) lors de fortes crues ou d'inondations majeures. En effet, certains secteurs sont davantage soumis aux inondations périodiques, c'est le cas de plusieurs municipalités riveraines de la rivière Saint-François, dont notamment Sherbrooke, Bromptonville, Richmond et Saint-Nicéphore (Saint-Laurent et Saucet, 2003). De plus, Sherbrooke est la municipalité riveraine de la Saint-François ayant subit le plus d'inondations entre 1900 et 2000 avec 53 inondations². La récurrence des inondations pour la municipalité de Sherbrooke (entre 1900 et 2000) est de l'ordre 1,89. Il se produit ainsi une inondation pratiquement à tous les deux ans pour cette municipalité. La fréquence d'occurrence des inondations dans le bassin versant de la rivière Saint-François est donc relativement élevée, ce qui justifie les études et les actions entreprises par les chercheurs et gouvernements afin de diminuer les risques et les conséquences découlant de ce phénomène.

² Voir l'article de D. Saint-Laurent dans ce même numéro pour le nombre d'inondations dans les municipalités riveraines de la rivière Saint-François et les périodes de récurrence.

En 1976, Environnement Canada et le ministère de l'Environnement du Québec se sont associés (Convention Québec-Canada, 1976) pour réaliser, dans les municipalités les plus souvent affectées par les inondations, des cartes du risque d'inondation identifiant ainsi les cotes de crue de récurrence de 20 et 100 ans. D'autres travaux au Canada et ailleurs dans le monde ont également été réalisés afin d'identifier les secteurs pouvant être inondés lors d'épisodes de crues. Dans le Guide pour déterminer et délimiter les zones inondables du ministère de la Sécurité publique du Québec (1998), on mentionne que la cartographie des zones inondables peut se faire au moyen d'un levé photogrammétrique, d'un levé topographique, d'un GPS ou par cartographie topographique, notamment. Il existe, par ailleurs, plusieurs méthodes de cartographie des inondations expérimentées dans divers travaux de recherche. L'utilisation de photos aériennes (Chandler, 2003) et d'images satellites (Bates et De Roo, 2000) est maintenant relativement étendue (Gilvear et Bryant, 2003). Les images satellites sont utilisées afin de représenter les étendues d'eau recouvrant les plaines d'inondation en période de crue (Overton, 2005 ; Townsend et Walsh, 1998). Les photos aériennes et la photogrammétrie sont généralement utilisées pour la réalisation de modèles numériques d'élévation (MNE) de manière à représenter la topographie des secteurs à l'étude (Horritt et Bates, 2001), et pour la cartographie des zones inondables. Outre les photos aériennes, des données d'élévation provenant du LIDAR (*Light Detection And Ranging*) (Marks et Bates, 2000), de courbes de niveau, de points côtés, d'un GPS ou d'une station totale peuvent être, entre autres, utilisées pour réaliser des modèles numériques d'élévation. Les courbes de niveau sont fréquemment utilisées puisqu'elles sont faciles à obtenir, toutefois l'espacement vertical entre les courbes est généralement de 10 mètres et la précision des valeurs altimétriques des courbes de niveau de cinq mètres, ce qui ne permet pas d'obtenir des informations sur la microtopographie du terrain (Couture, 2001 ; Wise, 2000). De plus, lors de la

cartographie des inondations, des données de débit et niveau sont souvent utilisées. Des modèles hydrologiques peuvent être couplés aux MNE ou aux images satellites afin de prendre davantage en compte les variables tels que la couverture végétale, les types de sol, l'infiltration de l'eau, etc. (Bates et De Roo, 2000 ; Blin, 2001 ; De Roo et al., 2000).

Pour le modèle de simulation, l'acquisition de l'information s'est réalisée grâce à l'utilisation complémentaire d'une méthode indirecte d'acquisition de données spatio-temporelles et d'un modèle numérique de simulation des niveaux d'inondation. En premier lieu, un historique des inondations dans le bassin versant de la rivière Saint-François a été réalisé (en collaboration avec D. Saint-Laurent), lequel historique a fourni de nombreux renseignements sur la répartition spatiale et temporelle des inondations sur ce territoire. Par la suite, un projet d'élaboration et d'application d'un modèle de simulation des niveaux d'inondation a été développé. Ce projet vise à évaluer et délimiter précisément l'étendue des nappes d'eau sur les rives d'un cours d'eau en période de crue ou d'inondation. Dans le cas de zones urbaines, il vise donc plus spécifiquement à identifier les secteurs riverains et les infrastructures les plus touchées lors des débordements de la rivière, et parallèlement, à délimiter pour différents débits et niveaux de la rivière, les routes, les bâtiments publics, les commerces ou industries, les résidences et autres infrastructures qui sont localisés dans les zones inondables. Il s'agit d'identifier spatialement et de façon précise les niveaux et/ou les débits critiques pour lesquels les populations riveraines et les constructions occupent des zones à fort risque. L'aspect innovateur de ce modèle de simulation se situe au niveau de la précision de l'information topographique qui sert de base au modèle. En effet, la précision des données d'élévation utilisées dans le modèle se situe à l'échelle du centimètre pour les données brutes (échantillonnées sur le

terrain) et à l'échelle décimétrique (± 20 cm) pour les surfaces topographiques interpolées et les modèles numériques d'élévation, ce qui est nettement plus précis que les cartes de risque d'inondation et autres outils utilisés actuellement pour délimiter les zones d'inondation. En effet, l'utilisation de la photogrammétrie assistée par ordinateur de même que de la télédétection permet de couvrir un grand territoire, de plusieurs kilomètres à plusieurs dizaines et même centaines de kilomètres. Par exemple, les photos aériennes à l'échelle du 1 : 40 000 couvrent une superficie de 64 km² chacune. La précision verticale des photos aériennes dépend de l'échelle de celles-ci et se chiffre à 50 cm environ (précision verticale) pour une orthophotographie au 1 : 15 000 (MSP, 1998). La superficie couverte par les images satellites peut grandement varier dépendamment des plates-formes et capteurs utilisés, allant d'une fauchée de 11 kilomètres (Ikonos) à 100 (Radarsat-1) et même 120 kilomètres (Landsat TM). Toutefois, la résolution spatiale des images satellite relève plutôt de plusieurs mètres : 1 à 4 mètres pour Ikonos, 8 à 30 mètres pour Radarsat-1 et 30 mètres pour Landsat TM (Gilvear et Bryant, 2003). Les cartes provenant de ce modèle de simulation offrent, par contre, des données cartographiques très précises permettant de délimiter l'étendue des nappes d'eau en période de crue ou forte inondation. À cet égard, ce modèle pourrait très bien servir d'outil d'aide à la décision pour les autorités municipales qui doivent obligatoirement identifier les zones à risque dans les schémas d'aménagement.

2. Les secteurs à l'étude

Les différents secteurs à l'étude couvrent le tronçon moyen de la rivière Saint-François qui constitue la section fluviale la plus affectée par les inondations. Les municipalités riveraines de Sherbrooke, Bromptonville, Windsor, Richmond et Saint-Nicéphore

(Drummondville) sont périodiquement affectées par les crues et font l'objet de l'analyse pour l'application du modèle de simulation des niveaux d'eau. La grande partie de ces municipalités, outre la Ville de Sherbrooke, se compose de zones urbanisées de faible densité, dont les rives peuvent être complètement ou partiellement artificialisées, avec des zones riveraines partiellement boisées (milieux naturels ou semi-naturels) et des zones agricoles. Par ailleurs, pour certains secteurs, on trouve des infrastructures publiques ou privées à seulement quelques mètres des berges, tandis que pour d'autres, une bande riveraine relativement large (20-30 mètres et plus) est présente. La configuration de la rivière et l'occupation des rives varient beaucoup d'un secteur à l'autre, ainsi chacun d'eux présente des niveaux plus ou moins élevés de risque d'inondation. Nous nous sommes donc davantage attardés aux secteurs les plus à risque, tout en cherchant à représenter les différents milieux riverains (zones urbanisées, agricoles, plaines inondables boisées).

Dans un premier temps, le choix des sites s'est fait à partir des cartes du risque d'inondation d'Environnement Canada et du Ministère de l'Environnement du Québec (1982) et des informations fournies par la Direction régionale de la Sécurité civile de la Montérégie et de l'Estrie, dont des cartes montrant les secteurs les plus souvent touchés par les inondations. Le choix des sites s'appuie également sur les informations provenant des données de l'historique des inondations dont une partie a été publiée (Saint-Laurent *et al.*, 2001; Saint-Laurent et Saucet, 2003), et une autre partie qui sera intégrée à la base de données du Centre interuniversitaire d'études québécoises (CIEQ-UQTR). À partir de ces données historiques, il est possible de recenser pour une même municipalité l'ensemble des événements d'inondation et de localiser les secteurs (rues, quartiers, etc.) les plus touchés par les inondations. Ces données permettent également de comparer et de valider la justesse du modèle de simulation. Enfin, en

raison de l'étendue du territoire, du temps et des coûts d'acquisition des données de terrain, seuls les sites les plus vulnérables ont été retenus dans cette étude. Ces sites correspondent à des secteurs ayant été identifiés sur les documents fournis par le ministère de la Sécurité publique du Québec et dans l'historique des inondations, et se situant dans les zones de récurrence 0-20 et 20-100 ans. Dans le cadre de cet article, le site de la Ville de Sherbrooke a été sélectionné pour illustrer l'application du modèle de simulation. Ce site présente d'ailleurs l'avantage d'utiliser un grand nombre de données hydrologiques facilement disponibles. De plus, plusieurs informations sur les inondations de la Ville de Sherbrooke se trouvent dans l'historique des inondations, ce qui permet une meilleure validation du modèle de simulation. Enfin, à Sherbrooke, plusieurs bâtiments se trouvent relativement près de la rivière Saint-François. L'application du modèle à cette municipalité permettait donc d'exploiter pleinement la fonction de protection du modèle de simulation. La figure 2.1 présente une carte de localisation du bassin versant de la rivière Saint-François et des différents sites à l'étude.

3. Approches méthodologiques

3.1. Le modèle de simulation et la cartographie des niveaux d'inondation en milieu urbain

La figure 2.2 illustre les principales étapes méthodologiques menant vers la réalisation du modèle de simulation des niveaux d'eau. Ces étapes se résument ainsi : (1) les travaux de terrain et (2) la création des MNE, lesquels sont étroitement liés; (3) l'incorporation des données hydrologiques qui peuvent être ajoutées en parallèle; (4) la simulation des niveaux d'inondation qui repose sur les trois étapes précédentes; (5) et

enfin, la cartographie des niveaux d'inondations en milieu urbain par laquelle on ajoute des informations sur les infrastructures urbaines aux résultats des simulations. Le tout permettant d'évaluer les secteurs touchés et du fait même les infrastructures affectées, dépendamment des débits et niveaux atteints par la rivière lors de différents épisodes d'inondation.

Le modèle de simulation mis en place repose donc en premier lieu sur la création de modèles numériques d'élévation précis pour les secteurs riverains sélectionnés le long de la rivière et, en deuxième lieu, sur la réalisation de courbes de tarage (relation niveau-débit). Le couplage de ces deux types d'information permet d'indiquer, en fonction des différents niveaux et débits de la rivière, l'étendue des nappes d'eau lors des périodes de crue ou d'inondation. Avec les niveaux obtenus à partir des courbes de tarage, des requêtes ont été réalisées sur les matrices topographiques. Ainsi, tous les endroits ayant un niveau (une élévation) en-dessous du niveau indiqué dans la requête sont submergés par la nappe d'eau. Il devient donc possible d'observer pour chaque niveau (et pour chaque débit qui s'y rattache), l'étendue spatiale de la nappe d'eau recouvrant partiellement ou totalement la zone inondable. En couplant les fichiers de la base de données topographiques du Québec (BDTQ) avec les photos aériennes géoréférencées et rectifiées (orthophotos) des secteurs à l'étude, il a été possible de réaliser une cartographie des différents sites en milieu urbain permettant ainsi de déterminer les infrastructures affectées par les inondations, dépendamment des différents niveaux et débits. Pour chacune des cartes réalisées, la requête à l'intérieur du modèle de simulation peut être modifiée de manière à observer l'étendue des nappes d'eau pour un grand nombre de débits et niveaux différents. Il est ainsi possible de reproduire les limites atteintes par des inondations antérieures, et de prévoir l'étendue des nappes d'eau pour d'éventuelles inondations. Ainsi, pour les différents

secteurs, le modèle de simulation peut faire ressortir les débits et niveaux les plus critiques et fournir une représentation cartographique des zones habitées et des différentes infrastructures urbaines qui seront affectées lors des débordements, majeurs ou mineurs. À titre d'exemple, la cote critique fournie par le ministère de la Sécurité publique pour le secteur ouest de Sherbrooke (parc Saint-François) est de l'ordre de 1273 m³/s (MSP, 2008), ce qui correspond à une période de retour pour cette cote critique d'environ 5 ans pour la période entre 1994-2004, selon les données des débits enregistrés à la station hydrométrique 030208. Par ailleurs, pour chacun des sites, la limite supérieure de la berge a été localisée et son élévation a été déterminée. Cela a permis d'identifier pour chaque site un niveau critique au-delà duquel l'augmentation du niveau de l'eau devenait beaucoup plus sérieuse et risquée. La délimitation de cet élément caractéristique a été réalisée à partir des cartes des pentes lesquelles tirent leurs informations des modèles numériques d'élévation des différents sites à l'étude.

3.2. Recension des points d'élévation sur le terrain

Afin d'obtenir des données topographiques précises pour les différents secteurs à l'étude, des travaux de terrain ont été réalisés en 2006 et 2007. Les différents points d'élévation topographique ont été relevés à l'aide d'un appareil GPS de haute précision (Trimble, 5700 et 5800, mode RTK) et d'une station totale (Leica, TCR 705) permettant ainsi d'obtenir des données précises des élévations de terrain (microtopographie). Ces outils techniques ont été préférés à d'autres en raison de leur capacité de prélever et d'emmagasiner des données d'une haute précision verticale (c'est-à-dire plus ou moins un à deux centimètres d'erreur). Chaque secteur a été subdivisé en deux ou trois sites afin d'obtenir une représentation spatiale plus complète de la microtopographie. Puisque le GPS utilisé fonctionnait à partir des coordonnées provenant des points

géodésiques, la première étape de réalisation des levés topographiques a été le repérage de ces points situés le plus près des sites choisis. Une fois la base fixe de l'appareil installée sur le point géodésique, la partie mobile du GPS pouvait être déplacée et les points relevés à chaque déplacement. L'utilisation adéquate de la station totale nécessite un premier relevé de point GPS pour positionner l'appareil et un second pour l'orienter dans l'espace. La station totale permet d'obtenir de l'information sur la topographie, mais ne permet pas de situer spatialement avec une projection les secteurs échantillonnés. Le GPS a donc été utilisé en premier lieu afin de fournir des coordonnées MTM précises aux points échantillonnés à la station totale. Pour l'échantillonnage à l'aide de la station totale, des transects perpendiculaires à la rive à dix mètres d'intervalle chacun ont été réalisés. L'intervalle de dix mètres correspond à un compromis entre le temps d'acquisition des données, l'étendue du territoire couvert, la topographie du site (qui dans l'ensemble est relativement uniforme) et le nombre maximal de données dont il est possible d'acquérir en fonction de l'appareil d'acquisition utilisé, sachant que plus le nombre de données relevées est grand plus l'erreur lors de l'interpolation risque d'être faible. Le long de ces transects, un point d'élévation a été relevé à chaque rupture de pente de manière à représenter la microtopographie du terrain. La figure 2.3 nous montre un exemple de transects réalisés à l'aide de la station totale et les points sur l'image représentent chacun des points relevés à la station totale. Les transects ne peuvent pas toujours être en droite ligne ou à distance égale, en raison des différents obstacles rencontrés (ex. présence d'arbres). Il faut mentionner que cette méthode d'échantillonnage par transects a été choisie puisqu'elle permettait de couvrir de grandes surfaces, tout en permettant de bien structurer les travaux de terrain. Par ailleurs, puisque la topographie à l'intérieur de chacun des sites est relativement homogène et qu'un nombre suffisant de points d'élévation a été relevé afin d'obtenir une bonne évaluation de la topographie de

chaque site, cette méthode d'échantillonnage nous semblait la plus appropriée. Il est certain que l'ajout de points additionnels entre les transects augmente la précision des données sur la microtopographie. Toutefois, un échantillonnage totalement aléatoire des points d'élévation aurait également nécessité une interpolation puisqu'on ne peut obtenir, lors de travaux de terrain, des données d'élévation en toute localisation.

3.3. Création des modèles numériques d'élévation (MNE)

La création de modèles numériques d'élévation, c'est-à-dire la réalisation cartographique de surfaces topographiques représentant la surface terrestre au moyen de coordonnées et de descriptions numériques altitudinales, est une étape qui est souvent banalisée et réalisée sans grande précaution. Pour transformer des données précises en une surface topographique, il est nécessaire de réaliser une interpolation qui consiste à utiliser des données ponctuelles d'élévation, afin de créer une surface possédant des données d'élévation en tout lieu. Il existe un grand nombre d'interpolations basées sur différents principes et qui font en sorte de produire des surfaces topographiques totalement différentes, malgré l'utilisation de points d'élévation identiques. Il est donc nécessaire de porter une attention particulière au choix de la méthode d'interpolation afin de déterminer celle convenant le mieux à l'étude.

Pour élaborer le modèle avec la plus grande précision, plusieurs méthodes d'interpolation ont été testées afin de sélectionner la méthode optimale permettant d'obtenir une surface topographique représentant le plus fidèlement possible la «réalité topographique» de terrain. Les méthodes d'interpolation qui ont été testées sont le krigage, l'inverse de la distance et la fonction radiale, avec différentes variantes pour chaque méthode (Arnaud et Emery, 2000). Plusieurs paramètres ont également été modifiés et testés pour chacune de ces interpolations, tels que le nombre de points de

voisinage, la distance maximale de ces points, le modèle du semi-variogramme, la puissance, etc. (McCoy et Johnston, 2001). Afin d'évaluer le réalisme et l'exactitude des différentes interpolations et ainsi évaluer la qualité des modèles numériques d'élévation (MNE), certains indicateurs ont été comparés. La validation croisée a été utilisée de manière à valider correctement le MNE. Pour ce faire, des points permettant de créer le modèle numérique d'élévation ont été enlevés du fichier de données d'élévation avant l'interpolation. Ces derniers ont par la suite été superposés à la surface topographique réalisée afin de vérifier les différences d'élévation entre les points de base (ceux échantillonnés sur le terrain) et le modèle topographique interpolé (Chaplot *et al.*, 2006 ; Desmet, 1997). Pour mesurer ces différences, le RMSE (*Root Mean Square Error*) ou erreur quadratique moyenne a été utilisé. Celui-ci permet d'indiquer l'erreur moyenne ou l'écart entre les élévations échantillonnées sur le terrain et les résultats de l'interpolation sur l'ensemble d'un site à l'étude (Chaplot *et al.*, 2006). On peut ainsi connaître la marge d'erreur moyenne du MNE. Par ailleurs, une évaluation visuelle en trois dimensions des différentes surfaces topographiques interpolées a également été réalisée de manière à vérifier leur ressemblance avec la topographie du terrain. En effet, dans certains cas, les données statistiques comme le RMSE peuvent donner de très bons résultats, c'est-à-dire que l'erreur peut être très faible, toutefois la surface topographique créée peut montrer certaines caractéristiques ne représentant pas adéquatement la réalité de terrain, telle que la présence de pics ou de creux distinctifs. La méthode d'interpolation donnant la surface la plus conforme à la réalité de terrain (validation croisée, RMSE et évaluation visuelle) a été retenue et les modèles numériques d'élévation ont été créés à partir de celle-ci. Les tests sur les méthodes d'interpolation ont été réalisés sur le site qui semblait le plus représentatif de l'ensemble des sites. Suite aux différents tests, la méthode d'interpolation optimale a été contre-vérifiée avec un autre site comparable afin de s'assurer de la similitude des

résultats. Pour plus de précision, une validation croisée et le calcul du RMSE ont été réalisés pour chaque site afin de vérifier les marges d'erreur. La figure 2.4 représente un schéma du fonctionnement de la validation croisée. Cette représentation imagée permet une meilleure compréhension de son fonctionnement.

3.4. Données hydrologiques et courbes de tarage

La réalisation du modèle de simulation des niveaux d'inondation implique également l'utilisation de données hydrologiques. La compilation de données sur les débits et les niveaux de la rivière permet de caractériser l'ampleur de la crue ou de l'inondation et d'évaluer avec le modèle de simulation, l'étendue et la limite atteinte par la nappe d'eau lors du débordement. Les données de débits et de niveaux utilisées proviennent de trois sources principales, dont le CD-ROM Hydat (Environnement Canada), les données et graphiques du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), en plus des niveaux relevés sur le terrain à l'aide de la station totale et des tiges repères. Dans le secteur de Sherbrooke pour lequel les données hydrologiques sont en nombre suffisant, il a été possible de tracer une courbe de tarage afin de lier les niveaux d'eau et les débits. En effet, la station hydrométrique 030208 du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) (équivalente à la station 02OE005 d'Environnement Canada), située au parc Saint-François à Sherbrooke, est en opération depuis 1915. Un grand intervalle de données hydrologiques est donc disponible permettant la réalisation d'une relation entre les débits et niveaux d'eau pour ce secteur d'étude. Il existe également d'autres stations du CEHQ et d'Environnement Canada le long du tronçon à l'étude de la rivière Saint-François, dont notamment à Windsor, Richmond et Drummondville.

3.5. Principales difficultés méthodologiques rencontrées

La réalisation du modèle de simulation a comporté des difficultés de manipulation ou de réalisation à plusieurs niveaux, mais la principale réside dans la représentation de la microtopographie. De manière générale, la représentation topographique pour de grandes surfaces est un domaine assez bien développé, cependant, la représentation de la microtopographie intègre des éléments plus complexes, puisqu'elle implique la représentation de très petits éléments du relief qui nécessite l'utilisation de données de haute précision. Pour obtenir des données précises, de nombreux relevés de terrain ont été réalisés avec l'utilisation d'appareils de haute précision (cf. section 3.2). Toutefois, ces mesures deviennent plus difficiles à recueillir avec la présence d'une couverture forestière relativement dense, ce qui a été le cas dans certains sites boisés. Un autre problème relève de la réalisation des interpolations. La principale difficulté en lien avec les interpolations réside au temps alloué pour réaliser les différents tests des méthodes d'interpolation et des paramètres à modifier pour chacune des méthodes retenues. Une autre difficulté se situe au niveau de la représentativité d'un site par rapport aux autres en contexte d'interpolation de la microtopographie. En effet, la représentativité est diminuée dans ce contexte puisqu'en tenant compte de la microtopographie, c'est-à-dire de très faibles variations topographiques, les sites ont des caractéristiques particulières qui les distinguent des autres. Ils produisent ainsi des résultats relativement différents et, du fait même, différentes erreurs pour une même méthode d'interpolation et des paramètres identiques d'interpolation. Cette particularité a complexifié le choix d'une méthode d'interpolation commune à l'ensemble des sites à l'étude.

Enfin, l'acquisition d'un nombre suffisant de données hydrologiques a été relativement difficile, et comme les données proviennent de sources diverses, certaines

manipulations ont été nécessaires afin de les rendre compatibles. La concordance entre les niveaux d'eau et la topographie du terrain (données d'élévation) fut également un élément à prendre en compte dans les difficultés d'élaboration du modèle. Puisque ces données proviennent également de sources diverses, il a fallu s'assurer de la validité de la correspondance entre ces données. Pour ce faire, des cartes provenant du modèle de simulation ont été comparées à des cartes semblables réalisées par la municipalité de Sherbrooke.

4. Résultats et discussion

4.1. Présentation des cartes des niveaux d'inondation

Plusieurs cartes ont été réalisées dont certaines montrent l'étendue des nappes d'eau lors d'inondations passées, tandis que d'autres mettent en évidence les débits et niveaux au-delà desquels les infrastructures urbaines sont affectées par les nappes d'eau ou risque de l'être lors de débordements. À titre d'exemple, la figure 2.5 illustre une carte des niveaux d'inondation réalisée à partir du modèle de simulation des niveaux d'inondation pour un secteur de la Ville de Sherbrooke situé à proximité du pont Aylmer. Les niveaux représentés correspondent à des niveaux atteints lors des inondations du 19 avril 1982 et du 30 octobre 2003. La représentation cartographique de ces inondations permet également la validation du modèle de simulation, puisque pour certaines de ces inondations les données de leur étendue sont connues. En effet, les résultats du modèle de simulation peuvent être comparés à des photographies ou des informations provenant de journaux (cf. sections 1 et 2). De cette façon, il est possible de vérifier si le modèle de simulation représente adéquatement l'étendue des nappes d'eau lors d'un débordement. Sur la figure 2.5, en plus d'observer les limites

atteintes par les nappes d'eau lors des inondations, on peut également examiner les limites de récurrence des crues de 20 et 100 ans des cartes du risque d'inondation d'Environnement Canada et du ministère de l'Environnement du Québec (1982). En regroupant ces données, on peut voir que l'inondation du 30 octobre 2003 fut d'une importance limitée se situant à quelques mètres de la limite de récurrence de 20 ans, et que seule une partie du parc Saint-François, situé le long de la rivière, fut affectée par la montée des eaux. On peut également constater qu'aucune infrastructure urbaine d'importance située dans ce secteur n'a été affectée par cette crue. Par contre, l'inondation du 19 avril 1982 a été beaucoup plus importante dépassant en plusieurs endroits la limite de récurrence des inondations de 100 ans. Lors de cette inondation, la nappe d'eau a atteint de grandes superficies, inondant plusieurs secteurs urbains. Cette inondation a d'ailleurs été l'une des plus catastrophiques du siècle dernier.

Les figures 2.6, 2.7 et 2.8 représentent toujours le même site que celui de la figure 2.5. Sur la figure 2.6, on peut observer les différentes classes de pente de ce secteur et plus précisément l'inclinaison ou la dénivellation des pentes. Ainsi, les couleurs plus foncées indiquent des pentes plus fortes et les couleurs plus pâles des pentes douces. On peut donc facilement noter que près de la rive la pente est très abrupte (notamment en raison de la présence d'un mur bétonné) et qu'elle devient ensuite pratiquement nulle, facilitant ainsi l'implantation de différentes infrastructures. Enfin pour ce site, la présence de ce mur bétonné peut limiter la propagation de l'eau, ce qui explique qu'un débit relativement élevé, comme celui de l'inondation du 30 octobre 2003, n'ait atteint que très légèrement le replat de la zone inondable.

Enfin, l'utilisation de la carte des pentes permet également d'identifier la limite supérieure de la berge (figure 2.6), endroit à partir duquel la pente devient pratiquement

nulle et où se concentrent généralement les infrastructures urbaines. Aussi, à cet endroit, les variations du niveau d'eau sont généralement plus faibles et entraînent des variations importantes de l'étendue de la nappe d'eau. On peut observer cette particularité sur la figure 2.7, où plusieurs débits différents sont représentés. Ainsi, pour des débits variables, les limites d'inondation varient beaucoup et la différence de distance, entre les limites d'eau, devient plus grande en zone plane. La limite supérieure de la berge, dans les zones de rupture, constitue donc un endroit critique à partir duquel il faut porter davantage d'intérêt puisque le risque d'inondation y est plus élevé. Enfin, pour ce site, il a été établi que la limite supérieure de la berge était située à une élévation moyenne de 146 mètres, mais cette valeur diffère quelque peu d'un endroit à l'autre suivant les variations topographiques le long de la berge.

De plus, sur chacune des figures 2.8 et 2.9, on peut comparer l'étendue sur le terrain des nappes d'eau pour divers débits et niveaux d'eau. La figure 2.8 indique les limites d'inondation selon des intervalles de niveau d'un mètre, tandis que la figure 2.9 renseigne sur les limites d'inondation pour des intervalles relatifs aux débits. La figure 2.8 représente un complément au MNE puisqu'elle expose un grand nombre de niveaux d'eau et donc d'élévations. Cette carte fournit également des renseignements sur les niveaux les plus critiques à partir desquels des infrastructures risquent d'être affectées par la montée des eaux. À partir du niveau de 147 mètres, par exemple, les rues Saint-François Nord, Déziel et Windsor sont partiellement submergées, de même que quelques bâtiments. De plus, une variation d'un mètre (ou moins) du niveau d'eau, amène une reconfiguration des limites d'inondation. Par exemple, l'atteinte du niveau à 148 mètres d'élévation entraîne l'inondation de plusieurs résidences situées à l'est de la rue Bowen Nord. Dans un même ordre d'idée, la figure 2.9 indique les limites d'inondation pour des variations du débit de 200 m³/s et permet une comparaison des

distances atteintes par les nappes d'eau en fonction de ces différents débits. Cette carte permet également d'identifier des débits critiques. Par exemple, un débit de 2000 m³/s implique l'inondation d'une grande partie du site à l'étude et donc la submersion partielle ou même complète de plusieurs rues et bâtiments. Les débits de 1800 et 2200 m³/s sont également des seuils critiques à partir desquels plusieurs infrastructures sont affectées.

4.2. Autres résultats

Les différentes cartes présentées dans cet article touchent plus spécifiquement les niveaux et débits propres au site SHE-2, localisé à Sherbrooke, près du pont Aylmer. Des résultats semblables, mais avec des valeurs de débits et niveaux différents, ont également été générés pour les autres sites à l'étude, à l'aide de ce modèle de simulation des niveaux d'inondation. Les différentes cartes produites permettent d'évaluer les débits et niveaux critiques à plusieurs endroits à risque le long de la rivière Saint-François. Elles rendent également possible la comparaison du comportement des nappes d'eau lors de crues ou d'inondations, dépendamment de la configuration et de la morphologie de la rive, des pentes et de la localisation des plaines inondables. Soulignons que l'ensemble des résultats obtenus pour les autres sites ne sont pas représentés dans cet article, toutefois l'application du modèle de simulation pour la Ville de Sherbrooke fournit ici un exemple concret des possibilités de ce modèle qui, pourrait d'ailleurs, être appliqué à plusieurs autres municipalités du Québec affectées par des inondations périodiques.

5. Conclusion

Le modèle de simulation des niveaux d'inondation fournit une évaluation des limites des nappes d'eau lors des crues de la rivière Saint-François dans les différents secteurs analysés, dont des exemples concrets pour la Ville de Sherbrooke. La simulation des niveaux d'eau pour des territoires restreints, mais topographiquement très détaillés, a nécessité l'expérimentation de plusieurs méthodes et techniques dont la création de modèles numériques d'élévation de haute précision. Pour ce faire, les méthodes de collecte de données furent choisies en conséquence et de nombreuses méthodes d'interpolation furent testées. La réalisation de ces étapes a permis l'obtention de modèles numériques d'élévation avec des erreurs (RMSE) de l'ordre d'une vingtaine de centimètres. Cette précision des surfaces topographiques a permis de représenter adéquatement de faibles variations de la topographie et ainsi, les effets des faibles variations des débits et niveaux d'eau. Le modèle de simulation des niveaux d'inondation a donc l'avantage de représenter des formes du relief de petite superficie (quelques mètres), en comparaison à la plupart des cartes du risque d'inondation qui sont peu précises. Ainsi, certaines formes du relief deviennent perceptibles et peuvent permettre d'expliquer l'étendue des masses d'eau sur les plaines inondables en période critique. Par exemple, il devient possible d'identifier la limite supérieure de la berge, les légères concavités de la plaine inondable qui permettent à l'eau de s'accumuler de même que les convexités qui facilitent son écoulement. Appliqué aux zones urbaines, ce modèle de simulation permet de localiser avec précision les infrastructures affectées lors de divers débordements de la rivière, et ceci devient possible par l'utilisation d'un système d'information géographique (SIG) qui permet d'associer les MNE et les niveaux d'eau à des bases de données vectorielles et matricielles représentant des infrastructures urbaines (chemins de fer, routes, résidences, autres bâtiments, etc.). Ce modèle fournit donc des résultats d'une grande précision et permet une cartographie

détaillée des niveaux d'inondation et des infrastructures qui sont touchées ou qui sont susceptibles de l'être. L'utilisation de cet outil pourrait faciliter grandement le travail de contrôle et de gestion des inondations et des mesures de sécurité pour les municipalités riveraines de la rivière Saint-François et pour beaucoup d'autres municipalités affectées par les inondations périodiques, et pourrait guider des plans d'intervention ciblés par secteur. Enfin, ce modèle de simulation des niveaux d'inondation contribue à assurer une plus grande sécurité aux populations riveraines et aux infrastructures qui sont fréquemment affectées par les inondations, et pourrait servir d'outil d'aide à la décision dans le réaménagement des zones le long des rivières.

Les résultats fournis par le modèle de simulation sont particulièrement intéressants du fait de la précision obtenue pour représenter la topographie des terrains à l'étude. Le modèle permet donc de déterminer avec une grande précision l'étendue des nappes d'eau lors d'inondations, améliorant ainsi la cartographie des inondations déjà existante. Les résultats obtenus avec l'élaboration de ce modèle de simulation des niveaux d'eau pourraient donc être utilisés par plusieurs autres municipalités riveraines. Toutefois, étant donné le temps relativement long alloué à l'acquisition des données d'élévation, il est souhaitable d'évaluer l'étendue du territoire à cartographier et la proximité des infrastructures et populations et de cibler les secteurs les plus problématiques. Si le territoire est relativement restreint et que les données hydrologiques pour ce territoire sont disponibles, l'utilisation du modèle de simulation est largement recommandée puisqu'il peut améliorer les plans d'intervention face à des situations de risque pour la sécurité des populations. Dans le cadre d'un plan de mesures d'urgence, le modèle de simulation des niveaux d'inondation pourrait être utilisé par les municipalités afin de mettre en place un programme effectif d'évacuation.

des populations. Le modèle permet d'identifier avec précision les infrastructures touchées dépendamment de différents débits et niveaux. Il devient ainsi possible de cibler les résidences et bâtiments publics à évacuer et donc d'agir efficacement en identifiant les zones d'évacuation prioritaires. De plus, puisque les municipalités doivent identifier leurs zones inondables, les données d'élévation utilisées dans le modèle de simulation des niveaux d'inondation pourraient également être utilisées pour délimiter les zones inondables (MSP, 1998). Par ailleurs, en plus d'être utilisé en milieu urbain, le modèle de simulation pourrait être également utilisé en milieu naturel ou semi-naturel et servir de guide dans l'aménagement des rives et des plaines inondables et pour la protection de ces milieux.

Remerciements

Ce projet s'inscrit dans un programme de recherche dirigé par la professeure Diane Saint-Laurent (Géographie, UQTR). L'auteure tient à remercier les différents organismes subventionnaires qui appuient financièrement ce projet de recherche, dont le CRSNG et le FQRNT, ainsi que le Centre d'études universitaires de l'Université du Québec à Trois-Rivières (C.E.U.). Nous tenons à remercier la professeure Diane Saint-Laurent pour son aide et ses conseils de même que Monsieur Pierre-André Bordeleau (UQTR) pour son soutien technique à la réalisation des différentes phases de ce projet.

Références bibliographiques

- ARNAUD, M. et X. EMERY (2000). *Estimation et interpolation spatiale : méthodes déterministes et géostatistiques*, Paris, Hermès, 216 p.
- BATES, P. D. et A. P. J. DE ROO (2000). «A simple raster-based model for flood inundation simulation», *Journal of hydrology*, vol. 236, p. 54-77.
- BLIN, P. (2001). «Développement d'une nouvelle méthode de cartographie du risque unitaire d'inondation (CRUE) pour les résidences», Mémoire de maîtrise, Université du Québec, INRS-EAU, 94 p.
- CHANDLER, J. (1999). «Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research», *Earth Surface processes and landform*, vol. 24, p. 51-63.
- CHAPLOT, V., F. DARBOUX, H. BOURENNANE, S. LEGUÉDOIS, N. SILVERA et K. PHACHOMPHON (2006). «Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density», *Geomorphology*, vol. 77, p. 126-141.
- COUTURE, C. (2001) «Étude spatio-temporelle des inondations du bassin versant de la rivière Saint-François, Québec, Canada», Rapport d'activité de maîtrise, Université du Québec à Montréal, Montréal, 92 p.
- DE ROO, A. P. J., C. G. WESSELING et W. P. A. VAN DEURSEN (2000). «Physically based river basin modelling within a GIS: the LISFLOOD model», *Hydrological processes: Geocomputation in Hydrology and Geomorphology*, vol. 14, no. 11-12, p. 1981-1992.
- DESMET, P. J. J. (1997). «Effects of interpolation error on the analysis of DEMs», *Earth surface processes and landforms*, vol. 22, p. 563-580.
- ENVIRONNEMENT CANADA (2001). Relevés hydrologiques du Canada, CD ROM HYDAT.
- ENVIRONNEMENT CANADA ET MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DU QUÉBEC (1982). Carte des zones inondables en eau libre, bassin de la Rivière Saint-François. Échelle 1:10 000, feuillets 21E/05-100-0401, 21E/05-100-5226, 21E/05-100-5227, 21E/12-100-5228, 31H/09-100-0204, 31H/09-100-5229.
- GILVEAR, D. et R. Bryant (2003). «Analysis of aerial photography and other remotely sensed data», in KONDOLF, G. M. et H. PIÉGAY, *Tools in fluvial geomorphology*, Chippenham, United Kingdom, John Wiley & sons, p. 135-170.
- HORRITT, M. S. et P. D. BATES (2001). «Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite-element approach», *Hydrological Processes*, vol. 15, p. 825-842.
- MARKS, K. et P. D. BATES (2000). «Integration of high-resolution topographic data with floodplain flow models», *Hydrological processes: Geocomputation in Hydrology and Geomorphology*, vol. 14, no. 11-12, p. 2109-2122.

MCCOY, J. et K. JOHNSTON (2001). *Using ArcGis Spatial Analyst*, Redlands, ESRI Press, 230 p.

MINISTÈRE DE LA SÉCURITÉ PUBLIQUE DU QUÉBEC. Sécurité civile. Site Internet, dernier accès : 20 février 2008. <http://www.msp.gouv.qc.ca/secivile/dotsc/cnv/tableaux/estrie.pdf>

MINISTÈRE DE LA SÉCURITÉ PUBLIQUE, MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES DU QUÉBEC (1998). «Guide pour déterminer et délimiter les zones inondables / Édition préliminaire». Québec, 85 p.

MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES DU QUÉBEC (2000). Base de données topographique du Québec (BDTQ), 1 : 20 000, feuillets 21E/05-200-0202, 21E/12-200-0101, 31H/09-200-0102, 31H/09-200-0202, 31H/15-200-0202, 31H/16-200-0101, 31H/16-200-0102, 31H/16-200-0201.

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS. Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). Site Internet, dernier accès : 03 octobre 2007. <http://www.cehq.gouv.qc.ca>

OVERTON, I. C. (2005). «Modelling floodplain inundation on a regulated river: integrating GIS, remote sensing and hydrological models», *River research and applications*, vol. 21, no. 9, p. 991-1001.

RESSOURCES NATURELLES CANADA (1996). Base nationale de données topographiques (BNDT), 1 : 50 000, feuillets 21E/05, 21E/12, 31H/09, 31H/15, 31H/16.

SAINT-LAURENT, D., C. COUTURE et É. MCNEIL (2001). «Spatio-temporal analysis of floods of the Saint-François drainage basin, Québec, Canada», *Environments*, vol. 29, no. 2, p. 73-90.

SAINT-LAURENT, D. et J.-P. SAUCET (2003). «Chronological reconstitution of floods of the Saint-François Drainage Basin, Québec, Canada», *Proceedings of the third Canadian Conference on Geotechnique and Natural Hazards*, June 8-10th, Edmonton, Alberta, Canada, p. 89-94.

TOWNSEND, P. A. et S. J. WALSH (1998). «Modeling floodplain inundation using an integrated GIS with radar optical remote sensing», *Geomorphology*, vol. 21, p. 295-312.

WISE, S. (2000). «Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours», *Hydrological processes*, vol. 14, p. 1909–1929.

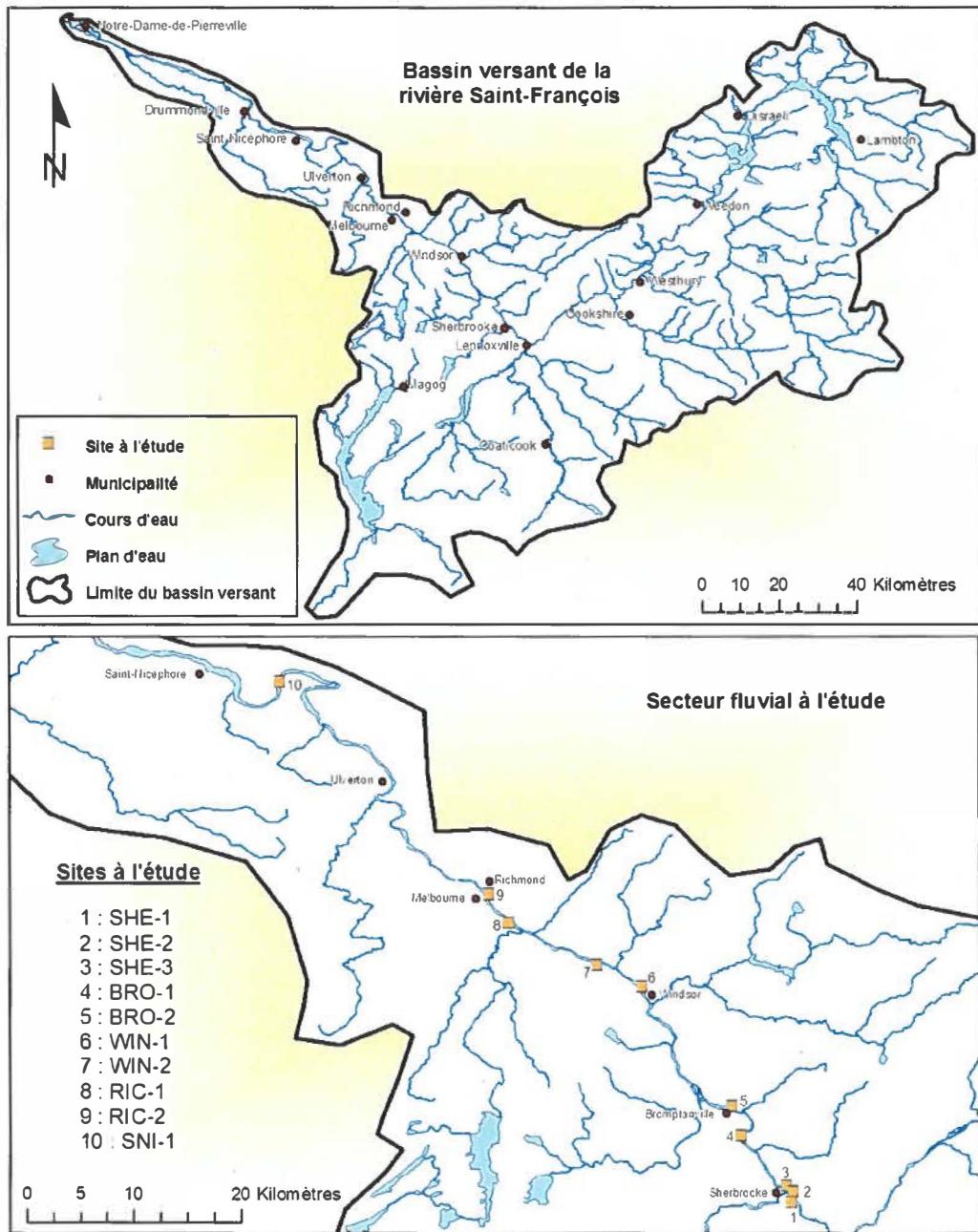


Figure 2.1
Localisation du bassin versant de la rivière Saint-François et des sites à l'étude

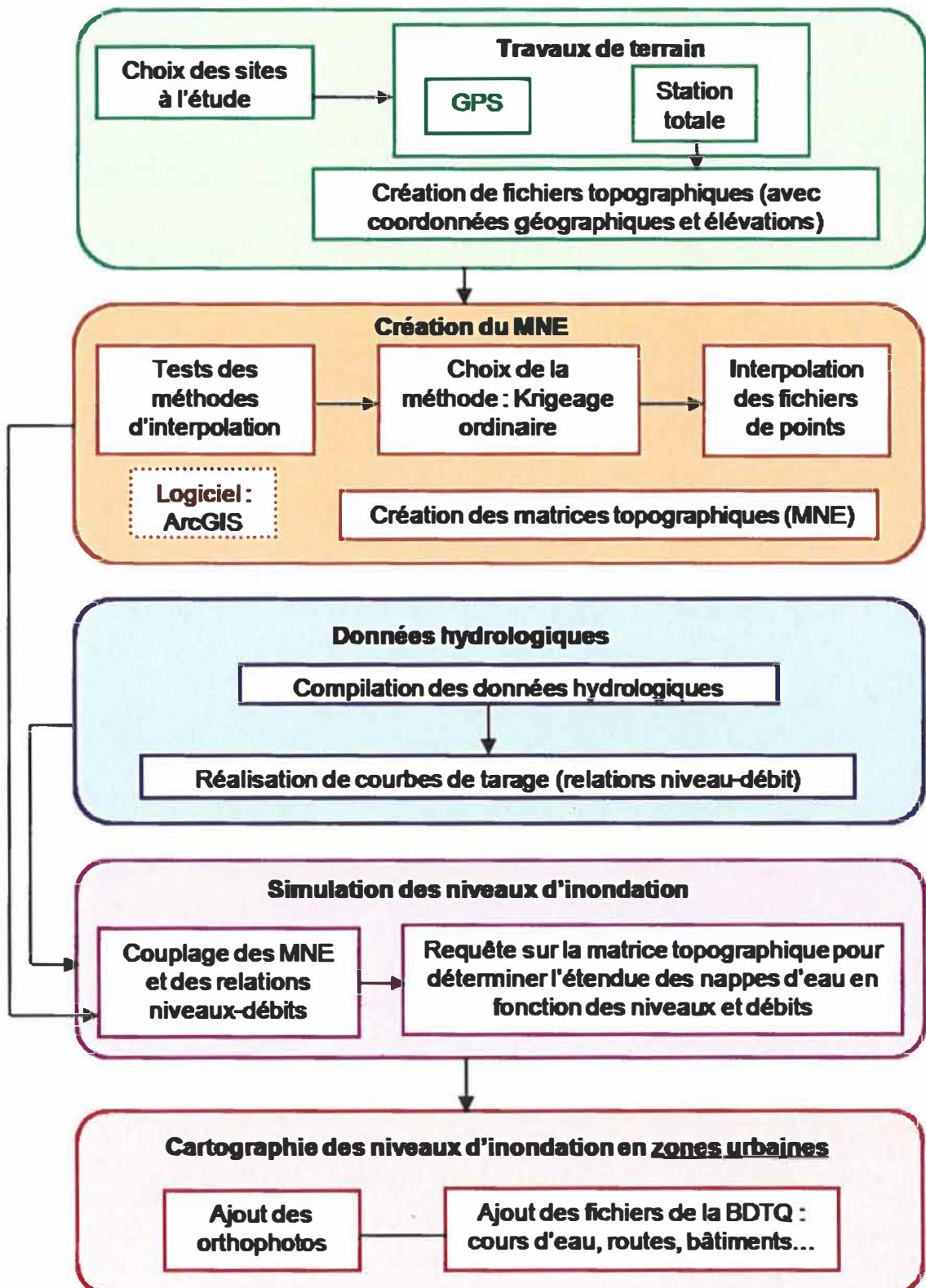


Figure 2.2

Schéma méthodologique du modèle de simulation des niveaux d'inondation

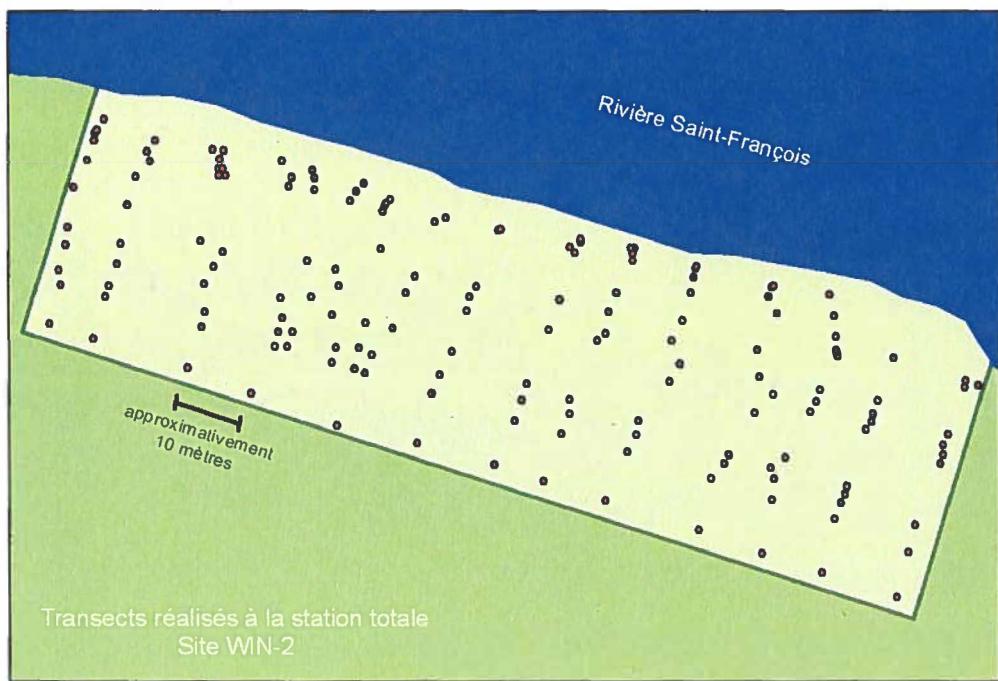


Figure 2.3

Exemple de l'échantillonnage par transects réalisé à la station totale

(Source : BDTQ, 1 : 20 000, Ministère des Ressources naturelles du Québec, 2000)

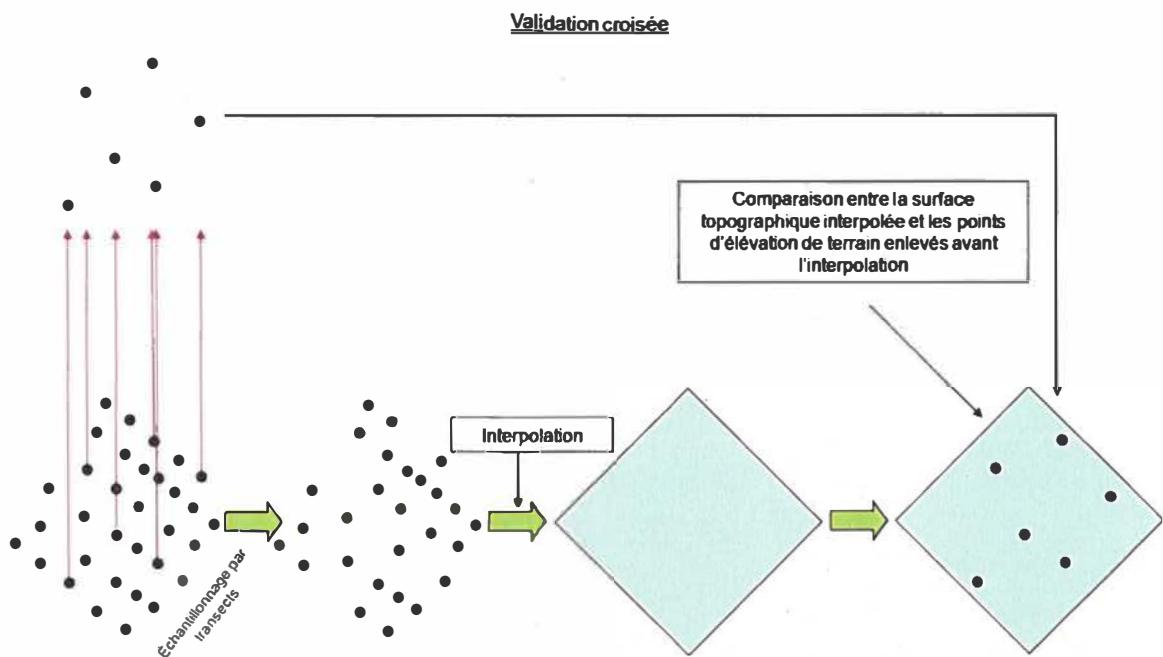


Figure 2.4
Schéma explicatif de la validation croisée

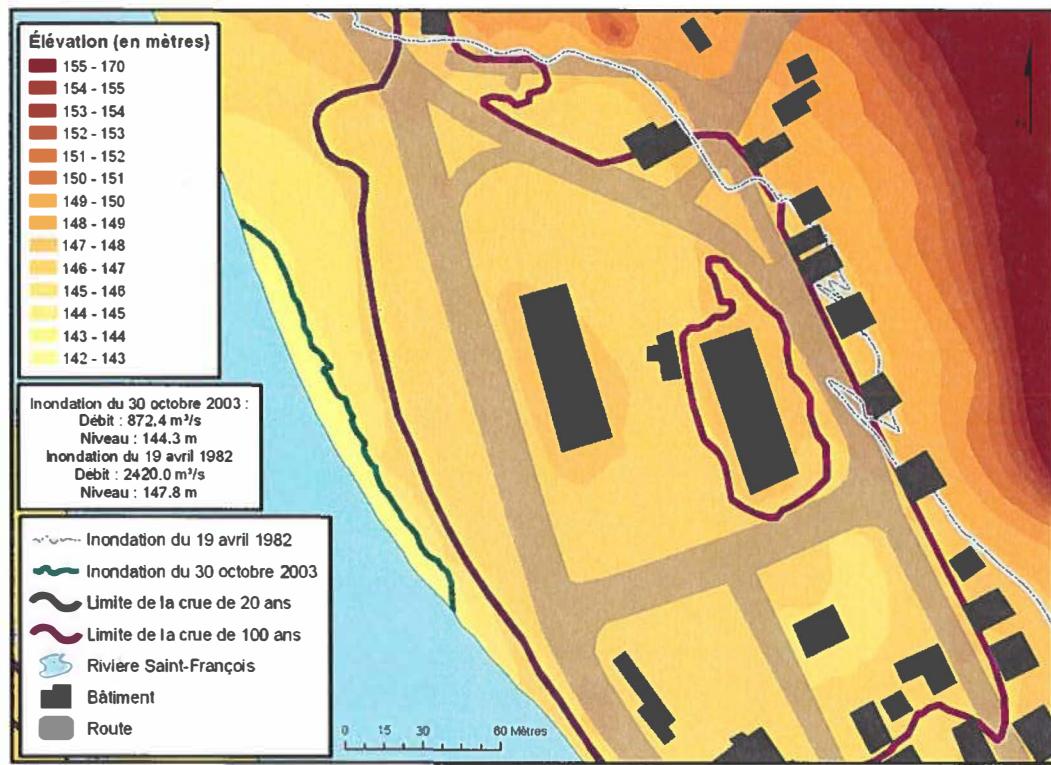


Figure 2.5
Représentation des inondations de 1982 et 2003 (Site SHE-2)

(Source : BDTQ, 1 : 20 000, Ministère des Ressources naturelles du Québec, 2000 ; Orthophotos 1 : 40 000, Ministère des Ressources naturelles du Québec, 2000 ; Débits et niveaux, Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), <http://www.cehq.gouv.qc.ca>).

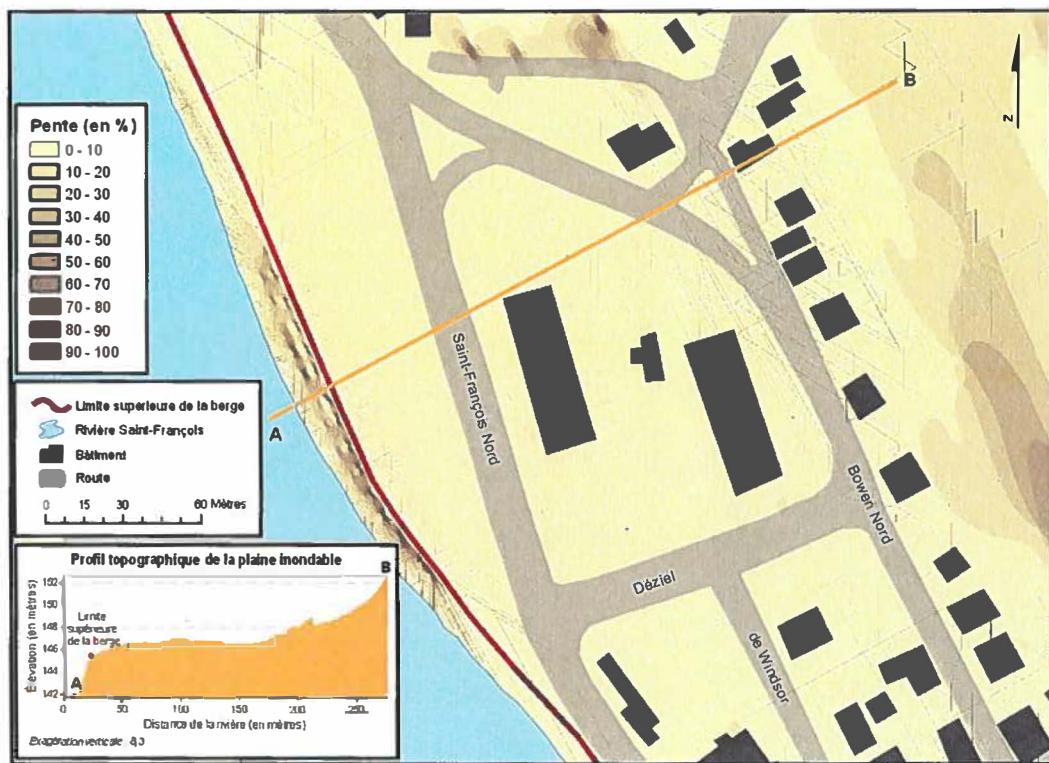


Figure 2.6

Les pentes et la localisation de la limite supérieure de la berge (Site SHE-2)

(Source : BDTQ, 1 : 20 000, Ministère des Ressources naturelles du Québec, 2000 ; Orthophotos 1 : 40 000, Ministère des Ressources naturelles du Québec, 2000).

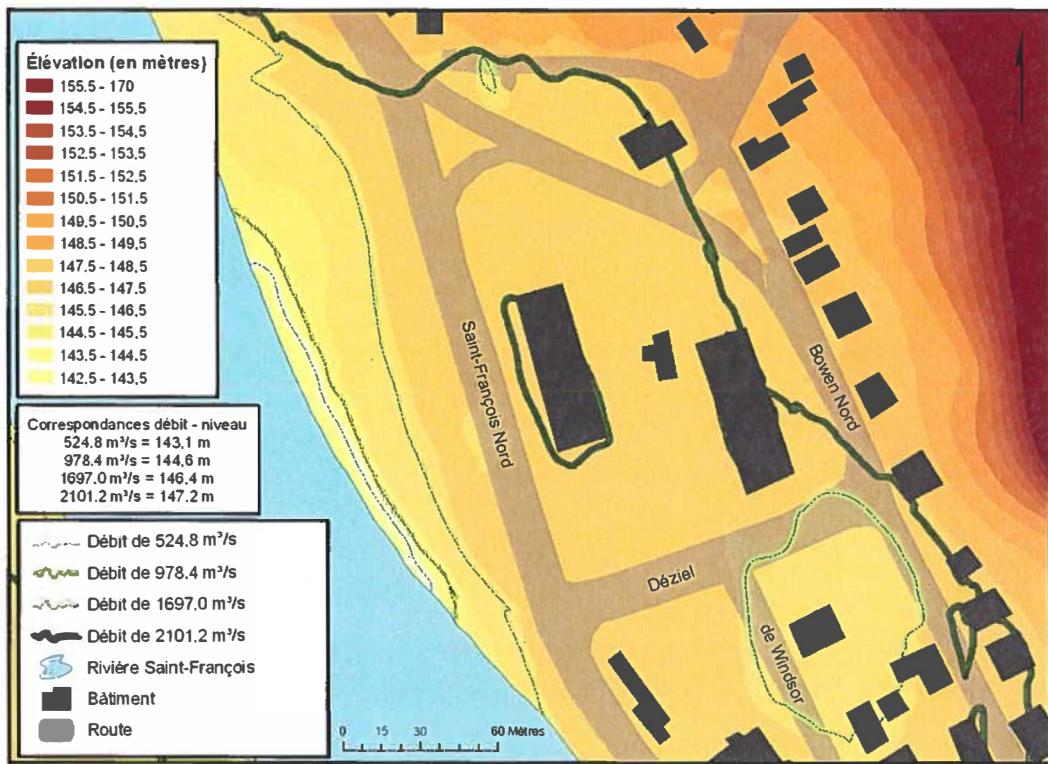


Figure 2.7
Les limites d'inondation pour quatre débits différents (Site SHE-2)

(Source : BDTQ, 1 : 20 000, Ministère des Ressources naturelles du Québec, 2000 ; Orthophotos 1 : 40 000, Ministère des Ressources naturelles du Québec, 2000 ; Débits et niveaux, Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), <http://www.cehq.gouv.qc.ca>)

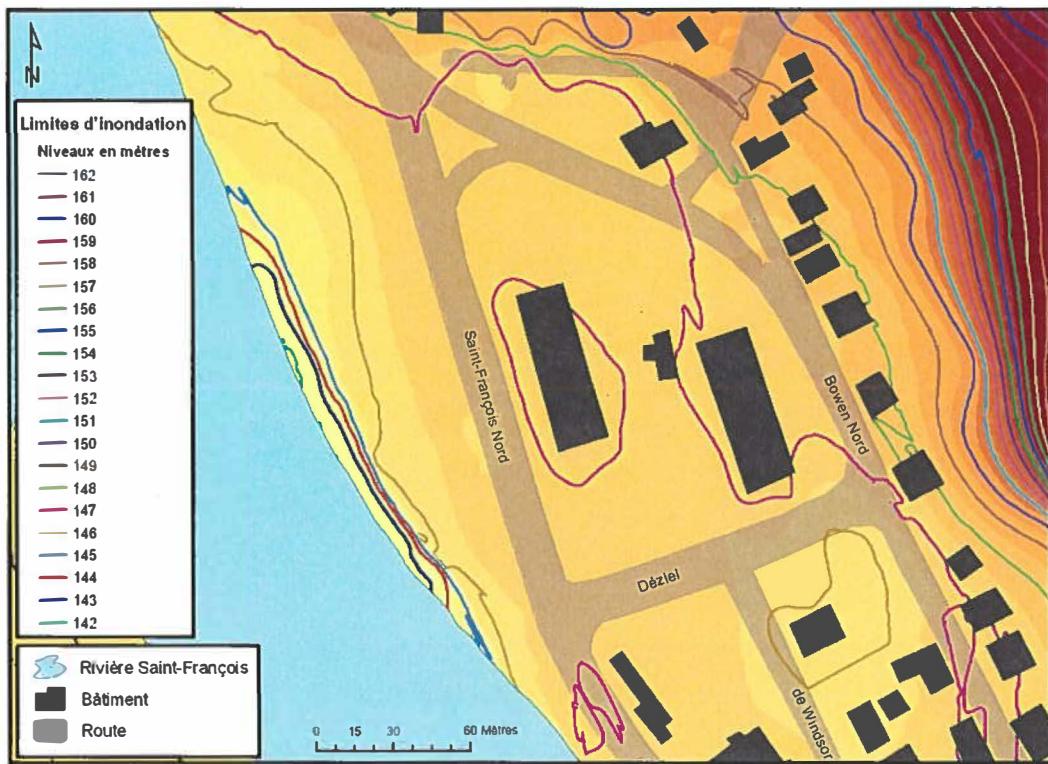


Figure 2.8

(Source : BDTQ, 1 : 20 000, Ministère des Ressources naturelles du Québec, 2000 ; Orthophotos 1 : 40 000, Ministère des Ressources naturelles du Québec, 2000 ; Débits et niveaux, Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), <http://www.cehq.gouv.qc.ca>)

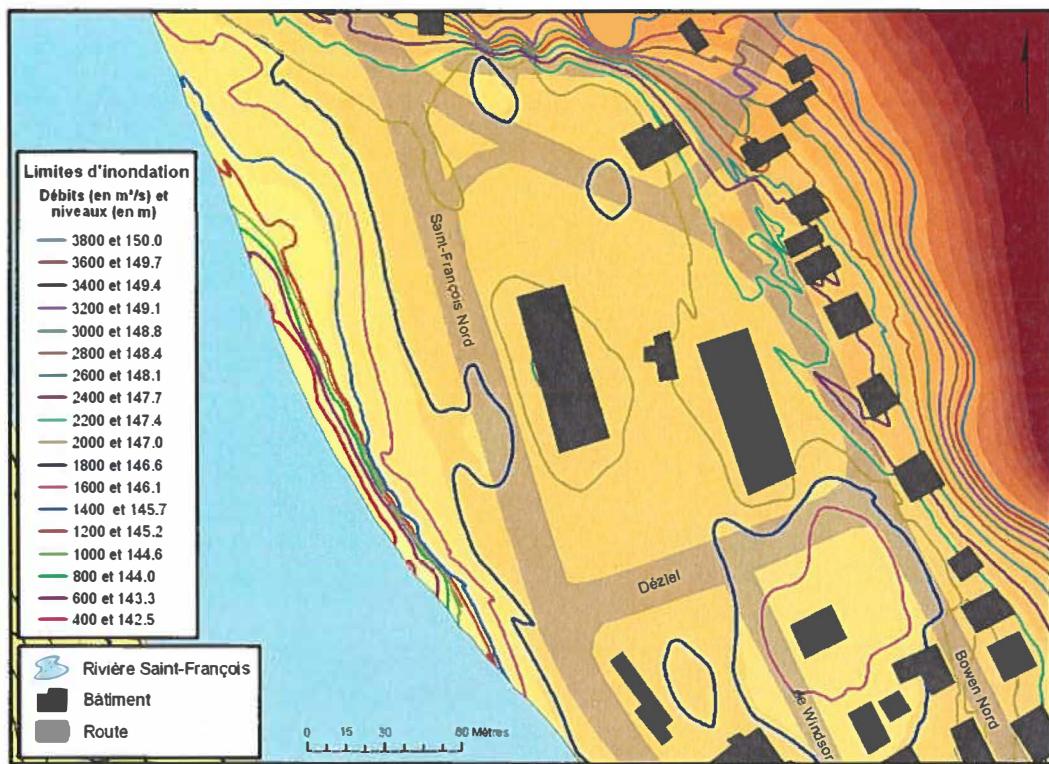


Figure 2.9

Les limites d'inondation en fonction de la variation des débits (Site SHE-2)

(Source : BDTQ, 1 : 20 000, Ministère des Ressources naturelles du Québec, 2000 ; Orthophotos 1 : 40 000, Ministère des Ressources naturelles du Québec, 2000 ; Débits et niveaux, Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), <http://www.cehq.gouv.qc.ca>).

CHAPITRE 3
DEUXIÈME ARTICLE

**COMPARAISON DE MÉTHODES D'INTERPOLATION AFIN DE RÉALISER DES
MODÈLES NUMÉRIQUES D'ÉLÉVATION (MNE) DE HAUTE PRÉCISION POUR LA
REPRÉSENTATION MICROTOPOGRAPHIQUE DES PLAINES INONDABLES**

Ariane Drouin¹, Diane Saint-Laurent²,

¹Université du Québec à Trois-Rivières, Sciences de l'environnement,
Département de chimie-biologie, 3351, boulevard des Forges, Trois-Rivières, Québec,
Canada, G9A 5H7
ariane.drouin@uqtr.ca

²Université du Québec à Trois-Rivières, Géographie, Laboratoire de recherche en
géomorphologie fluviale, 3351, boulevard des Forges, Trois-Rivières, Québec, Canada,
G9A 5H7

RÉSUMÉ

La microtopographie des zones inondables peut influencer l'étendue des secteurs submergés lors des crues provoquant des inondations. Ce projet vise la comparaison de méthodes d'interpolation pour la réalisation de modèles numériques d'élévation (MNE) de haute précision représentant la microtopographie des plaines d'inondation. Les méthodes d'interpolation ont été comparées au moyen d'un Système d'Information Géographique (SIG) afin d'identifier celles étant les plus efficaces dans un cadre microtopographique et avec un nombre restreint de données d'élévation. L'efficacité de chacune des méthodes d'interpolation a été validée (validation croisée) au moyen du *Root Mean Square Error* (RMSE), de tests statistiques, de cartes de l'erreur, et d'une évaluation visuelle en trois dimensions. Il en ressort que les méthodes d'interpolation du krigeage simple, de la fonction radiale, du réseau de triangles irréguliers et du krigeage ordinaire représentent le plus adéquatement la microtopographie des terrains à l'étude, tandis que les méthodes d'interpolation de l'inverse de la distance et du krigeage universel produisent des erreurs élevées.

MOTS CLÉS

Modèle numérique d'élévation (MNE), Système d'information géographique (SIG), microtopographie, plaine inondable, méthodes d'interpolation, paramètres d'interpolation

1. INTRODUCTION

La cartographie des inondations permet d'évaluer et de représenter l'étendue spatiale des zones submergées lors d'inondations ou de crues, et de mieux évaluer les risques pour les populations riveraines et la protection des infrastructures. Il existe différentes méthodes de représentation cartographique des plaines inondables. Parmi ces méthodes, les images satellitaires de types optiques (Bates & De Roo, 2000; Gilvear & Bryant, 2003; Overton, 2005) et radars (Townsend & Walsh, 1998) permettent d'identifier et de délimiter les zones inondées lors de périodes de crue. La représentation de la topographie des plaines inondables au moyen d'un modèle numérique d'élévation (MNE) apparaît comme une autre méthode de cartographie des limites des zones d'inondation (Marks & Bates, 2000; Townsend & Walsh, 1998; Wise, 2000). Les MNE peuvent être réalisés à l'aide de différentes données de base, tels que les photographies aériennes (Horritt & Bates, 2001), les courbes de niveau, les points cotés, les données ponctuelles d'élévation provenant du LIDAR (*Light Detection And Ranging*), de GPS (*Global Positioning System*), ou de stations totales par exemple. Les données de base utilisées doivent être fonction de l'échelle du territoire à l'étude et de la précision des données souhaitée pour répondre aux objectifs de recherche.

Ainsi, pour l'analyse et la cartographie des plaines inondables, il est nécessaire d'utiliser des données d'élévation de haute précision afin d'obtenir la microtopographie de ces composantes fluviales. La représentation de la microtopographie a été peu explorée, notamment en milieu riverain. Des études sur la représentation des plaines d'inondation à petite échelle ont en effet été réalisées (Chandler, 1999; Gilvear & Bryant, 2003), mais très peu à grande échelle sur la microtopographie des plaines inondables, malgré leur importance sur les secteurs submergés lors d'inondations, sur l'affectation des bâtiments et populations de même que sur la déposition des sédiments le long des plaines alluviales. En effet, de très faibles variations de la topographie en zones inondables peuvent avoir un effet non négligeable sur l'étendue des nappes d'eau. De plus, des formes topographiques de petite dimension peuvent influencer l'écoulement ou l'accumulation de l'eau lors de périodes d'inondation. Il est donc pertinent de réaliser une étude permettant de représenter le plus adéquatement possible les formes topographiques mineures des plaines inondables. La réalisation de

modèles numériques d'élévation (MNE) de haute précision permet justement d'obtenir une représentation cartographique fine des modifications topographiques.

De nombreux éléments influencent la qualité des modèles numériques d'élévation, notamment les données sources et les méthodes et paramètres d'interpolation utilisés (Desmet, 1997; MacEachren & Davidson, 1987; Weber & Englund, 1994). Les résultats produits par diverses méthodes d'interpolation lors de la réalisation de MNE à petite échelle a été largement étudié, toutefois ces méthodes d'interpolation produisent-elles les mêmes résultats dans le cadre de la représentation de la microtopographie ? En effet, l'étude des méthodes d'interpolation en fonction de la microtopographie (des plaines inondables notamment) est un domaine qui a été négligé par la recherche, mais qui tend à se développer depuis les dernières années avec une accessibilité plus grande des données LIDAR (Anderson *et al.*, 2005; Chaplot *et al.*, 2006; Lloyd & Atkinson, 2002). Des choix judicieux doivent donc être faits au niveau des interpolations afin d'obtenir des résultats précis et représentatifs de la réalité de terrain. Il est donc juste d'étudier plus en profondeur et de comparer différentes méthodes d'interpolation (et les paramètres qui leurs sont reliés), afin d'identifier celles étant les plus efficaces dans un cadre microtopographique.

En regard à ces différentes méthodes, le présent projet vise à comparer des méthodes et paramètres d'interpolation au moyen d'un Système d'Information Géographique (SIG), afin de réaliser des modèles numériques d'élévation de haute précision représentant la microtopographie des plaines d'inondation. La comparaison s'appuie sur six méthodes et seize paramètres d'interpolation. L'efficacité de chacune des méthodes d'interpolation a été validée et les erreurs (*Root Mean Square Error* – RMSE) ont été calculées afin d'identifier les méthodes et paramètres les plus performants. À partir de l'ensemble des tests et évaluations réalisés sur les différents sites à l'étude, il a été identifié que le krigeage simple (SK), la fonction radiale (RBF) et le réseau de triangles irréguliers (TIN) étaient les méthodes d'interpolation les plus performantes dans un cadre microtopographique, c'est-à-dire donnant l'erreur RMSE la plus faible, tout en représentant adéquatement les particularités du terrain. La méthode et les paramètres d'interpolation les plus performants ont ainsi été sélectionnés et utilisés pour réaliser les MNE des sites de plaines inondables à l'étude. Dans cet article, les comportements et erreurs des différentes méthodes d'interpolation et des paramètres

qui y sont reliés sont présentés. De plus, des cartes de l'erreur ont également été réalisées de manière à localiser spatialement les erreurs et à identifier les difficultés de représentation et ce, en lien avec les méthodes d'interpolation, les sites à l'étude et la microtopographie.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Choix des sites à l'étude et travaux de terrain

Les sites à l'étude sont localisés le long de la rivière Saint-François (centre-sud du Québec), laquelle rivière est affectée par de fréquentes inondations. Au total, neuf sites localisés en plaines inondables ont été sélectionnés afin de tester les différentes méthodes d'interpolation. Ils ont été choisis en fonction des zones de récurrences (0-20 et 20-100 ans) suivant les cartes officielles du risque d'inondation provenant des services gouvernementaux (Environnement Canada & ministère de l'Environnement du Québec, 1982), ainsi que d'autres informations provenant du ministère de la Sécurité publique du Québec et des travaux de recension sur les inondations dans ce secteur (Saint-Laurent *et al.*, 2001; Saint-Laurent & Saucet, 2003). L'accessibilité des terrains de même que les travaux précédemment réalisés ont également été des facteurs de sélection des sites. Parmi les sites sélectionnés, cinq sites sont localisés en milieu naturel ou semi-naturel (boisé, terrains en friche, etc.), et quatre autres sont situés en milieu urbain. Les dimensions moyennes des sites couvrent une superficie de 150 mètres de largeur (transversale à la rive) par 50 mètres de profondeur (perpendiculaire à la rive). L'acquisition des données topographiques a été réalisée sur le terrain à l'aide d'un GPS différentiel (Trimble 5700 / 5800, mode RTK) et d'une station totale (Leica TCR 705). Le GPS a permis d'obtenir des coordonnées géographiques (x, y, z) et la station totale a été utilisée pour faire l'ensemble des relevés topographiques. La station totale peut emmagasiner des données topographiques, cependant elle ne peut localiser spatialement les secteurs échantillonnés, ce qui explique l'utilisation d'un GPS de haute précision. Les relevés à la station totale ont été faits le long de transects perpendiculaires à la rive à des intervalles de dix mètres, et un point d'élévation a été relevé à chaque rupture de pente de manière à représenter chaque changement topographique.

2.2. Test des méthodes et paramètres d'interpolation

L'ensemble des données d'élévation topographiques relevées à la station totale a été introduit sous un format de fichiers de points à l'intérieur d'un Système d'Information Géographique (SIG), soit le logiciel ArcGIS de ESRI (Environmental Systems Research Institute). Puisque la réalisation des tests des différentes méthodes d'interpolation nécessite plusieurs heures de travail, un seul site (RIC-2), représentatif des autres sites en plaine alluviale, a été sélectionné afin d'y réaliser l'ensemble des tests. Six méthodes d'interpolation ont été testées, soit : l'inverse de la distance, la fonction radiale, le krigeage ordinaire, le krigeage simple, le krigeage universel et le réseau de triangles irréguliers (Arnaud & Emery, 2000). Pour l'ensemble des méthodes d'interpolation, 16 paramètres ont été utilisés (McCoy & Johnston, 2001). Le «Tableau 3.1» fournit les différents paramètres testés pour chacune des méthodes sélectionnées.

Plusieurs valeurs ont été testées et des combinaisons de valeurs pour les différents paramètres ont été comparées. Ces tests ont été effectués à travers les extensions *Spatial Analyst* et *3D Analyst* du module ArcMAP du logiciel ArcGIS (ESRI). Les différents paramètres testés sont donc fonction de l'existence et de la capacité à modifier ces éléments à l'intérieur de ce logiciel. Enfin, pour chacune des méthodes d'interpolation testées sur le site à l'essai (RIC-2), la combinaison des paramètres donnant l'erreur la plus faible a été identifiée. Puis, chaque méthode d'interpolation avec ses meilleurs paramètres a été testée sur les huit autres sites à l'étude, afin de vérifier si les résultats des méthodes et paramètres d'interpolation étaient constants suivant les sites.

2.3. Évaluation de la qualité des méthodes d'interpolation

Il est important lors de la réalisation de MNE, de valider la qualité de ces modèles puisqu'ils ne sont pas automatiquement représentatifs de la réalité topographique de terrain. De manière à déterminer quelles méthodes d'interpolation et quels paramètres étaient les plus efficaces pour représenter adéquatement la microtopographie des terrains à l'étude, plusieurs indicateurs ont été utilisés, tels que la validation croisée, la racine de l'erreur moyenne au carré ou *Root Mean Square Error* (RMSE), des tests statistiques, des cartes de l'erreur et une évaluation visuelle en trois dimensions.

2.3.1. Validation croisée. Afin de tester la validité des surfaces interpolées, les fichiers des points d'élévation ont été séparés en deux séquences : la séquence «*training*» a servi à la réalisation de l'interpolation, tandis que la séquence «*test*» a permis plutôt la validation de l'interpolation (Figure 3.1). Seule la séquence «*training*» a été utilisée pour réaliser les modèles numériques d'élévation. La séquence «*test*», laquelle est composée de 30 points d'élévation obtenus aléatoirement à l'intérieur des fichiers de données d'élévation, a été retirée avant la réalisation de l'interpolation. Une fois l'interpolation réalisée, les points «*test*» ont été superposés à la surface topographique. Les valeurs d'élévation des points «*test*» provenant directement du terrain ont pu être comparées aux valeurs interpolées pour chacun de ces points. Les mêmes points «*training*» et «*test*» ont été utilisés pour évaluer la qualité des diverses méthodes d'interpolation pour un même site. Ce sont les points «*test*» provenant de la validation croisée qui ont servi à la réalisation des autres méthodes d'évaluation de la qualité.

2.3.2. Évaluation de la qualité des méthodes d'interpolation au moyen du Root Mean Square Error (RMSE). Pour comparer les valeurs des surfaces interpolées aux valeurs des points «*test*», une erreur est calculée au moyen du *Root Mean Square Error* (RMSE). Ce calcul est l'indicateur le plus souvent utilisé pour évaluer le réalisme et l'exactitude des méthodes d'interpolation (Weng, 2002). Le RMSE, en raison de la mise au carré et de la racine, élimine les effets des sur et sous-estimations des surfaces topographiques et permet de connaître l'erreur réelle provenant des méthodes d'interpolation. Il se calcule ainsi (voir équation (1)) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_{mne} - z_i)^2} \quad (1)$$

où Z_{mne} = L'élévation au point i mesurée sur le MNE

Z_i = L'élévation mesurée sur le terrain

n = Nombre de point d'élévation validés

Ainsi, pour chaque site à l'étude, les six méthodes d'interpolation ont été comparées à l'aide du RMSE provenant de la différence d'erreur entre les points du fichier «*test*» et les surfaces topographiques interpolées. En principe, la valeur la plus faible obtenue avec le calcul du RMSE indique quelle méthode d'interpolation est la plus fiable, c'est-à-dire celle qui fournit la surface topographique la plus représentative de la microtopographie des sites à l'étude.

2.3.3. Évaluation de la qualité des méthodes d'interpolation au moyen de tests statistiques. Afin d'établir si les erreurs produites par les différentes méthodes d'interpolation sont significativement différentes les unes des autres, des tests statistiques ont été réalisés à l'aide du logiciel Systat 12 (Systat Software). Une analyse de variance (ANOVA) par site a été réalisée pour comparer les erreurs absolues des points «*test*» des six méthodes d'interpolation avec une probabilité de 95 %. Par la suite, des tests de *t* ($p \geq 0,05$) comparant deux méthodes d'interpolation à la fois, ont été réalisés afin de vérifier si ces deux méthodes produisaient des erreurs absolues significativement différentes. La réalisation de ces tests statistiques a permis d'établir si une ou plusieurs méthodes d'interpolation pouvaient être identifiées comme supérieures aux autres quant à la représentation de la microtopographie. Les méthodes d'interpolation ont ainsi pu être divisées en deux classes : la classe supérieure, c'est-à-dire les méthodes d'interpolation non significativement différentes de la meilleure et, la classe inférieure, c'est-à-dire les méthodes significativement différentes de la meilleure méthode.

2.3.4. Évaluation de la qualité des méthodes d'interpolation au moyen de cartes de l'erreur. Comme le mentionne Weng (2002), le RMSE n'est pas suffisant pour quantifier l'incertitude des MNE, puisque celui-ci ne permet pas d'évaluer la distribution spatiale de l'erreur. La réalisation de cartes de l'erreur est donc nécessaire afin d'identifier les erreurs les plus élevées et, par ailleurs, de déterminer s'il y a concentration des erreurs en fonction de caractéristiques particulières du terrain, tel qu'un relief plus prononcé ou irrégulier. Afin de comparer la localisation des erreurs en fonction des différentes méthodes d'interpolation testées, deux types de carte de l'erreur ont été réalisés pour chacun des sites à l'étude. Ces cartes composées de cercles gradués de dimensions variables, dépendamment des erreurs absolues des points «*test*» ou de cercles situant les erreurs extrêmes (*outliers*), permettent la

comparaison des six différentes méthodes d'interpolation sur une même planche (feuille), facilitant ainsi la localisation des secteurs plus problématiques au niveau des erreurs, dépendamment des différentes méthodes d'interpolation.

2.3.5. Évaluation de la qualité des méthodes d'interpolation au moyen d'une évaluation visuelle en trois dimensions. De manière à vérifier la ressemblance entre les surfaces interpolées et la topographie réelle des sites à l'étude, une représentation visuelle en trois dimensions des surfaces topographiques interpolées a été réalisée à partir du module ArcScene d'ArcGIS. Il est possible, même si le RMSE est faible, qu'une méthode d'interpolation produise des caractéristiques topographiques peu conformes au terrain, telle que la présence de pics ou de creux distinctifs et abrupts notamment. La visualisation en trois dimensions des MNE provenant des différentes méthodes d'interpolation permet donc de localiser ces anomalies et ainsi faire un choix plus éclairé quant à la méthode d'interpolation la plus représentative des sites.

Avec l'ensemble des tests et des manipulations réalisés, il a été possible d'évaluer l'efficacité des méthodes d'interpolation pour la réalisation de modèles numériques d'élévation de haute précision et la représentation de la microtopographie des sites à l'étude.

3. RÉSULTATS

3.1. Tests des méthodes et paramètres d'interpolation

Pour chaque méthode d'interpolation, des variations des valeurs des paramètres d'interpolation ont été réalisées sur le site à l'essai (RIC-2). Plus d'une quarantaine de variations ont été ainsi effectuées afin de déterminer la combinaison des paramètres les plus performants (erreur la plus faible) pour chaque méthode d'interpolation (Tableau 3.2). Rappelons que la mesure de l'erreur utilisée est le RMSE, c'est-à-dire le *Root Mean Square Error* ou la racine de l'erreur moyenne au carré. Les meilleures combinaisons ont par ailleurs été utilisées pour réaliser les tests des méthodes d'interpolation sur les autres sites.

Puisque les paramètres diffèrent d'une méthode à l'autre, il est difficile d'établir un patron particulier qui serait valide pour l'ensemble des méthodes d'interpolation. Toutefois, on peut noter que la «forme du secteur de recherche» la plus efficace est composée d'une seule section, sauf pour la méthode d'interpolation du krigage ordinaire (voir Tableau 3.2). De plus, pour les paramètres de portée, de seuil partiel, d'effet de pépite, de taille et de nombre de champs (paramètres du krigage), les valeurs par défaut calculées par le logiciel ont été utilisées malgré la réalisation de tests sur ces paramètres. Le logiciel détermine adéquatement ces valeurs puisque les tests réalisés sur ces paramètres n'ont pas réellement diminué l'erreur produite par les méthodes d'interpolation. Ainsi, le logiciel permet donc d'épargner de nombreuses heures de travail, tout en produisant des résultats satisfaisants. De plus, lors des tests d'interpolation, on note que l'utilisation du paramètre de l'anisotropie pour les méthodes du krigage ordinaire et du krigage simple produit des erreurs RMSE plus faibles. L'angle de la forme du secteur de recherche s'aligne automatiquement de manière à rechercher la tendance des données. Avec l'utilisation de ce paramètre, les RMSE des méthodes du krigage ordinaire et du krigage simple sont ainsi améliorés d'une vingtaine de centimètres.

3.2. L'évaluation de la qualité des méthodes d'interpolation

3.2.1. L'évaluation de la qualité des méthodes d'interpolation au moyen du Root Mean Square Error (RMSE). La qualité des différentes méthodes d'interpolation a d'abord été validée par le calcul de la racine de l'erreur moyenne au carré ou *Root Mean Square Error (RMSE)* des points «test». Le calcul de cette erreur pour chaque méthode d'interpolation a permis de comparer la performance des différentes méthodes d'interpolation. Le «Tableau 3.3» présente les RMSE des points «test» des méthodes d'interpolation pour tous les sites à l'étude.

Les RMSE des points «test» des méthodes varient donc pour les neuf sites à l'étude entre 12,3 et 67,0 cm. D'un site à l'autre, les RMSE varient de façon relativement importante. En effet, pour certains sites, le RMSE se chiffre à environ 20 cm, tandis que pour d'autres, il est plutôt de l'ordre de 40 cm. Les RMSE des différentes méthodes d'interpolation varient également. Les méthodes d'interpolation de la fonction radiale

(RBF), du krigeage ordinaire (OK), du krigeage simple (SK) et du réseau de triangles irréguliers (TIN) produisent généralement les erreurs (RMSE) les plus faibles, tandis que les erreurs (RMSE) des méthodes de l'inverse de la distance (IDW) et du krigeage universel (UK) sont plus élevées. Par ailleurs, les meilleures méthodes d'interpolation pour chaque site ont souvent un RMSE de quelques centimètres de différence seulement. Les mêmes résultats des méthodes d'interpolation sont également observables en comparant les moyennes des RMSE des méthodes d'interpolation pour l'ensemble des sites. Le krigeage simple (SK) obtient la valeur la plus faible, mais les méthodes de la fonction radiale (RBF), du krigeage ordinaire (OK) et du réseau de triangles irréguliers (TIN) ont une différence de moins de trois centimètres avec la valeur du krigeage simple (SK).

Le «Tableau 3.4» permet également une comparaison entre les méthodes d'interpolation en indiquant l'ordination (position) des méthodes d'interpolation au niveau du RMSE; le plus petit RMSE correspondant à la première position et le plus élevé à la sixième position. Le «Tableau 3.4» renseigne aussi sur la moyenne d'ordination des différentes méthodes d'interpolation.

On constate que les méthodes du krigeage ordinaire (OK) et du krigeage simple (SK) (voir Tableaux 3.3 et 3.4), produisent souvent les erreurs les plus faibles et donc des premières positions au niveau de l'ordination (voir Tableau 3.4). De plus, les méthodes d'interpolation de l'inverse de la distance (IDW) et du krigeage universel (UK) produisent généralement les erreurs (RMSE) les plus élevées. En effet, ces méthodes se classent fréquemment en cinquième et sixième positions. Le réseau de triangles irréguliers (TIN), quant à lui, arrive souvent en deuxième position, tandis que la fonction radiale (RBF) se classe très souvent en quatrième position.

3.2.2. L'évaluation de la qualité des méthodes d'interpolation au moyen de tests statistiques. Les analyses de variances et les tests de *t* confirment les résultats mentionnés précédemment au niveau du RMSE. Toutefois, les tests statistiques permettent d'établir s'il existe une différence significative entre les erreurs des méthodes d'interpolation. Ces tests sont pertinents notamment parce que les méthodes de la fonction radiale (RBF), du krigeage ordinaire (OK), du krigeage simple (SK) et du réseau de triangles irréguliers (TIN), produisent des erreurs (RMSE) relativement

semblables entre elles, avec quelques centimètres de différence seulement. Les analyses de variance réalisées entre les méthodes d'interpolation permettent de conclure qu'il y a une différence significative entre les méthodes d'interpolation pour six des neuf sites à l'étude. Il n'y a donc pas de différence significative entre les méthodes d'interpolation des sites RIC-1, BRO-1 et SHE-2.

Pour les sites avec des méthodes d'interpolation significativement différentes, des tests de t ont aussi été réalisés afin de comparer deux méthodes d'interpolation à la fois. Ainsi, la meilleure méthode d'interpolation a été comparée à toutes les autres, et elles ont ainsi été divisées en deux classes : supérieure et inférieure. Le «Tableau 3.5» présente les résultats des tests de t et plus particulièrement le nombre d'apparition dans la classe supérieure pour chaque méthode d'interpolation.

À la lumières des tests de t , on peut affirmer que les méthodes les plus performantes quant à la représentation de la microtopographie des sites, sont la fonction radiale (RBF), le krigeage simple (SK) et le réseau de triangles irréguliers (TIN). Aussi, ces méthodes sont relativement équivalentes puisqu'elles ne sont généralement pas significativement différentes sur le plan statistique. La méthode du krigeage ordinaire (OK) présente également de bons résultats, bien que ceux-ci soient légèrement inférieurs aux trois méthodes précédemment mentionnées. Les tests de t permettent également de corroborer les résultats des RMSE au niveau des méthodes d'interpolation de l'inverse de la distance (IDW) et du krigeage universel (UK). Ces méthodes sont généralement situées dans la classe inférieure et sont donc moins performantes que les quatre autres méthodes testées. De plus, le krigeage universel (UK) serait légèrement moins performant que l'inverse de la distance (IDW).

3.2.3. L'évaluation de la qualité des méthodes d'interpolation au moyen de cartes de l'erreur. Pour chacun des sites, deux types de carte de l'erreur ont été produits afin de comparer visuellement la distribution spatiale de l'erreur des six méthodes d'interpolation testées. Les cartes de l'erreur du premier type (Figure 3.2) sont composées de cercles gradués indiquant au moyen de différentes tailles l'importance des erreurs absolues des points «test»; les cercles les plus grands indiquant des erreurs plus élevées. Pour l'ensemble des sites à l'étude, la cartographie

des erreurs permet de découvrir que les erreurs absolues les plus élevées se trouvent généralement le long de la rivière ou au pourtour des sites.

Les cartes de l'erreur du second type (Figure 3.3) localisent les points «test» d'élévation avec des erreurs absolues supérieures à 60 centimètres («outliers») pour chaque méthode d'interpolation. Sur ces cartes, la limite supérieure de la berge, c'est-à-dire la limite à partir de laquelle la pente du terrain devient pratiquement nulle, a également été localisée. Les résultats obtenus pour l'ensemble des cartes indiquent que 65 % des «outliers» sont situés avant la limite supérieure de la berge, ce qui équivaut à 160 points «test» sur 247. Les méthodes d'interpolation semblent donc avoir davantage de difficulté à interpoler convenablement les zones en pente forte.

Le «Tableau 3.6» a été réalisé à partir des cartes de l'erreur et indique le nombre total de points «test» d'élévation avec une erreur absolue supérieure à 60 centimètres pour chacune des méthodes d'interpolation testées. Ceci permet de fournir une autre forme de comparaison des différentes méthodes d'interpolation et rend possible l'identification des méthodes ayant des erreurs absolues considérées comme «élevées» ou «extrêmes» («outliers»). Ainsi, les méthodes du krigeage ordinaire (OK) et du krigeage simple (SK) possèdent le moins de outliers, tandis que les méthodes de l'inverse de la distance (IDW) et du krigeage universel (UK) ont le plus grand nombre de points «test» d'élévation avec une erreur absolue de plus de 60 centimètres. En fait, ces deux dernières méthodes ont deux fois plus de «outliers» que le OK et le SK, ce qui concorde avec les résultats précédents démontrant une grande différence de performance entre l'IDW et le UK et les autres méthodes d'interpolation testées.

3.2.4. L'évaluation de la qualité des méthodes d'interpolation au moyen d'une évaluation visuelle en trois dimensions. L'observation en trois dimensions des modèles numériques d'élévation réalisés à partir des différentes méthodes d'interpolation permet d'identifier certaines aberrations non décelables au moyen des statistiques ou des cartes de l'erreur. Comme le démontre la «Figure 3.4», des méthodes d'interpolation peuvent produire des pics ou des creux importants qui sont inexistants sur le terrain. C'est le cas de la méthode d'interpolation de l'inverse de la distance (IDW) qui produit des œils-de-bœuf. Cet élément doit donc être pris en compte

lors du choix d'une méthode d'interpolation puisqu'il joue beaucoup sur la qualité de la représentation microtopographique des sites.

La «Figure 3.5» illustre un MNE produit à l'aide de la méthode d'interpolation du krigeage universel. Cette méthode d'interpolation produit une surface topographique rugueuse et hachurée qui n'est pas compatible à ce qui est observable sur le terrain. De plus, le réseau de triangles irréguliers peut produire une surface plus anguleuse et moins lisse que les autres méthodes d'interpolation, en particulier si les données d'élévation sont en nombre restreint. Cela s'explique au fait que le réseau de triangles irréguliers (TIN) ne modélise pas une tendance dans les données, mais relie plutôt au moyen de triangles les différents points d'élévation échantillonnes. Un exemple d'un MNE réalisé au moyen d'un réseau de triangles irréguliers (TIN) est présenté à la «Figure 3.6». Cette topographie plus rude et abrupte peut toutefois être adoucie à l'intérieur du SIG puisqu'il est possible d'appliquer un lissage sur la surface afin d'en diminuer l'effet. Pour ce qui est des autres méthodes d'interpolation, la réalisation de MNE en trois dimensions n'a permis de déceler aucune anomalie non compatible avec la réalité de terrain (Figure 3.7).

4. DISCUSSION

L'objectif général du projet consistait à faire la comparaison de méthodes et paramètres d'interpolation dans le but de réaliser des MNE de haute précision représentant la microtopographie des plaines d'inondation. Les tests des méthodes et paramètres d'interpolation de même que la validation de la qualité de ceux-ci au moyen d'une validation croisée, du RMSE, de tests statistiques, de cartes de l'erreur et d'une évaluation visuelle en trois dimensions ont permis d'établir que les méthodes d'interpolation du krigeage simple (SK), de la fonction radiale (RBF) et du réseau de triangles irréguliers (TIN) produisaient des erreurs semblables et que ces méthodes étaient les plus efficaces dans la représentation microtopographique des sites à l'étude. À l'opposé, les méthodes d'interpolation de l'inverse de la distance (IDW) et du krigeage universel (UK) produisent des erreurs (RMSE) élevées et un grand nombre de «outliers». L'utilisation de ces dernières méthodes devrait donc être évitée lors de la

création de MNE représentant la microtopographie. Les résultats des évaluations visuelles en trois dimensions ont, de plus, permis de confirmer les résultats des données statistiques et d'exclure les méthodes de l'inverse de la distance (IDW) et du krigeage universel (UK), puisqu'elles produisent des surfaces topographiques non représentatives de la réalité de terrain. Visuellement, l'inverse de la distance crée des œils-de-bœuf (pics ou creux), tandis que le krigeage universel produit des surfaces topographiques rugueuses et hachurées. Par ailleurs, selon les résultats des tests de *t*, le krigeage ordinaire (OK) ne produit pas d'aussi bons résultats que les méthodes du krigeage simple (SK), de la fonction radiale (RBF) et du réseau de triangles irréguliers (TIN). Toutefois, celui-ci se rapproche davantage, en terme de performance, de ces dernières méthodes que celles de l'inverse de la distance (IDW) ou du krigeage universel (UK). De plus, visuellement, il ne produit pas de particularités non compatibles avec la réalité de terrain.

Le fonctionnement des différentes méthodes d'interpolation explique en partie les erreurs observées. L'inverse de la distance (IDW), par exemple, fonctionne selon le principe géographique d'après lequel les objets rapprochés les uns des autres tendent à se ressembler davantage (McCoy & Johnston, 2001). L'échantillonnage le long des transects peut avoir, dans la présente étude, entraîné des difficultés d'interpolation. En effet, bien que les données d'élévation soient relativement semblables entre les transects, la distance qui les sépare (dix mètres) semble avoir générée une certaine marge d'erreurs. Les méthodes d'interpolation du krigeage, par contre, qui sont des méthodes géostatistiques, utilisent l'arrangement spatial de l'ensemble des points échantillonnés, en plus d'accorder un poids à la distance entre les points (McCoy & Johnston, 2001). Cette particularité fait en sorte que le krigeage ordinaire (OK) et le krigeage simple (SK) produisent des erreurs plus faibles, probablement en raison du type d'échantillonnage le long des transects. En effet, ces méthodes sont capables, contrairement à l'inverse de la distance (IDW), de déterminer la tendance entre les transects, c'est-à-dire la relation spatiale entre les données (Johnston *et al.*, 2001). De plus, le krigeage ordinaire (OK) et le krigeage simple (SK) produisent des surfaces lisses à cause de l'intégration de la relation entre les données lors de l'interpolation. Enfin, la fonction radiale interpole en utilisant une fonction mathématique qui minimise la courbure d'ensemble de la surface (McCoy & Johnston, 2001). Elle est mieux

adaptée pour les terrains à faible dénivellation que pour les terrains plus accidentés, d'où sa performance satisfaisante pour les sites à l'étude.

Les résultats obtenus dans le cadre de ces analyses diffèrent quelque peu de ceux cités dans la littérature. Par exemple, Lloyd & Atkinson (2002) qui ont comparé des méthodes d'interpolation pour la réalisation de MNE à partir de données d'élévation LIDAR (*Light Detection And Ranging*), ont conclu que lorsque la taille de l'échantillon est relativement grande, les méthodes de l'inverse de la distance (IDW) et du krigeage universel (UK) produisent des résultats semblables, et que l'utilisation de la méthode de l'inverse de la distance (IDW) - qui nécessite moins de temps et d'ajustement pour les calculs - est suffisante et convenable. Par contre, selon eux, plus l'échantillon est petit, plus les avantages du krigeage universel (UK) sur l'inverse de la distance (IDW) ressortent. Par ailleurs, Lloyd & Atkinson (2002) ont également comparé le krigeage ordinaire (OK) et le krigeage universel (UK). Les deux méthodes produisent des erreurs semblables. Cependant, le krigeage universel (UK) produit des erreurs maximums plus faibles que le krigeage ordinaire (OK). Anderson *et al.* (2005) abondent dans le même sens que Lloyd & Atkinson (2002). Il n'y aurait pas de différence notable entre l'inverse de la distance (IDW) et le krigeage ordinaire (OK). Pour Weber & Englund (1994), par contre, les erreurs produites par le krigeage ordinaire (OK) sont plus faibles que celles produites par l'inverse de la distance (IDW). Ces auteurs ont également fait ressortir la forte sensibilité de l'inverse de la distance (IDW) au type de données d'élévation utilisées et à l'ajustement des paramètres d'interpolation, en comparaison au krigeage ordinaire (OK). Enfin, pour les travaux à grande échelle, Chaplot *et al.* (2006) propose le krigeage ordinaire (OK) qui produit, dans la majorité des cas, de plus petites erreurs (RMSE). La fonction radiale multiquadratique semble aussi donner des résultats satisfaisants.

Enfin, il faut noter que les différents résultats obtenus dépendent aussi des données d'élévation utilisées. Chaplot *et al.* (2006) ont utilisé une station totale pour obtenir leurs données d'élévation, alors que Lloyd & Atkinson (2002), de même que Anderson *et al.* (2005), ont utilisé des données provenant du LIDAR, outil qui produit une quantité importante de données d'élévation dispersées de façon aléatoire. Aussi, comme le mentionne MacEachren & Davidson (1987), l'exactitude des valeurs estimées dépend de cinq facteurs interreliés, soit : la précision des valeurs mesurées, l'intensité des

données ou la taille de l'échantillon, la localisation des données échantillonnées, la variabilité de la surface topographique représentée et la méthode d'interpolation utilisée. Parmi ces facteurs, la localisation des données d'élévation échantillonnées peut avoir un effet non négligeable sur les résultats et les erreurs des surfaces topographiques interpolées. Par exemple, un échantillonnage qui se fait à chaque rupture de pente permet d'organiser et de structurer les travaux de terrain, tout en obtenant des informations à chaque variation topographique. Avec ce type d'échantillonnage, tous les points d'élévation deviennent essentiels à la représentation adéquate de la microtopographie du terrain. Ainsi, il devient pertinent de questionner l'utilisation de la validation croisée pour s'assurer de la qualité des méthodes d'interpolation. Cette technique implique la subdivision en deux séquences du fichier de points d'élévation, soit les points «*test*» qui sont retranchés avant l'interpolation et les points «*training*» qui servent à interpoler. Toutefois, ce sont tous des points représentant des ruptures de pente. Il y a donc perte d'information topographique, ce qui peut conduire à une augmentation de l'erreur. Mentionnons que la validation croisée est utilisée dans de nombreux travaux (Anderson et al., 2005; Chaplot et al., 2006; Desmet, 1997; Lloyd & Atkinson, 2002;) et permet de vérifier les représentations des interpolations. Cette validation est pertinente lorsque le maillage ou l'échantillonnage est aléatoire, puisque les points d'élévation ne correspondent pas nécessairement à des ruptures de pente.

La localisation des erreurs tend à confirmer cette affirmation selon laquelle aucun point de rupture de pente ne devrait être éliminé pour représenter adéquatement la microtopographie. En effet, la majorité des «*outliers*» sont localisés dans les zones plus abruptes. Les cartes localisant les points «*test*» d'élévation avec des erreurs absolues supérieures à 60 centimètres («*outliers*») confirment cette hypothèse. En effet, 65 % des «*outliers*» sont situés avant la limite supérieure de la berge, c'est-à-dire là où la pente est abrupte. Le retrait de certains points d'élévation à cet endroit de la rive peut donc modifier considérablement la surface topographique interpolée. D'ailleurs, comme le mentionne Weng (2002), l'incertitude tend à augmenter dans les zones abruptes ou accidentées, d'où la nécessité d'augmenter les points d'échantillonnage à ces endroits.

La méthode d'échantillonnage utilisée dans cette étude nous semble appropriée. Toutefois, pour améliorer l'interprétation, un deuxième échantillonnage aléatoire

d'environ 30 points additionnels par site pourrait être envisagé, assurant ainsi une meilleure validation des données. De plus, l'ajout de points d'échantillonnage de part et d'autre des points de rupture de pente pourrait aussi être envisagé. Cependant, un compromis est à faire entre le temps alloué à l'échantillonnage sur le terrain, qui peut nécessiter de nombreuses heures de travail, et la précision souhaitée dans la représentation topographique du site par les modèles numériques d'élévation.

Par ailleurs, il est probable que l'ajustement des paramètres d'interpolation pour chacune des méthodes d'interpolation des neuf sites à l'étude aurait permis d'obtenir des erreurs un peu plus faibles que la simple utilisation des résultats des tests des paramètres d'interpolation du site RIC-2. Toutefois, puisque ce site est représentatif des autres et que les tests des paramètres d'interpolation sont très longs à réaliser, il a été admis que les valeurs des paramètres utilisés pouvaient être convenables pour l'ensemble des sites à l'étude.

Enfin, la réalisation des tests des méthodes d'interpolation a permis de créer des modèles numériques d'élévation d'une grande précision (allant jusqu'à 12 cm). Des MNE d'une telle précision sont rares et permettent de représenter des formes topographiques généralement non perceptibles avec des MNE d'une moins grande précision, mais qui peuvent avoir une incidence sur l'étendue des nappes d'eau lors d'inondations. Les résultats obtenus permettent également d'observer la différence de performance des méthodes d'interpolation dépendamment des données utilisées (données obtenues à la station totale versus données provenant du LIDAR). Ainsi, malgré une précision semblable pour ces deux types de données, les méthodes d'interpolation réagissent différemment. Les résultats obtenus permettent donc de démontrer que le choix des méthodes d'interpolation dépend grandement du type et de la localisation des données d'élévation utilisées, ce qui pourrait être utile pour de futures études. Enfin, peu d'études sur la microtopographie ont été réalisées le long des cours d'eau, notamment dans des zones où les pentes riveraines peuvent être abruptes. Les travaux réalisés permettent donc de mettre en évidence les difficultés des méthodes d'interpolation en lien avec cette particularité et le type d'échantillonnage utilisé. Enfin, puisque le type d'échantillonnage à chaque rupture de pente a été relativement peu utilisé jusqu'à présent, cette étude permet l'amélioration de la compréhension du comportement des méthodes d'interpolation lors d'un

échantillonnage de ce type, comportement qui diffère de celui d'un échantillonnage aléatoire, notamment.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier tous les organismes qui ont contribué au financement de ce projet de recherche dont le CRSNG (Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada, le FQRNT (Fond québécois de la recherche sur la nature et les technologies), ainsi que le Centre d'études universitaires de l'Université du Québec à Trois-Rivières (C.E.U.) et les Fonds institutionnels (FIR-UQTR). Nous tenons à remercier sincèrement Monsieur Pierre-André Bordeleau (Géographie, UQTR) pour son expertise et son soutien technique à la réalisation des différentes phases de ce projet, ainsi que Messieurs Léo Provencher et Denis Leroux pour leurs conseils judicieux.

RÉFÉRENCES

- Anderson, E. S., Thompson, J. A. & Austin, R. E. (2005) LIDAR density and linear interpolator effects on elevation estimates. *Int. J. Remote Sens.* **26** (18), 3889-3900.
- Arnaud, M. & Emery X. (2000) *Estimation et interpolation spatiale : méthodes déterministes et géostatistiques*. Hermès, Paris, France, 216 p.
- Bates, P. D. & De Roo, A. P. J. (2000) A simple raster-based model for flood inundation simulation. *J. Hydrol.* **236**, 54-77.
- Chandler, J. (1999) Effective application of automated digital photogrammetry for geomorphological research. *Earth Surf. Processes Landf.* **24**, 51-63.
- Chaplot, V., Darboux, F., Bourennane, H., Leguédois, S., Silvera, N. & Phachomphon, K. (2006) Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density. *Geomorphology* **77**, 126-141.
- Desmet, P. J. J. (1997) Effects of interpolation error on the analysis of DEMs. *Earth Surf. Processes Landf.* **22**, 563-580.
- Environnement Canada & Ministère de l'Environnement du Québec (1982) *Carte des zones inondables en eau libre, bassin de la Rivière Saint-François*. Échelle 1:10 000, feuillets 21E/05-100-0401, 21E/05-100-5226, 21E/05-100-5227, 21E/12-100-5228, 31H/09-100-0204, 31H/09-100-5229.
- Gilvear, D. & Bryant, R. (2003) Analysis of aerial photography and other remotely sensed data. In: *Tools in fluvial geomorphology*. (Ed. by G.M. Kondolf & H. Piégay), 135-170. John Wiley & sons, Chippenham, UK.
- Horritt, M. S. & Bates, P. D. (2001) Predicting floodplain inundation: raster-based modelling versus the finite-element approach. *Hydrol. Processes* **15**, 825-842.
- Johnston, K., Ver Hoef, J. M., Krivoruchko, K. & Lucas, N. (2001) *Using ArcGis Geostatistical Analyst*. ESRI Press, Redlands, California, USA, 300 p.
- Lloyd, C. D. & Atkinson, P. M. (2002) Deriving DSMs from LiDAR data with kriging. *Int. J. Remote Sens.* **23** (12), 2519-2524.
- MacEachren, A. M. & Davidson, J. V. (1987) Sampling and Isometric mapping of Continuous Geographic Surfaces. *The American Cartographer* **14** (4), 299-320.
- Marks, K. & Bates, P. (2000) Integration of high-resolution topographic data with floodplain flow models. *Hydrol. Processes: Geocomputation in Hydrology and Geomorphology* **14** (11-12), 2109-2122.
- McCoy, J. & Johnston, K. (2001) *Using ArcGis Spatial Analyst*. ESRI Press, Redlands, California, USA, 230 p.

- Overton, I. C. (2005) Modelling floodplain inundation on a regulated river: integrating GIS, remote sensing and hydrological models. *River Res. and Applications*. **21** (9), 991-1001.
- Saint-Laurent, D., Couture, C. & McNeil, É. (2001) Spatio-temporal analysis of floods of the Saint-François drainage basin, Québec, Canada. *Environments*. **29** (2), 73-90.
- Saint-Laurent, D. & Saucet, J.-P. (2003) Chronological reconstitution of floods of the Saint-François Drainage Basin, Québec, Canada. *Proc. third Canadian Conf. on Geotechnique and Natural Hazards*, June 8-10th, Edmonton, Alberta, Canada, 89-94.
- Townsend, P. A. & Walsh, S. J. (1998) Modeling floodplain inundation using an integrated GIS with radar optical remote sensing. *Geomorphology*. **21**, 295-312.
- Weber, D. D. & Englund, E. J. (1994) Evaluation and Comparison of Spatial Interpolators II. *Mathematical Geology*. **26** (5), 589-603.
- Weng, Q. (2002) Quantifying Uncertainty of Digital Elevation Models Derived from Topographic Maps. In: *Advances in Spatial Data Handling*. (Ed. by D. Richardson & P. Van Oosterom), 403-418. Springer-Verlag, New York, New York, USA.
- Wise, S. (2000) Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours. *Hydrol. Processes*. **14**, 1909–1929.

Tableau 3.1
Les paramètres d'interpolation pouvant être modifiés dépendamment
des différentes méthodes d'interpolation.

Méthodes d'interpolation / Paramètres d'interpolation	IDW	RBF	OK	SK	UK	TIN
Nombre de points voisins	x	x	x	x	x	
Forme du secteur de recherche	x	x	x	x	x	
Dimensions du secteur de recherche	x	x	x	x	x	
Angle de la forme du secteur de recherche	x	x	x	x	x	
Puissance	x					
Paramètre		x				
Fonction de Kernel		x				
Modèle du variogramme			x	x	x	
Portée			x	x	x	
Seuil partiel			x	x	x	
Effet de pépite			x	x	x	
Taille du champ			x	x	x	
Nombre de champs			x	x	x	
Anisotropie			x	x	x	
Voisinage (global vs. local)					x	
Méthode de triangulation						x

IDW : inverse de la distance ; RBF : fonction radiale; OK : krigeage ordinaire; SK : krigeage simple; UK : krigeage universel; TIN : réseau de triangles irréguliers.

Tableau 3.2
Les combinaisons de paramètres d'interpolation donnant les erreurs (RMSE)
les plus faibles pour chaque méthode d'interpolation pour le site RIC-2.

Méthodes d'interpolation / Paramètres d'interpolation	IDW	RBF	OK	SK	UK	TIN
Nombre de points voisins	15	15	5	20	20	-
Forme du secteur de recherche	1 section	1 section	8 sections	1 section	1 section	-
Dimensions du secteur de recherche	cercle 68 X 68 m	ellipse 20 X 50 m	ellipse 203 X 67 m	ellipse 95 X 48 m	cercle 30 X 30 m	-
Angle de la forme du secteur de recherche	0°	255 °	343 °	342°	0°	-
Puissance	4,26 (valeur optimisée)	-	-	-	-	-
Paramètre	-	0,064 (valeur optimisée)	-	-	-	-
Fonction de Kernel	-	multi-quadratique	-	-	-	-
Modèle du variogramme	-	-	sphérique	exponentiel	sphérique	-
Portée	-	-	203 x 67	95 x 48	5,11	-
Seuil partiel	-	-	4,97	3,51	0,27	-
Effet de pépite	-	-	0	0	0,10	-
Taille du champ	-	-	17,12	8,03	0,64	-
Nombre de champs	-	-	12	12	12	-
Anisotropie	-	-	oui	oui	non	-
Voisinage (global vs. local)	-	-	-	-	local : 75 %	-
Méthode de triangulation	-	-	-	-	-	mass point

IDW : inverse de la distance ; RBF : fonction radiale; OK : krigeage ordinaire; SK : krigeage simple; UK : krigeage universel; TIN : réseau de triangles irréguliers.

Tableau 3.3
RMSE des points «test» des méthodes d'interpolation (en mètres)
pour chacun des neuf sites à l'étude.

Méthodes d'interpolation/ Sites à l'étude	IDW (m)	RBF (m)	OK (m)	SK (m)	UK (m)	TIN (m)	\bar{x} (m)
SNI-1	0.58	0.35	0.35	0.18	0.55	0.27	0.38
RIC-1	0.56	0.44	0.33	0.38	0.46	0.37	0.42
RIC-2	0.25	0.17	0.16	0.18	0.50	0.23	0.25
WIN-1	0.41	0.21	0.18	0.17	0.35	0.32	0.27
WIN-2	0.46	0.25	0.22	0.25	0.67	0.30	0.36
BRO-1	0.38	0.31	0.27	0.29	0.42	0.30	0.33
SHE-1	0.18	0.14	0.24	0.12	0.23	0.14	0.18
SHE-2	0.45	0.43	0.41	0.36	0.56	0.38	0.43
SHE-3	0.49	0.37	0.29	0.49	0.33	0.27	0.37
\bar{x}	0.42	0.30	0.27	0.27	0.45	0.29	0.33

IDW : inverse de la distance ; RBF : fonction radiale; OK : krigeage ordinaire; SK : krigeage simple; UK : krigeage universel; TIN : réseau de triangles irréguliers; \bar{x} : moyenne.

Tableau 3.4
Ordination des méthodes d'interpolation les unes par rapport aux autres
pour chacun des neuf sites à l'étude.

Méthodes d'interpolation/ Sites à l'étude	IDW	RBF	OK	SK	UK	TIN
SNI-1	6	4	3	1	5	2
RIC-1	6	4	1	3	5	2
RIC-2	5	2	1	3	6	4
WIN-1	6	3	2	1	5	4
WIN-2	5	3	1	2	6	4
BRO-1	5	4	1	2	6	3
SHE-1	4	3	6	1	5	2
SHE-2	5	4	3	1	6	2
SHE-3	6	4	2	5	3	1
Moyenne d'ordination	5.33	3.44	2.22	2.11	5.22	2.67

IDW : inverse de la distance ; RBF : fonction radiale; OK : krigeage ordinaire; SK : krigeage simple; UK : krigeage universel; TIN : réseau de triangles irréguliers.

Tableau 3.5

Nombre d'apparitions de chacune des méthodes d'interpolation
dans la classe supérieure.

Méthodes d'interpolation	Nombre d'apparitions dans la classe supérieure (sur 6)
IDW	2
RBF	5
OK	4
SK	5
UK	1
TIN	5

IDW : inverse de la distance ; RBF : fonction radiale; OK : krigeage ordinaire; SK : krigeage simple; UK : krigeage universel; TIN : réseau de triangles irréguliers.

Nota : Les sites sans différence significative entre les méthodes d'interpolation ne sont pas inclus dans ce tableau.

Tableau 3.6

Nombre de points «*test*» d'élévation avec une erreur absolue plus élevée que 60 cm dépendamment de chaque méthode d'interpolation pour l'ensemble des sites à l'étude

<i>Méthodes d'interpolation</i>	<i>Nombre de points «test» avec une erreur absolue supérieure à 60 cm</i>
IDW	66
RBF	39
OK	30
SK	31
UK	74
TIN	34
Total	274

IDW : inverse de la distance ; RBF : fonction radiale; OK : krigeage ordinaire; SK : krigeage simple; UK : krigeage universel; TIN : réseau de triangles irréguliers.

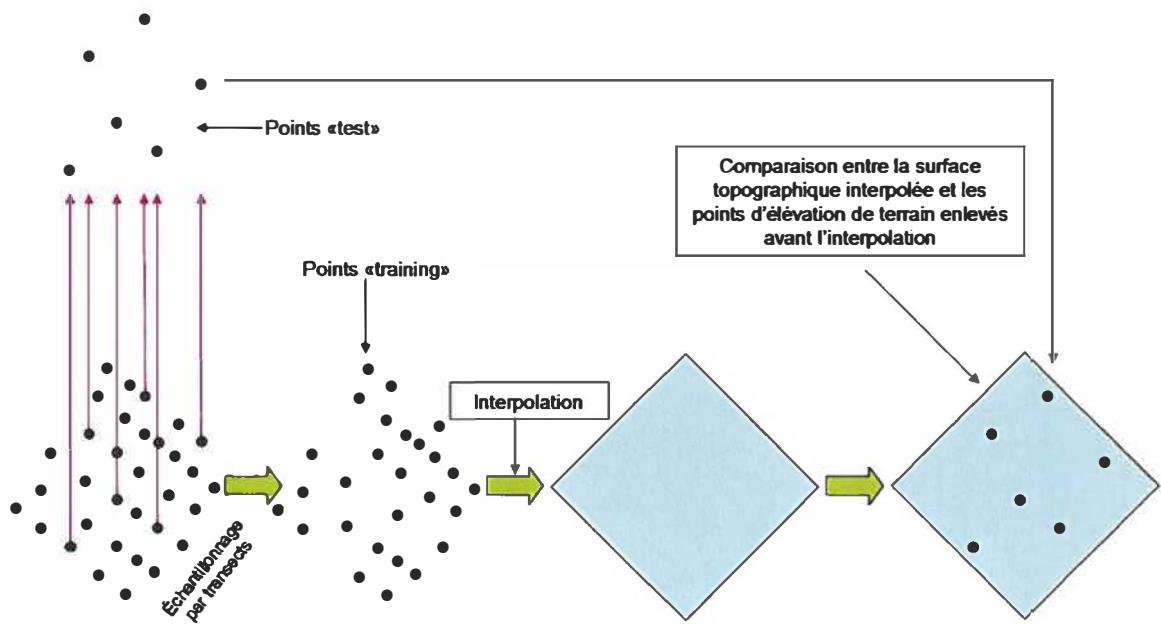


Figure 3.1
Schéma explicatif de la validation croisée

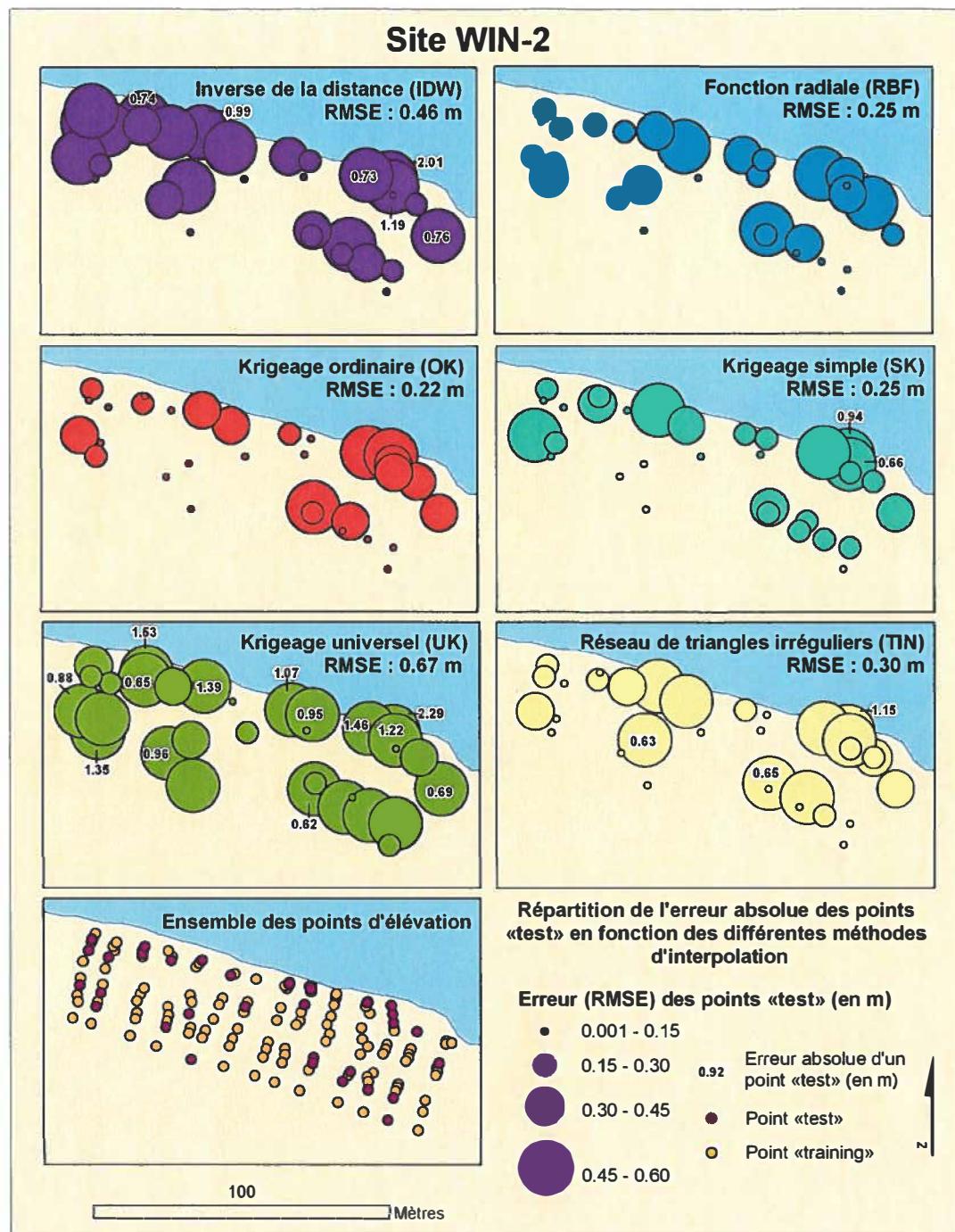


Figure 3.2
Exemple de carte de l'erreur (type 1) pour le site WIN-2

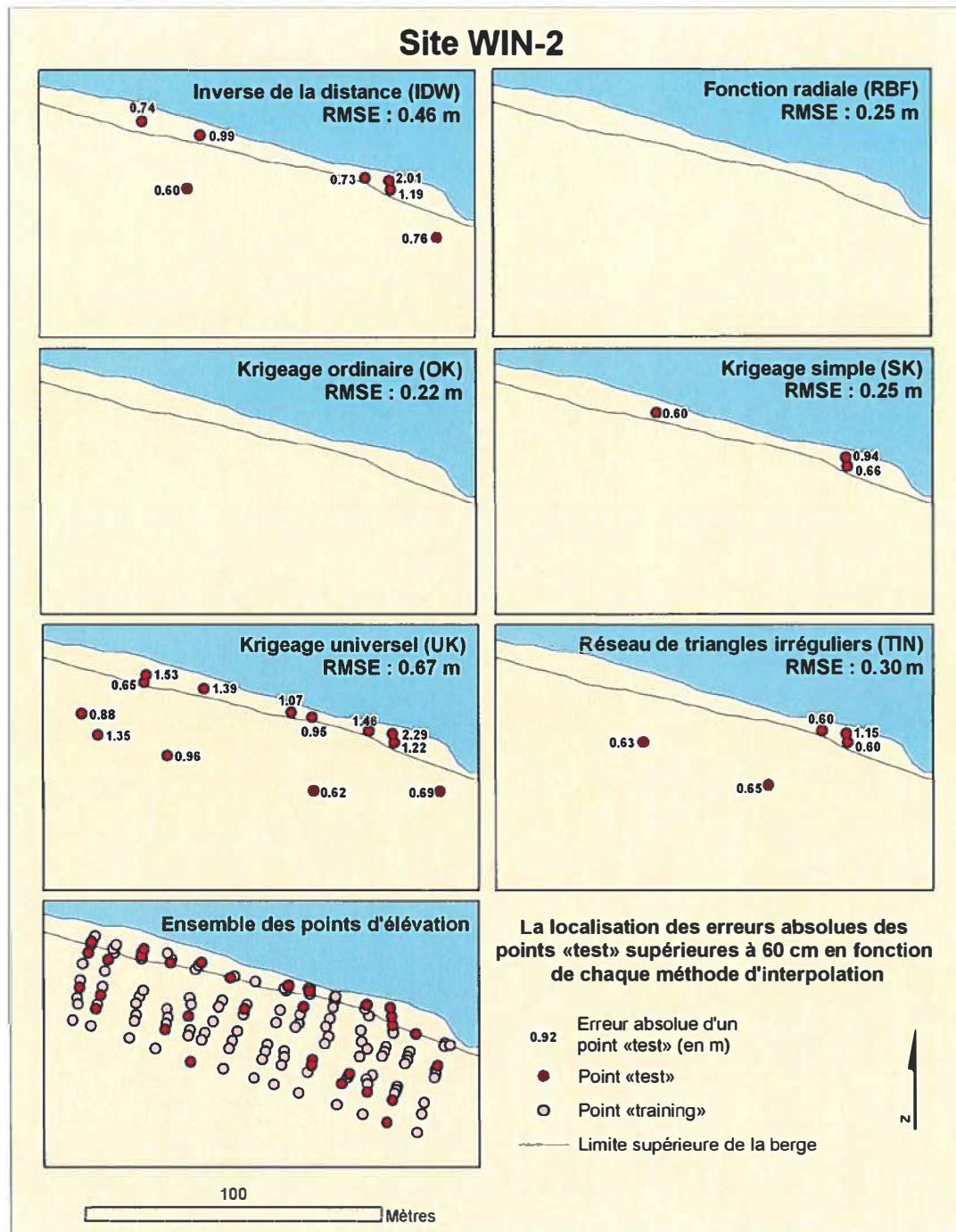


Figure 3.3
Exemple de carte de l'erreur (type 2) pour le site WIN-2

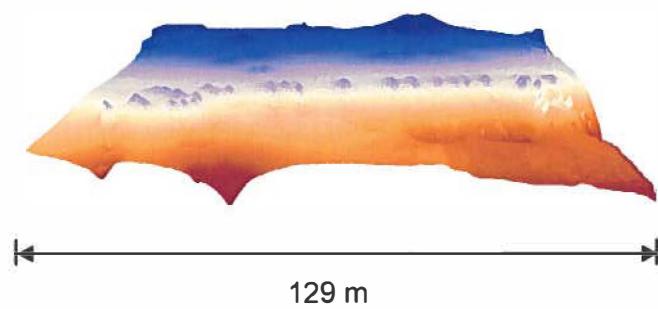


Figure 3.4

MNE en trois dimensions réalisé au moyen de la
méthode d'interpolation de l'inverse de la distance (IDW)
pour le site WIN-2

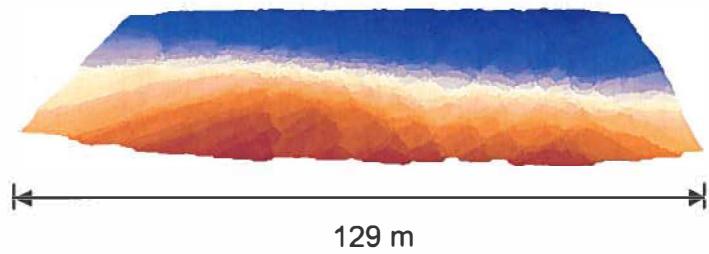


Figure 3.5
MNE en trois dimensions réalisé au moyen de la
méthode d'interpolation du krigage universel (UK)
pour le site WIN-2

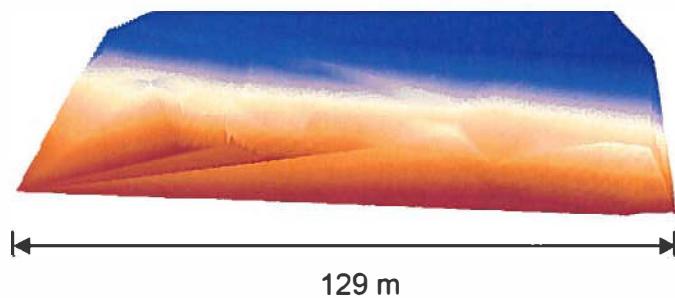


Figure 3.6
MNE en trois dimensions réalisé au moyen de la
méthode d'interpolation du réseau de triangles irréguliers (TIN)
pour le site WIN-2

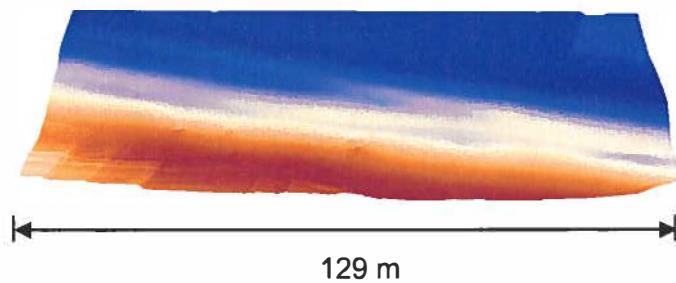


Figure 3.7
MNE en trois dimensions réalisé au moyen de la
méthode d'interpolation du krigage simple
pour le site WIN-2

ANNEXE A
Instructions aux auteurs
Revue Environnement urbain / Urban Environment



GUIDE DE PRÉSENTATION D'UN MANUSCRIT

Les manuscrits doivent répondre aux exigences d'une revue scientifique de qualité. En plus d'être lu par le rédacteur, tous les manuscrits seront soumis à une lecture à l'aveugle effectuée par deux membres experts. Les auteurs des manuscrits doivent s'assurer qu'il n'y ait pas d'indice permettant de révéler leur identité. Les exemplaires contenant les commentaires des examinateurs seront envoyés à tous les auteurs sans révélation de l'identité.

Les textes soumis doivent être originaux. Ils sont adressés, sous format électronique, en précisant le logiciel et le format utilisés, à l'adresse suivante environnement.urbain@ucs.inrs.ca. La rédaction communiquera avec la personne qui lui a acheminé le manuscrit principalement par courriel. Si les communications doivent être effectuées avec une autre personne ou en copie conforme avec d'autres personnes, veuillez le précisez. Une fois le manuscrit édité dans sa forme finale, la rédaction l'acheminera à la personne responsable pour une dernière vérification et approbation.

Les manuscrits ne doivent pas excéder 10 000 mots (notes et bibliographie incluses) pour un article et 4000 mots pour les notes de lecture et commentaires critiques. Tous les manuscrits soumis contiennent un résumé (100 mots) et cinq mots clés. Le titre, le résumé et les mots clés sont présentés en français et en anglais et, si possible, en espagnol.

LES DROITS D'AUTEUR

Les auteurs du manuscrit soumis acceptent de transférer à *Environnement urbain / Urban Environment* [ci-après appelée 'la Revue'] les droits liés à la publication de leur manuscrit dans la Revue, libre d'accès sur Internet. L'obtention de la permission pour toutes reproductions de matériel est la responsabilité de l'auteur.

En vue de la publication d'un manuscrit dans la Revue, les auteurs garantissent :

- que le manuscrit constitue un travail original, n'a pas encore été publié et n'a pas été considéré, dans sa forme finale (telle que soumis à la Revue), pour une publication papier ou électronique ;
- que leur manuscrit ne viole aucun droit d'auteur ;
- que, dans le cas d'un manuscrit écrit par plusieurs auteurs, ils ont obtenu la permission de tous les co-auteurs en vue de la publication du manuscrit dans la Revue et que tous les co-auteurs ont lu et accepté les éléments ci-dessus.

1. DIRECTIVES GÉNÉRALES

Le texte doit être saisi en double interligne et paginé (pied de page, droite). La police conseillée est Arial (taille de 11 points). Le texte est aligné à gauche et les marges sont de 2,5 cm. Les titres des sections du manuscrit sont numérotés selon la numérotation internationale (1. ; 1.1. ; 1.1.1., etc.). L'utilisation d'un seul espace après le point est obligatoire. Les nombres de un à dix doivent être écrit en lettre ; 11 et plus en chiffres.

Les tableaux sont intégrés au texte. Leur titre est indiqué en minuscule, gras, centré et écrit à la suite du numéro. La première ligne du tableau est en caractère gras et centré.

Les grilles des tableaux sont visibles :

1 – Titre du tableau

Titre de la première colonne	Titre de la deuxième colonne
Texte	Texte
Texte	Texte

Si elles sont de moins de 40 mots, les citations sont intégrées au texte, en utilisant les guillemets français (avec espace insécable) ou anglais (sans espace insécable) selon la langue du manuscrit. Les citations de plus de 40 mots sont en retrait de 1,25 cm, sans guillemet.

2. PAGE TITRE

La page titre du document inclut :

- en caractère gras, le titre du manuscrit tel qu'il apparaîtra dans sa forme finale pour publication dans la Revue et sa traduction vers l'autre langue officielle
- les noms des auteurs, leur organisme d'appartenance et leur coordonnées complètes (les numéros de téléphone, de télécopie, l'adresse électronique et l'adresse postale de l'auteur correspondant doivent être précisés par un astérisque).

- le résumé (100 mots) du manuscrit en français et en anglais (et, si possible, en espagnol)
- les cinq mots clés en français et en anglais (et, si possible, en espagnol)

3. FIGURES, CARTES, GRAPHIQUES, PHOTOGRAPHIES ET AUTRES

Les figures, graphiques, photographies et autres supports visuels doivent être numérotés individuellement et porter un titre précis et concis. Lorsque pertinent, la source sera bien indiquée. Ils doivent être envoyés si possible en format *png*, sinon en *jpg*, dans des fichiers séparés (le nom du fichier devant porter le numéro et type de l'item ; ex. : *figure 1.png*). Des notes indiquant clairement l'emplacement approximatif de ces items doivent figurer dans le texte (ex. : Insérer la figure 1 ici).

Toutes les figures, cartes, graphiques, photographies et autres éléments qui accompagnent le manuscrit doivent être présentés sur un support électronique et prêts pour la publication.

Les graphiques doivent être préparés dans Excel et la feuille de travail contenant les graphiques et les données doit être acheminée en même temps que le manuscrit.

4. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Les appels de références bibliographiques sont mentionnés au fil du texte de la façon suivante : (Berque, 1993). La liste des références est non numérotée et organisée par ordre alphabétique en fin d'article par noms d'auteurs et par ordre chronologique pour un auteur donné. Les références de la bibliographie doivent correspondre à des références citées dans le manuscrit (et vice versa). La bibliographie est soumise en se référant aux exemples suivants (tous les noms des auteurs apparaissent en petites majuscules) :

Livre (un auteur) : BERQUE, A. (1993). *Du geste à la cité. Formes urbaines et lien social au Japon*, Paris, Éditions Gallimard, 247 p.

Livre (plus d'un auteur) : ALLEN, J., D. MASSEY et A. COCHRANE (1998). *Rethinking the Region*, London, Routledge, 320 p. (Collection Entreprendre).

Article de revue : NOVEMBER, V. (2003). « L'incendie créateur de quartier ou comment le risque dynamise le territoire », *Cahiers de Géographie du Québec*, vol. 47, no 132, p. 367-388.

*Chapitre de livre : BEAUREGARD, R. (2003). « Democracy, storytelling and the sustainable city », in ECKSTEIN, B. et J.A. THROGMORTON (Ed.), *Story and Sustainability*, Cambridge, MIT Press, p. 65-77..*

ANNEXE B

Lettre de l'éditeur confirmant le statut de l'article

Article dans la revue Environnement Urbain / Urban Environment

Montréal, le 1^{er} avril 2008

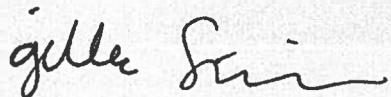
Ariane Drouin
Département de chimie, biologie et des sciences de l'environnement
Université du Québec à Trois-Rivières
Trois-Rivières, QC, CANADA

Objet : M-2008-a8
«Élaboration d'un modèle de simulation des niveaux d'inondation à partir d'un SIG et application à un site : rivière Saint-François à Sherbrooke»

Madame,

Il me fait plaisir de vous informer de l'acceptation définitive du manuscrit que vous avez soumis à la revue *Environnement urbain / Urban Environment*. Celui-ci sera inclus dans notre numéro thématique portant sur les inondations en milieux urbains et périurbains et sera disponible en ligne prochainement (<http://www.vrm.ca/cyber-revues.asp>).

Je vous remercie de l'intérêt que avez porté à notre revue et je vous prie, par la même occasion, d'accepter l'expression de ma considération.



Gilles Sénéchal

Rédacteur
Environnement urbain / Urban Environment

ANNEXE C**Instructions aux auteurs**

Hydrological Sciences Journal / Journal des sciences hydrologiques

GUIDELINES FOR AUTHORS

1

Published 2007 by IAHS Press, Centre for Ecology and Hydrology, Wallingford, Oxfordshire OX10 8BB, UK

The aim of IAHS Press is to publish papers which are clear, concise and uniformly presented, in a style readily understood by an international readership. Microsoft Word is the preferred word processing format. In brief:

- write in English or French
- present the material simply and concisely; in particular cross-check details of references
- use 12 pt Times New Roman font (also in Equation Editor 3.0) and set the paper size to A4 (21 x 29.7 cm)
- include tables and figures at appropriate points in the text (or at the end of the text); plan their layout to use page space economically and ensure all figures and tables are cited in the text, in numerical order
- use figures and tables sparingly; plan their layout to use page space economically and ensure all figures and tables are cited in the text, in numerical order
- check that all the figures and tables are clearly legible; colour figures will be printed in black and white, unless colour is requested (for which there is a charge)
- either embed graphics for all figures, saved in the word processed file (e.g. Word), or provide graphics files of figures separately; make sure only standard fonts are used in graphics files; if non-standard fonts are used they must be embedded
- a charge will be made if papers published in HSJ exceed 14 printed pages. The current charge per excess page is £45 (plus VAT). In general, 14 printed pages is equivalent to 21 pages of double-spaced typescript, including correctly sized figures and tables. For Red Book papers, the number of pages of typescript should not exceed 12 (or refer to instructions from the Editor)
- send the word processed file and graphics by e-mail, or on a diskette or CD; also send either a hard copy or a single PDF file with the complete manuscript as it appears in print
- PDF files are suitable for the peer-review process; however, for accepted papers, the word processor files (preferably Word/RTF) will be required by IAHS Press for production

Before sending your paper to IAHS Press, please note the detailed instructions below; examples and/or explanations are given on the right:

Paper title The wording of the title is important as it is the first thing readers see. Keep the length to ~16 words	Perception of the risk of flooding: the case of the 1995 flood in Norway
Authors First and second names; use numbers to indicate affiliations if necessary	IRINA KRASOVSKAIA ¹ , LARS GOTTSCHALK ² , NILS ROAR SÆLTHUN ³ & HALLVARD BERG ¹
Affiliation Provide full addresses including zip/post codes, and the e-mail of the corresponding author	1 Norwegian Water Resources and Energy Directorate, NVE, PO Box 5091, Maj., N-0301 Oslo, Norway irina.gottschalk@telia.com 2 Institute of Geophysics, University of Oslo, PO Box 1022, Blindern, N-0315 Oslo, Norway 3 Norwegian Institute for Water Research, PO Box 173 Kjelsås, N-0411 Oslo, Norway
Abstract / Résumé	Abstract This should present the main points of the paper and give the principal conclusions. It should be a single paragraph of no more than 150 words and follow on after the heading. Symbols and equations, as well as references, are discouraged unless absolutely necessary.
Key words / Mots clefs Include up to 10 key words/phrases, such as: approach; location; models used; techniques – to be compiled in an index at the end of the volume	Key words flooding; risk; public perception; decision making; Norway
Bilingual title, abstract and key words	Papers published in <i>Hydrological Sciences Journal</i> have bilingual title, abstract and key words, in English and French. It is not necessary to provide a French/English translation when submitting a paper. Authors of accepted papers will be asked to provide the second language items but, if this is not possible, the translation will be obtained from a member of the HSJ editorial board. Papers in French accepted for IAHS Red Books should include English translations of the title, abstract and key words.

Notation (see also Mathematics)	All symbols should be defined either in the body text, immediately after their first appearance, or in a separate section, immediately after the key words. Do not use both methods. If a list of Notation is used, they should be put in alphabetical order (Roman letters first, then Greek letters).																																																								
Body text Sections should have headings of up to three levels.	<p>HEADING 1 Upper case, bold, start at left margin</p> <p>Heading 2 Lower case, bold, start at left margin</p> <p>Heading 3 Lower case, bold, indented; text run on</p>																																																								
Language In Word, set the language to English (U.K.), or follow the spelling of the Oxford English Dictionary	See Appendix for commonly used IAHS house style expressions.																																																								
Lists	Listed points should begin with (a), (b), (c) ..., and further subdivisions denoted by (i), (ii), (iii) ...																																																								
Initial capitals	(a) proper names, e.g. River Amazon, Aswan Dam, the Earth; (b) adjectives derived from proper names, e.g. Markov series, Arctic ice, Bayesian estimation; (c) geological eras and formations etc., e.g. Cambrian, Holocene, Upper Greensand; (d) references to tables and figures, e.g. "it is seen from Fig. 2 and Table 4 that ...".																																																								
Numerals	See Appendix																																																								
Units	(a) Use SI units or SI derived units. (b) Do not abbreviate week, month or year, which are non SI units. Use s, min, h and d (rather than sec, mins, hr/hrs, day/days) for second, minute, hour and day, respectively. (c) Use L (rather than l) for litre; use hm ³ (rather than Mm ³ , which means 10 ¹⁸ m ³) for millions of cubic metres. (d) Multiplication of units should be indicated by a space, e.g. N m, and division either by negative exponents (e.g. m s ⁻²) or by use of the solidus (e.g. m/s ²); however repeated use of the solidus (e.g. m/s/s) is not permitted. The convention adopted must be used consistently throughout the paper. (e) Prefixes of units such as M (mega = 10 ⁶) and μ (micro = 10 ⁻⁶) have no space between (e.g. μ s, MW). Note that any power to a unit applies also to the prefix. Note also that the prefix kilo is lower case k (e.g. km, not Km – the upper case K is the symbol of kelvin). (f) All units should be typeset using upright (Roman) fonts, not italic or bold.																																																								
Abbreviations	See Appendix																																																								
Tables Generate rows and columns of tables using the features of your word processor; avoid the use of text separated by tabs, or graphics of tables. Put a short explanatory caption above each table and, if necessary, an explanation/legend below it.	<p>Example:</p> <p>Table 1 Summary of water resources in each continent (estimated for 1995).</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Continent</th> <th>Population (10³)</th> <th><i>Q</i> (km³)</th> <th><i>D</i> (km³)</th> <th><i>I</i> (km³)</th> <th><i>A</i> (km³)</th> <th><i>W</i> (km³)</th> <th><i>R_{ws}</i> (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Africa</td> <td>690 550</td> <td>3616.5</td> <td>13.9</td> <td>9.1</td> <td>136.1</td> <td>159.1</td> <td>4.4</td> </tr> <tr> <td>Asia</td> <td>469 180</td> <td>9384.9</td> <td>142.4</td> <td>203.8</td> <td>1697.4</td> <td>043.7</td> <td>21.8</td> </tr> <tr> <td>Europe</td> <td>688 143</td> <td>2190.9</td> <td>59.7</td> <td>233.4</td> <td>139.2</td> <td>432.3</td> <td>19.7</td> </tr> <tr> <td>Oceania</td> <td>28 164</td> <td>1679.6</td> <td>8.9</td> <td>0.4</td> <td>6.0</td> <td>15.4</td> <td>0.9</td> </tr> <tr> <td>North America</td> <td>454 926</td> <td>3824.4</td> <td>80.5</td> <td>263.7</td> <td>315.8</td> <td>660.0</td> <td>17.3</td> </tr> <tr> <td>South America</td> <td>319 214</td> <td>8789.3</td> <td>22.2</td> <td>13.1</td> <td>102.1</td> <td>137.4</td> <td>1.6</td> </tr> </tbody> </table> <p><i>Q</i>: annual water availability; <i>D</i>: annual domestic abstraction; <i>I</i>: annual industrial abstraction; <i>A</i>: annual agricultural abstraction; <i>W</i>: total annual abstraction (= <i>D</i> + <i>I</i> + <i>A</i>); <i>R_{ws}</i>: ratio of abstraction to availability.</p>	Continent	Population (10 ³)	<i>Q</i> (km ³)	<i>D</i> (km ³)	<i>I</i> (km ³)	<i>A</i> (km ³)	<i>W</i> (km ³)	<i>R_{ws}</i> (%)	Africa	690 550	3616.5	13.9	9.1	136.1	159.1	4.4	Asia	469 180	9384.9	142.4	203.8	1697.4	043.7	21.8	Europe	688 143	2190.9	59.7	233.4	139.2	432.3	19.7	Oceania	28 164	1679.6	8.9	0.4	6.0	15.4	0.9	North America	454 926	3824.4	80.5	263.7	315.8	660.0	17.3	South America	319 214	8789.3	22.2	13.1	102.1	137.4	1.6
Continent	Population (10 ³)	<i>Q</i> (km ³)	<i>D</i> (km ³)	<i>I</i> (km ³)	<i>A</i> (km ³)	<i>W</i> (km ³)	<i>R_{ws}</i> (%)																																																		
Africa	690 550	3616.5	13.9	9.1	136.1	159.1	4.4																																																		
Asia	469 180	9384.9	142.4	203.8	1697.4	043.7	21.8																																																		
Europe	688 143	2190.9	59.7	233.4	139.2	432.3	19.7																																																		
Oceania	28 164	1679.6	8.9	0.4	6.0	15.4	0.9																																																		
North America	454 926	3824.4	80.5	263.7	315.8	660.0	17.3																																																		
South America	319 214	8789.3	22.2	13.1	102.1	137.4	1.6																																																		

Figures All diagrams and photographs should be referred to as figures and numbered serially in the order they are mentioned in the text. If reference is made to separate parts of a figure, label these (a), (b), (c), etc.

Legends The font used for legends and labels should be sans serif (e.g. Arial,) and ~8pt (1.5 mm).

Figure captions Each caption should be a brief but complete description of the figure it refers to. To avoid lengthy captions, include legends and appropriate labelling on the figures themselves

The acceptable resolution of electronic images depends on the type of figure. Recommended resolutions are: half-tone, 300 dpi; line art, as high as possible (minimum 1200 dpi); images using grey scales, 600–1200 dpi. TIFF or EPS are the preferred formats, but PS, JPEG or PICT(Mac) may be used, preferably with a Bitmap or TIFF preview; GIF is too low-grade.

Mathematics All mathematics should be legible and clear, particularly in the position of subscripts, superscripts and multi-line expressions. Follow the ISO 31-11 standard for notation (refer to the summary points opposite). In Equation Editor, define the font of all Styles (except Symbol) to Times New Roman. Number all displayed equations in parentheses at the right-hand margin, even if they are not referenced in the text. References in the text should be in the form: "... equation (10) ..."

Example:

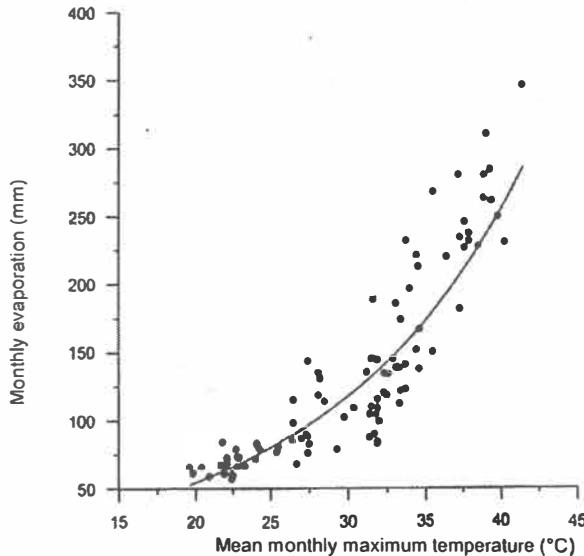


Fig. 1 Relationship between mean monthly maximum temperature and monthly pan evaporation at Bhakra.

Please also note the following points:

- Graphics embedded in documents are acceptable; for graphics in separate files, the preferred formats are *.tif, *.gif and *.jpg. Excel (*.xls) graphics are also accepted.
- Scanned figures: ensure that the resolution is sufficiently high to give good quality reproduction (300–400 dpi is preferred).
- In drawing figures, make sure only standard fonts are used; if non-standard fonts are used they must be embedded in the graphic.
- Colour figures are acceptable, but authors must pay for colour printing (i.e. if the publication is in print only, such as IAHS Red Books). In HSJ, colour figures will appear in colour in the online version of the journal without additional charge, but black and white will be the default mode in the print version. Therefore, make sure that colour figures are legible even when converted to black and white or greyscale.
- The price for printing in colour is £300 (plus VAT) per figure, or page of colour figures. Payment must be made to IAHS Press before the publication goes to press.

Example:

$$r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sigma_x \sigma_y} \quad \text{with} \quad C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(y_{i+k} - \bar{y}) \quad (1)$$

The following rules indicate the final appearance of mathematics in printed papers. The closer you follow these rules in the initial manuscript, the smaller the risk of ambiguity and misprints:

- Variables and parameters should be italic (e.g. x , Y , $f(x)$, β). However, multi-letter variables (e.g. RMSE) should be upright.
- Function names should be upright (e.g. $\ln x$, $\exp(x^2)$).
- Textual subscripts or superscripts should be upright (e.g. x_{\max} , T_{\min} where 'max' and 'min' stand for maximum and minimum, respectively).
- Mathematical constants and mathematical operators should be upright (e.g. $e = 2.718\dots$, \int in integrals and derivatives).
- Vectors, matrices and vector or matrix function names should be bold (e.g. x , Y , ω , KH as vectors or matrices; $f(x)$ as a vector function; $\text{diag}(a_1, \dots, a_n)$ as a matrix).
- Do not use the hyphen (-) as a minus or subtraction sign; use the en-dash (–) instead. Also do not use the letter 'x' or the symbol '×' as a multiplication sign; either use the symbol '×' or middle dot (·) between numerals, or use a thin space (or even no space).
- For simple expressions in the body of the text, an oblique line or solidus (/) should be used to denote a fraction, rather than a horizontal line, e.g.

$$(x + y)/2\pi = z \quad \text{rather than} \quad \frac{x + y}{2\pi} = z.$$

- Write complex exponential functions in the form: $\exp(\dots)$, e.g. $\exp(a + by^2)^i$ rather than $e^{(a + by^2)^i}$.
- Place limits above and below integral and summation signs, rather than in line with them.
- Parentheses, brackets and braces are nested in the order $\{\{\}\}$.
- Do not punctuate displayed expressions with commas, full points, etc.

Acknowledgements

Place between the end of the paper and the references

REFERENCES You should indicate a reference to someone else's work in the text by inserting the author's surname and date in brackets. e.g. for **single authors**, use the form: "...Gelhar (1993)", for **two authors**: "...(Nunes & Ribeiro, 2000)...", and for **three or more**: "...Robson *et al.* (1998) showed..."

The full details of all cited texts must be listed at the end of the text and all entries in the reference list must be cited in the text.

Please refer to the examples opposite.

An example list of journal abbreviations is given in the **Appendix**.

Other common abbreviations used in references are:

vol.
ed. (edited)
edn (edition)
PhD
MSc
Proc. (Proceedings of the)
Inst. (Institute)
Instn (Institution)
Symp.
Conf.
Tech. (Technical)

Examples of types of references:**Journal:**

Hrissanthou, V. (2002) Comparative application of two erosion models to a basin. *Hydrol. Sci. J.* **47**(2), 279–292.

Robson, A. J., Jones, T. A. & Reed, D. W. (1998) A study of national trend and variation in UK floods. *Int. J. Climatol.* **18**, 165–182.

Book:

Gelhar, L. W. (1993) *Stochastic Subsurface Hydrology*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA.

Nunes, L. M. & Ribeiro, L. (2000) Permeability field estimation by conditional simulation of geophysical data. In: *Calibration and Reliability in Groundwater Modelling* (ed. by F. Stauffer, W. Kinzelbach, K. Kovar & E. Hoehn) (ModelCARE'99, Zürich, Switzerland, September 1999), 117–123. IAHS Publ. 265, IAHS Press, Wallingford, UK.

Edited book:

Yoshida, Z. (1963) Physical properties of snow. In: *Ice and Snow* (ed. by W. Kingery), 124–148. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA.

Report:

Guo, W. & Langevin, C. D. (2002) User guide to SEAWAT: a computer program for simulation of three-dimensional variable-density groundwater flow. *US Geol. Survey Open File Report 01-434*.

Thesis:

Shane, R. M. (1964) The application of the compound Poisson distribution to the analysis of rainfall records. MSc Thesis, Cornell University, Ithaca, New York, USA.

doi:

Berg, A. A., Famiglietti, J. S., Walker, J. P. & Houser, P. R. (2003) Impact of bias correction to reanalysis products on simulations of North American soil moisture and hydrological fluxes. *J. Geophys. Res.* **108**(D16), 4490, doi:10.1029/2002JD003334.

APPENDIX**Commonly used IAHS Press house style expressions:**

autocorrelation	drawdown	infrared	northwest	semi-arid	sub-basin
baseflow	field work	interdisciplinary	raingauge	semi-axis	subsurface
bed load	flash flood	lag time	rain recorder	set-up	surface water
borehole	flood plain	lognormal	rainstorm	sheet flow	time series
cooperate	freshwater	meltwater	real time	snow cover	upstream
coordinate	groundwater	multidimensional	river bed	snowmelt	wastewater
cross-correlation	geochemistry	nongovernmental	runoff	storm water	water table
database	headwater	nonlinear	seawater	streamflow	worldwide

Example journal abbreviations:

<i>Acta Geophys. Pol.</i>	<i>Environ. Pollut.</i>	<i>J. Glaciol.</i>	<i>Met. Gidrol.</i>	<i>US Geol. Survey Water Supply Paper</i>
<i>Adv. Water Resour.</i>	<i>Eos (AGU)</i>	<i>J. Hydraul. Div. ASCE</i>	<i>Monthly Weather Rev.</i>	<i>Vodochspod. Casopis</i>
<i>Appl. Statist.</i>	<i>Geophys. Res. Lett.</i>	<i>J. Hydroinformatics</i>	<i>Natural Hazards</i>	<i>Water Int.</i>
<i>Bull. Am. Met. Soc.</i>	<i>Ground Water</i>	<i>J. Hydrol.</i>	<i>Nature, London</i>	<i>Water Resour. Bull.</i>
<i>C. R. Acad. Sci., Paris</i>	<i>Hydrol. Earth System Sci.</i>	<i>J. Hydrol. Engng ASCE</i>	<i>Nordic Hydrol.</i>	<i>Water Resour. Management</i>
<i>Cah. ORSTOM</i>	<i>Hydrol. Processes</i>	<i>J. Hydrol., NZ</i>	<i>Photogramm. Engng and Remote Sens.</i>	<i>Water Resour. Res.</i>
<i>Can. J. Earth Sci.</i>	<i>Hydrol. Sci. J.</i>	<i>J. Irrig. Drain. Div. ASCE</i>	<i>Quart. J. Roy. Met. Soc.</i>	<i>Water SA</i>
<i>Catena</i>	<i>Int. J. Climatol.</i>	<i>J. Royal Statist. Soc.</i>	<i>Remote Sens. Environ.</i>	<i>Z. Geomorphol.</i>
<i>Climatic Change</i>	<i>J. Agric. Engng Res.</i>	<i>J. Sanit. Engng Div. ASCE</i>	<i>Rev. Sci. Eau</i>	<i>Z. Gletscherk.</i>
<i>Earth Surf. Processes Landf.</i>	<i>J. Appl. Met.</i>	<i>La Houille Blanche</i>	<i>Trans. Am. Geophys. Union</i>	<i>Glazialgeol.</i>
<i>Ecol. Modelling</i>	<i>J. Climate</i>	<i>Limnol. Oceanogr.</i>		

General abbreviations:

- (a) Commonly used abbreviations such as:

a.m.s.l.	above mean sea level	RMS	root mean square
BOD	biochemical oxygen demand	SD	standard deviation
DO	dissolved oxygen	TDS	total dissolved solids

need not be defined. Less obvious ones, such as ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler), ANN (artificial neural networks) and PCA (principal components analysis), should be given in full when first used, followed by the abbreviation or acronym in brackets.

- (b) Abbreviations such as FAO, IAHS, UK, USA, UNESCO, WMO, do not have full points.
 (c) Use °N, °S, °E, °W when defining geographical locations by lines of latitude and longitude, but north, south, northeast, southwestern etc. otherwise.
 (d) Dr, Mr, Engng etc. (which end with the last letter of the word they abbreviate) do not have a full point.
 (f) For times of day use, 04:30 h or 04:30 GMT; 18.00 UCT.
 (g) Cross-references to equations, tables and figures in the text should be in the form "equation (1)", "Table 2", "Fig. 3" or "Figs 4 and 5".
 (h) Use: i.e., e.g., etc., cf., viz.
 (i) Avoid starting a sentence with an abbreviation: spell out the abbreviation in full or rearrange the sentence.

Numerals

- (a) Use numerals before units of measurement unless the number is at the beginning of a sentence, e.g. "Fifty-millilitre samples were taken every 10 s ...".
 (b) Leave a character space between the number and the unit except before units such as %, %o, °C, °N.
 (c) Numbers from one to nine should be spelt out, except where there are units or the number implies arithmetical manipulation, e.g. a factor of 7. The decimal sign is a full point (period) on the line (in both English and French). Numerals of five or more digits on either side of the decimal point are grouped in three-digit blocks by spaces, e.g. 25 421.9314, 0.421 09. Numbers less than one must have 0 before the decimal point, e.g. 0.37, -0.824.
 (d) Ranges should be given in full, e.g. 1956–1963, pages 241–243; to avoid confusion with subtraction, there should be no space either side of the en-dash. Units need not be repeated in ranges, e.g. 0–213°C, from 829 to 32 100 km², between 829 and 32 100 km².
 (e) Spell out first, second, etc.
 (f) Set out dates in the form 20–23 October 1980; the 1950s; 17th century.

PUBLICATION PROCEDURE

Note: For Red Books, please refer to book Editor's instructions; papers are generally submitted to the book Editor, *not* to IAHS Press.

The Editor (Dr Z. W. Kundzewicz) and Deputy Editor (Dr D. Koutsoyiannis) welcome original papers, scientific notes and discussions. All papers submitted to the Journal are peer reviewed by an international panel of Associate Editors and other experts. Authors are encouraged to suggest potential referees with their submission. Authors will have to confirm that the work, or any part of it, has not been published before and is not presently being considered for publication elsewhere.

Please submit *Hydrological Sciences Journal* papers to:

**The Editor, IAHS Press,
Centre for Ecology and Hydrology
Wallingford, Oxfordshire OX10 8BB, UK**

or send as an email attachment to:

frances@iahs.demon.co.uk

All papers (Red Book and *HSJ*) will be reviewed and edited, including language review. Authors may be asked to revise their papers according to the recommendations of the reviewer(s), and/or to answer queries raised by the Editor(s). Accepted papers will be edited and formatted in a standard style; figures will be adjusted if necessary and inserted correctly within the text. The corresponding author will be sent a proof for correction (usually by email), and will be asked to mark errors and other essential changes on this and return it very quickly. The papers will then be assembled and paginated in final publication order. (Note: final printed pages will be reduced to 87%).