

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

Ariane Drouin

Volume 2, 2008

Inondations en milieux urbains et périurbains
Floods in urban and suburban areas

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/019220ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/019220ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Institut national de la recherche scientifique

ISSN

1916-4645 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Drouin, A. (2008). 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. *Environnement Urbain / Urban Environment*, 2, 33–49.
<https://doi.org/10.7202/019220ar>

Résumé de l'article

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 de 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.

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

Ariane DROUIN

❶ 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 de 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



❷ ABSTRACT

A Geographic Information System (GIS)-based project consisting of designing and applying a simulation model of flood levels was set up in order better spatially identify the areas most at risk for riverside populations and to infrastructure during important floods. This simulation model uses flows and levels data, within a GIS, and a highly precise digital elevation model (DEM), to create a simulation and a visualization of different levels reached by the Saint-François River. Results obtained from this model are presented visually in the form of maps to observe and identify the limits regarding bodies of water during high flows or major floods.

KEYWORDS ■ Simulation model, flood level, digital elevation model (DEM), Geographic information system (GIS), urban areas

❸ 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.

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 telles 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 subi le plus d'inondations entre 1900 et 2000, pour un total de 53 inondations¹. 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. 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 les gouvernements afin de diminuer les risques et les conséquences découlant de ce phénomène.

En 1976, Environnement Canada et le ministère de l'Environnement du Québec se sont associés (Convention Québec-Canada, 1976) pour réaliser, dans les municipalités le 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 ont également été réalisés, au Canada et ailleurs dans le monde, 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, 1999) 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 des variables comme 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). Cet 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 à 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

¹ 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.

donc plus spécifiquement à identifier les secteurs riverains et les infrastructures les plus touchés 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. 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 et al., 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 kilomètres (Radarsat-1) et même 120 kilomètres (Landsat TM). Toutefois, la résolution spatiale des images satellite se mesure plutôt en 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.

I. 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 majeure partie de ces municipalités, mis à part 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 le 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 sera intégrée à la base de données du Centre interuniversitaire d'études québécoises (CIEQ-UQTR). À partir de ces données historiques, il est possible, pour une même municipalité, de recenser 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 1 présente une carte de localisation du bassin versant de la rivière Saint-François et des différents sites à l'étude.

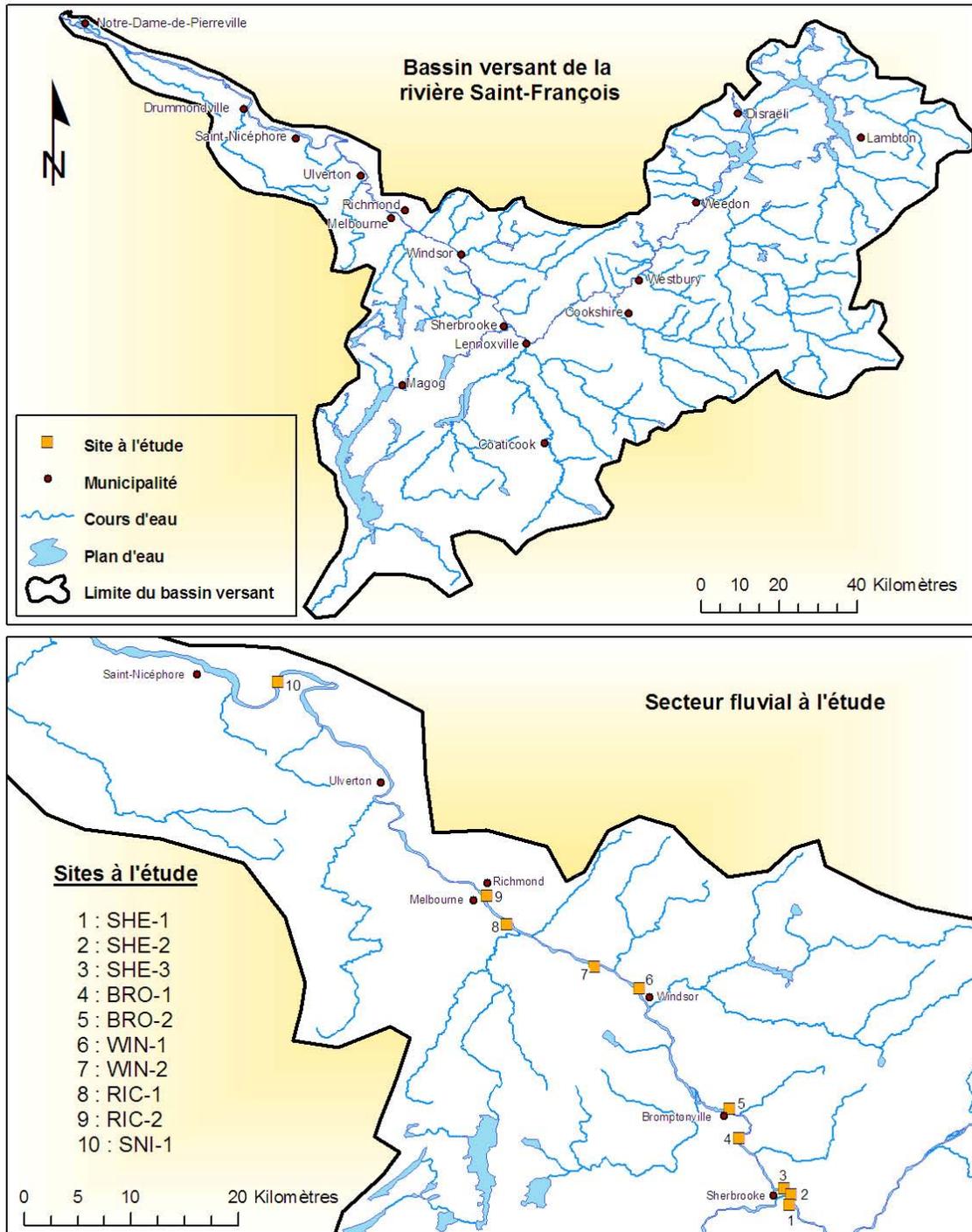


Fig. 1 — Localisation du bassin versant de la rivière Saint-François et des sites à l'étude

2. APPROCHES MÉTHODOLOGIQUES

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

La figure 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) 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 permet d'évaluer les secteurs touchés, et par le fait même les infrastructures affectées, dépendamment des débits et des 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 (Ministère des Ressources naturelles du Québec, 2000) 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 et al., 2008), ce qui correspond à une période de retour pour cette cote critique d'environ 5 ans pour la période entre 1994 et 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.

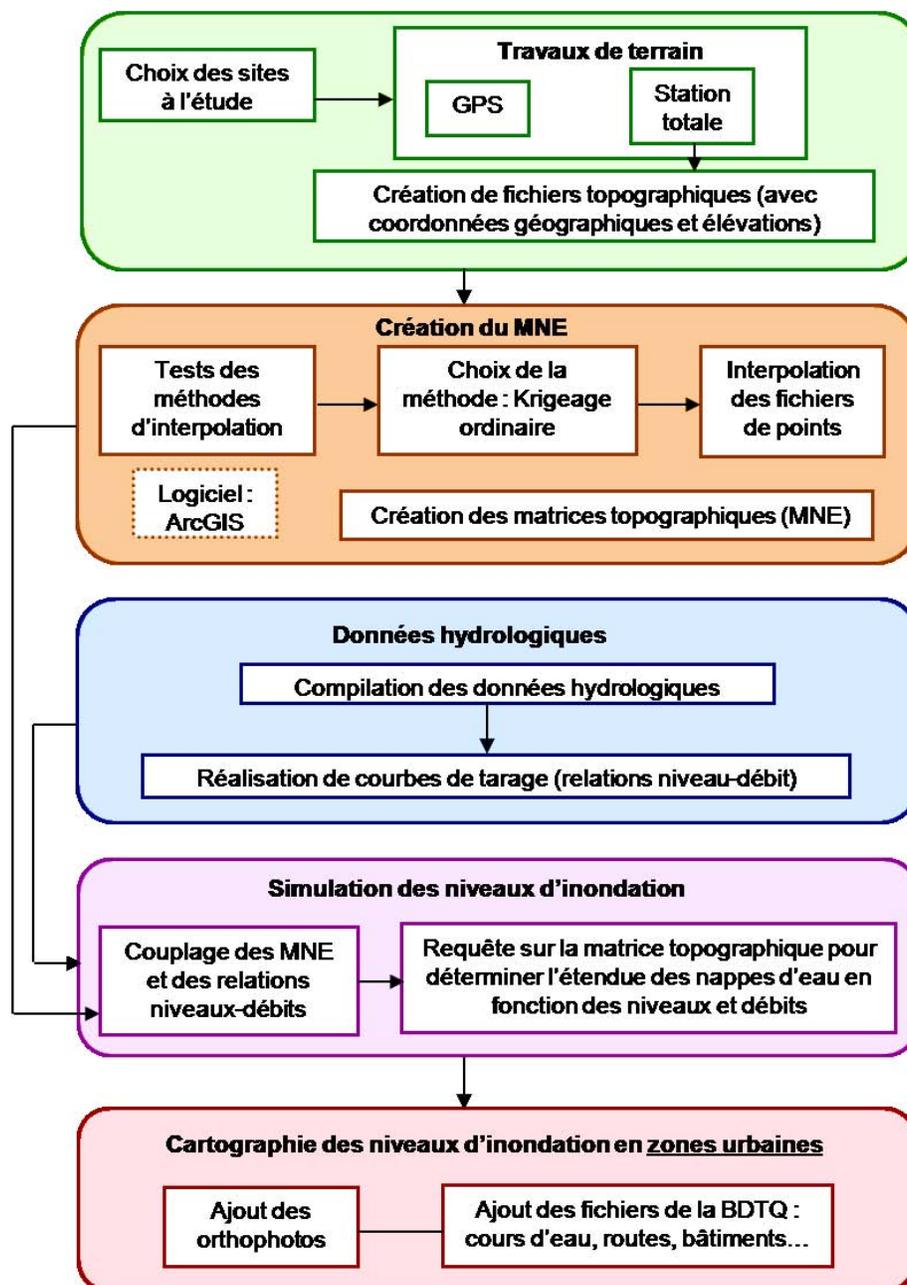


Fig. 2 — Schéma méthodologique du modèle de simulation des niveaux d'inondation

2.2 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 intervalles de dix mètres, ont été réalisés. Ces intervalles correspondent 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 qu'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 nous montre un exemple de transects réalisés à l'aide de la station totale et les points sur l'image représentent 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 (par

exemple la présence d'arbres). Il faut mentionner que cette méthode d'échantillonnage par transects a été choisie parce qu'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 pour 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.

2.3 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

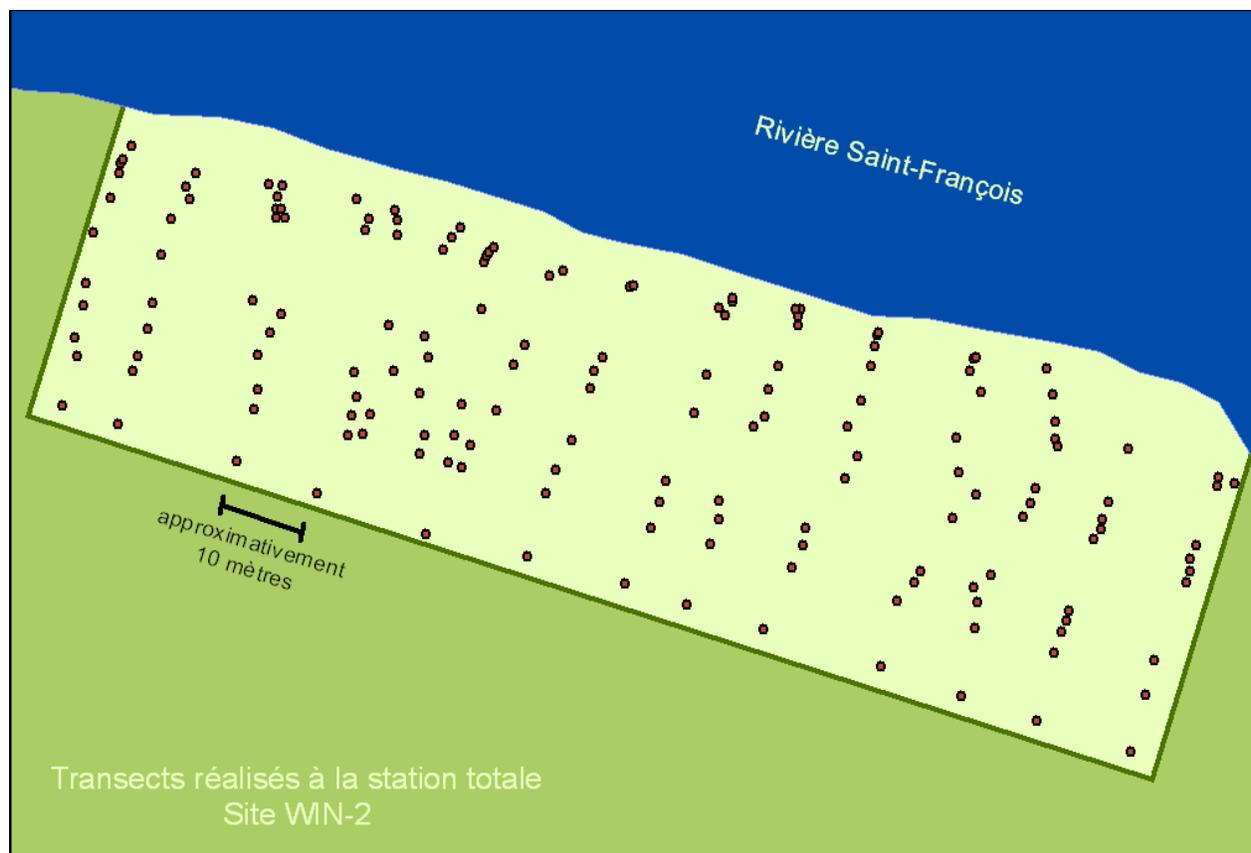


Fig. 3 — Exemple de l'échantillonnage par transects réalisés à l'aide de la station totale (Source : BDTQ, 1 : 20 000, Ministère des Ressources naturelles du Québec, 2000)

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 qui convient le mieux à l'étude.

Pour élaborer le modèle avec la plus grande précision possible, plusieurs méthodes d'interpolation ont été testées afin de sélectionner la méthode optimale, celle qui permet 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 krigeage, 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 d'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 (combinaison de la validation croisée, du RMSE et de l'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 fiabilité de 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 4 représente un schéma du fonctionnement de la validation croisée. Cette représentation imagée permet une meilleure compréhension de son fonctionnement.

2.4 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 : le CD-ROM Hydat (Environnement Canada, 2001), les données et graphiques du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), ainsi que les 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. Des données hydrologiques étalées sur un grand nombre d'années sont donc disponibles, ce qui permet la réalisation d'une relation entre les débits et les 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, notamment à Windsor, à Richmond et à Drummondville.

2.5 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 pour de grandes surfaces est un domaine assez dans la représentation de la microtopographie. De manière générale, la représentation topographique bien développé. Cependant, la représentation de la microtopographie intègre des éléments plus complexes puisqu'elle implique la représentation de très petits éléments du relief, ce 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 ; une telle difficulté s'est imposée dans certains sites boisés. Un autre problème relève de la réalisation des interpolations.

Fig. 4 — Schéma explicatif de la validation croisée

La principale difficulté en lien avec ces dernières réside dans le 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 puisque, si l'on tient compte de la microtopographie, c'est-à-dire de très faibles variations topographiques, les sites ont des caractéristiques particulières qui les distinguent les uns des autres. Ils produisent ainsi des résultats relativement différents et, par le fait même, différentes erreurs peuvent survenir 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.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 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 risquent de l'être lors de débordements. À titre d'exemple, la figure 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 à 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 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 a été d'une

importance limitée, puisqu'elle se situe 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, a été affectée par la montée des eaux. On peut également constater qu'aucune infrastructure urbaine importante située dans ce secteur n'a été affectée par cette crue. Par contre, l'inondation du 19 avril 1982 a été beaucoup plus importante, puisqu'elle dépasse 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 importantes du siècle dernier.

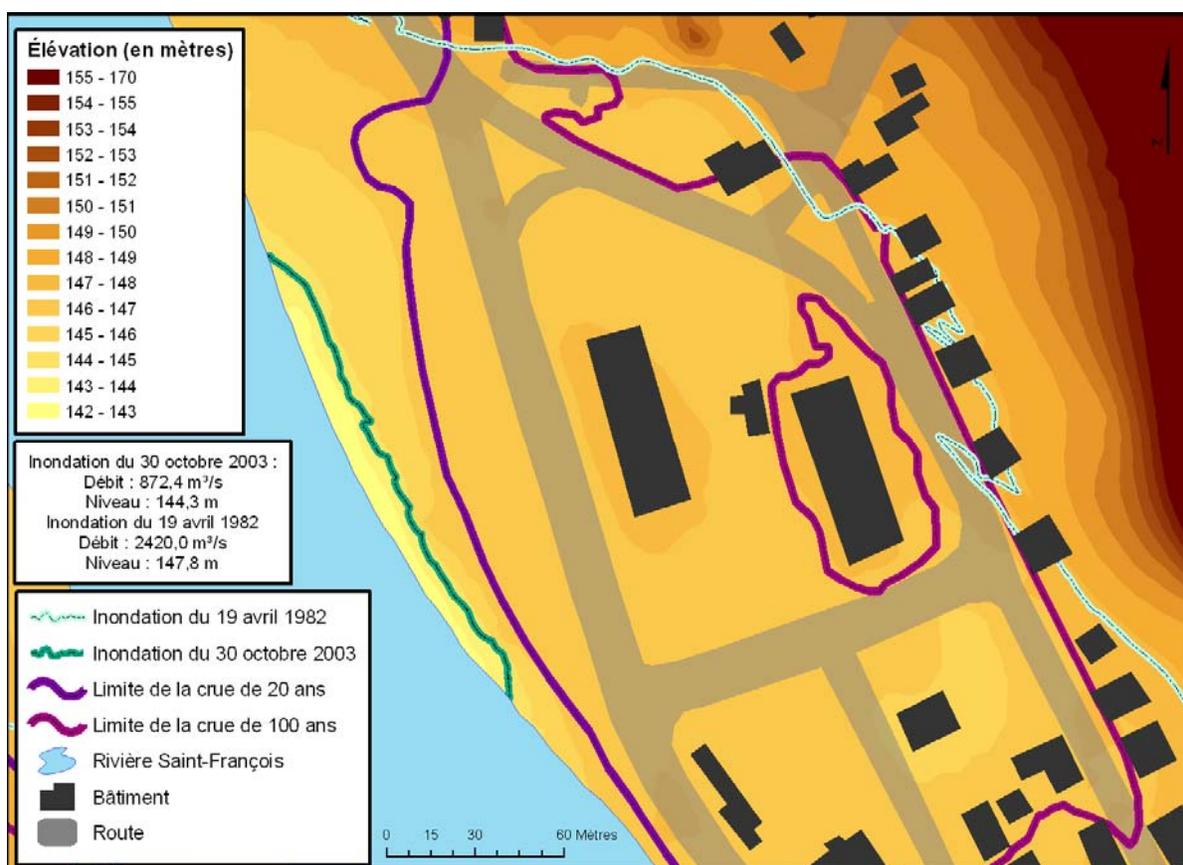


Fig. 5 — Représentation des inondations de 1982 et 2003 (Site SHE-2)

(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.qv.ca>)

Les figures 6, 7 et 8 représentent toujours le même site que celui de la figure 5. Sur la figure 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.

L'utilisation de la carte des pentes permet également d'identifier la limite supérieure de la berge (figure 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 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 une plus grande attention, 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.

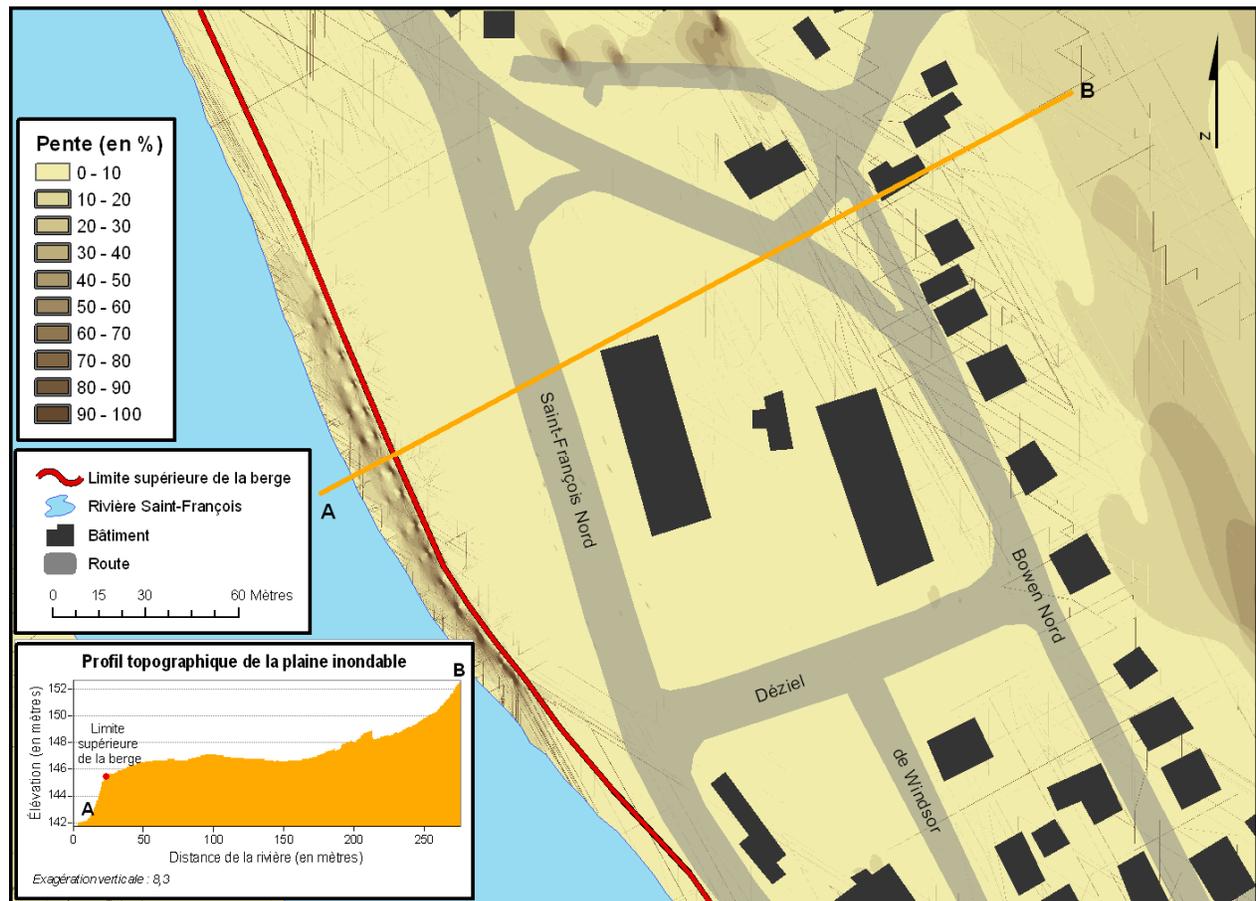


Fig. 6 — Les pentes et la localisation de la limite supérieure de la berge (Site SHE-2)

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

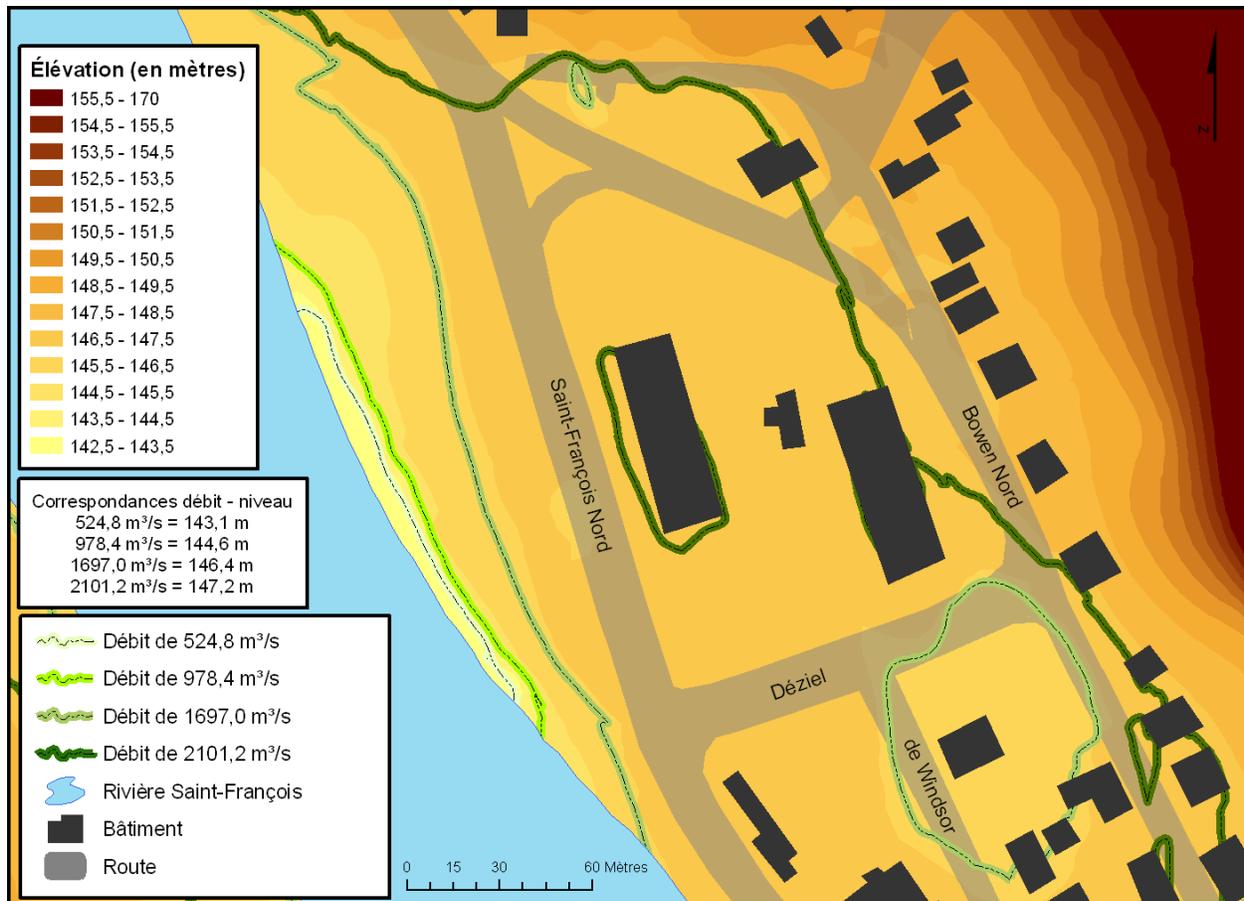


Fig. 7 — Les limites d'inondation pour quatre débits différents (Site SHE-2)

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

De plus, en observant les figures 8 et 9, on peut comparer l'étendue sur le terrain des nappes d'eau pour divers débits et niveaux d'eau. La figure 8 indique les limites d'inondation selon des intervalles de niveau d'un mètre, tandis que la figure 9 renseigne sur les limites d'inondation pour des intervalles relatifs aux débits. La figure 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 9 indique les limites d'inondation pour des variations de 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.

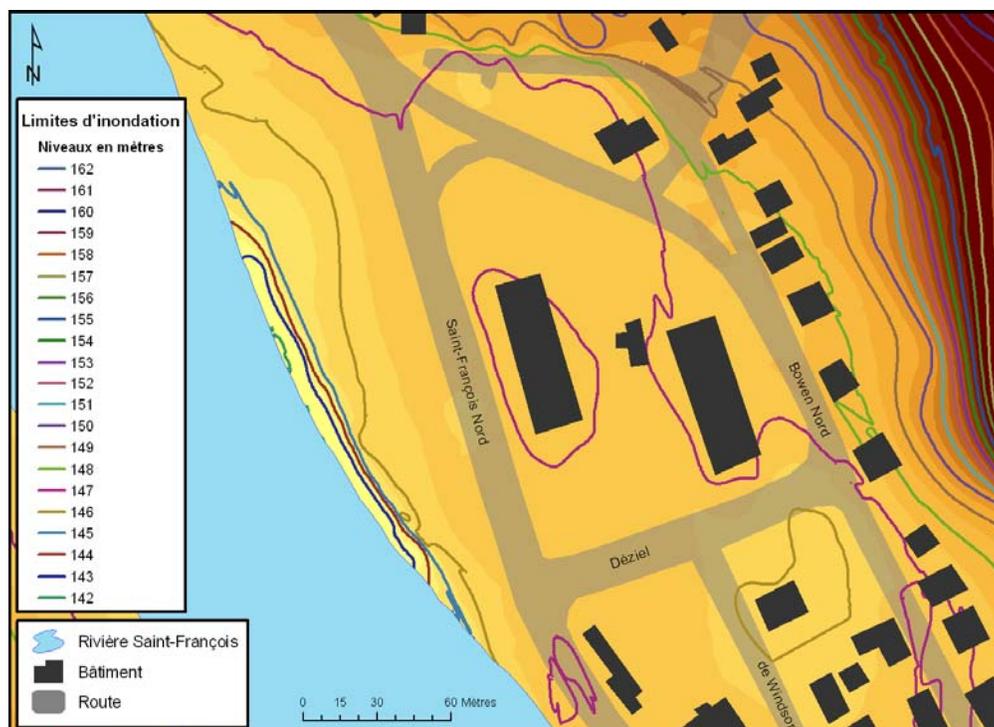


Fig. 8 — Les limites d'inondation en fonction de la variation des niveaux d'eau (Site SHE-2)
(Source : BDTQ, I : 20 000, Ministère des Ressources naturelles du Québec, 2000; Orthophotos I : 40 000, Ministère des Ressources naturelles du Québec 2000; Débits et niveaux, Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), <http://www.cehq.gouv.qv.ca>)



Fig. 9 — Les limites d'inondation en fonction de la variation des niveaux des débits (Site SHE-2)

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

3.2 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 n'est pas représenté 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.

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 et 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 de l'ordre d'une vingtaine de centimètres (*RMSE*). Cette précision des surfaces topographiques a permis de représenter adéquatement de faibles variations de la topographie et ainsi que les effets des faibles variations des débits et des 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), comparativement 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 dans la représentation de 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 fortement recommandée puisque celui-ci 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 et al., 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 : il pourrait servir de guide dans l'aménagement des rives et des plaines inondables, ainsi que pour la protection de ces milieux.

BIBLIOGRAPHIE

- 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.
- CENTRE D'EXPERTISE HYDRIQUE DU QUÉBEC (CEHQ). Ministère du développement durable, de l'environnement et des parcs, [En ligne], [<http://www.cehq.gouv.qc.ca>], (Dernière consultation le 3 octobre 2007).
- 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 », 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, [En ligne], [<http://www.msp.gouv.qc.ca/secivile/dotsc/cnv/tableaux/estrie.pdf>] (Dernière consultation le 20 février 2008).
- MINISTÈRE DE LA SÉCURITÉ PUBLIQUE (MSP), MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT et 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.
- VERTON, 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.

EUE • Élaboration d'un modèle de simulation des niveaux d'inondation • a-49

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.