

Cartographie du risque unitaire d'endommagement (CRUE) par inondations pour les résidences unifamiliales du Québec Method for anticipating flood warnings for the Thoré river (Southern France)

P. Blin, M. Leclerc, Y. Secretan et B. Morse

Volume 18, numéro 4, 2005

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/705566ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/705566ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (imprimé)

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Blin, P., Leclerc, M., Secretan, Y. & Morse, B. (2005). Cartographie du risque unitaire d'endommagement (CRUE) par inondations pour les résidences unifamiliales du Québec. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 18(4), 427–451. <https://doi.org/10.7202/705566ar>

Résumé de l'article

Actuellement, en considérant simultanément les éléments constitutifs du risque, soit l'aléa et la vulnérabilité, aucune des méthodes existantes dites de cartographie des risques d'inondation ne permet d'établir de façon précise et quantifiable en tous points du territoire les risques d'inondation. La méthode de cartographie présentée permet de combler ce besoin en répondant aux critères suivants : facilité d'utilisation, de consultation et d'application, résultats distribués spatialement, simplicité de mise à jour, applicabilité à divers types de résidences.

La méthode présentée utilise une formulation unitaire du risque basée sur les taux d'endommagement distribués et reliés à diverses périodes de retour de crues à l'eau libre. Ceux-ci sont d'abord calculés à partir des hauteurs de submersion qu'on déduit de la topographie, des niveaux d'eau pour des périodes de retour représentatives et du mode d'implantation des résidences (présence de sous-sol, hauteur moyenne du rez-de-chaussée). Ensuite, le risque unitaire est obtenu par intégration du produit du taux d'endommagement croissant par son incrément de probabilité au dépassement. Le résultat est une carte représentant le risque en % de dommage direct moyen annuel. Une étude pilote sur un tronçon de la rivière Montmorency (Québec, Canada) a montré que les cartes sont expressives, flexibles et peuvent recevoir tous les traitements additionnels permis par un SIG tel que le logiciel MODELEUR/HYDROSIM développé à l'INRS-ETE, l'outil utilisé pour cette recherche. Enfin, l'interprétation sur la Montmorency des cartes d'inondation en vigueur actuellement au Canada (les limites de crue de 20/100 ans) soulève des interrogations sur le niveau de risque actuellement accepté dans la réglementation, surtout quand on le compare aux taux de taxation municipale.

Cartographie du risque unitaire d'endommagement (CRUE) par inondations pour les résidences unifamiliales du Québec

Unit mapping of flood risks for direct damages to single family residences in Quebec (Canada)

P. BLIN¹, M. LECLERC*¹, Y. SECRETAN¹, B. MORSE²

Reçu le 25 juin 2004, accepté le 2 décembre 2004**.

SUMMARY

Public managers of flood risks need simple and precise tools to deal with this problem and to minimize its consequences, especially for land planning and management. Several methods exist that produce flood risk maps and help to restrict building residences in flood plains. For example, the current method in Canada is based on the delineation in flood plains of two regions corresponding to floods of 20- and 100-year return periods (CONVENTION CANADA/QUÉBEC, 1994), mostly applied to ice-free flooding conditions. The method applied by the Federal Emergency Management Agency FEMA (2004) is also based on the statistical structure of the floods in different contexts, with a goal mostly oriented towards the determination of insurance rates. In France, the INONDABILITÉ method (GILARD and GENDREAU, 1998) seeks to match the present probability of flooding to a reduced one that the stakeholders would be willing to accept.

However, considering that the commonly accepted definition of risk includes both the probability of flooding and its consequences (costs of damages), very few, if any of the present methods can strictly be considered as risk-mapping methods. The method presented hereafter addresses this gap by representing the mean annual rate of direct damage (unit value) for different residential building modes, taking into account the flood probability structure and the spatial distribution of the submersion height, which takes into account the topography of the flood plain and the water stage distribution, the residential settlement mode (basement or not) and the first floor elevation of the building. The method seeks to meet important criteria related to efficient land planning and management, including: ease of utilisation, consultation and application for managers; spatially distributed results usable in current geographical information systems (GIS maps); availability anywhere in the

1. Institut National de la Recherche Scientifique – Centre Eau, Terre et Environnement, Professeur INRS-ETE, 490 de la Couronne - Québec (Québec), G1K 9A9.

2. Département de Génie civil, Université Laval, Québec.

* Correspondance: michel_leclerc@ete.inrs.ca

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 août 2006.

area under study; ease of updating; and adaptability for a wide range of residence types.

The proposed method is based on a unit treatment of the risk variable that corresponds to a rate of damage, instead of an absolute value expressed in monetary units. Direct damages to the building are considered, excluding damages to furniture and other personal belongs. Damage rates are first computed as a function of the main explanatory variable represented by the field of submersion depths. This variable, which is obtained from the 2D subtraction of the terrain topography from the water stage for each reference flood event, is defined by its probability of occurrence. The mean annual rate of damage (unit risk) is obtained by integrating the field of damage rate with respect to the annual probability structure of the available flood events. The result is a series of maps corresponding to representative modes of residential settlement.

The damage rate was computed with a set of empirical functional relationships developed for the Saguenay region (Québec, Canada) after the flood of 1996. These curves were presented in LECLERC *et al.* (2003); four different curves form the set that represents residences with or without a basement, with a value below or above \$CAD 50,000, which is roughly correlated with the type of occupation (i.e., secondary or main residence). While it cannot be assumed that these curves are generic with respect to the general situation in Canada, or more specifically, in the province of Québec, the method itself can still be applied by making use of alternate sets of submersion rates of damage curves developed for other specific scenarios. Moreover, as four different functional relationships were used to represent the different residential settlement modes, four different maps have to be drawn to represent the vulnerability of the residential sector depending of the type of settlement. Consequently, as the maps are designed to represent a homogeneous mode of settlement, they represent potential future development in a given region better than the current situation. They can also be used to evaluate public policies regarding urban development and building restrictions in the flood plains.

A pilot study was conducted on a reach of the Montmorency River (Québec, Canada; BLIN, 2002). It was possible to verify the compliance of the method to the proposed utilisation criteria. The method proved to be simple to use, adaptive and compatible with GIS modeling environments, such as MODELEUR (SECRETAN *et al.*, 1999), a 2D finite elements modeling system designed for a fluvial environment. Water stages were computed with a 2D hydrodynamic simulator (HYDROSIM; HENICHE *et al.*, 1999a) to deal with the river reach complexity (a breaded reach with back waters). Due to the availability of 2D results, a 2D graphic representation of the information layers can therefore be configured, taking into account the specific needs of the interveners. In contexts where one dimensional water stage profiles are computed (e.g., HEC-RAS by USACE, 1990; DAMBRK by FREAD, 1984), an extended 2D representation of these data needs to be developed in the lateral flood plains in order to achieve a 2D distributed submersion field.

Among the interesting results, it was possible to compare the risk level for given modes of settlements (defined by the presence/absence of a basement and the elevation of the first floor with respect to the land topography) with current practices, based only on the delineation of the limits of the flood zones corresponding to 20/100 year return periods. We conclude that, at least in the particular case under study, the distributed annual rate of damage seems relatively large with respect to other financial indicators for residences such as urban taxation rates.

Keywords: *flood risk, rate of damages, 2D hydrodynamic modeling, geographical information system, risk management, flood risk mapping, submersion depth.*

RÉSUMÉ

Actuellement, en considérant simultanément les éléments constitutifs du risque, soit l'aléa et la vulnérabilité, aucune des méthodes existantes dites de cartographie des risques d'inondation ne permet d'établir de façon précise et quantifiable en tous points du territoire les risques d'inondation. La méthode de cartographie présentée permet de combler ce besoin en répondant aux critères suivants : facilité d'utilisation, de consultation et d'application, résultats distribués spatialement, simplicité de mise à jour, applicabilité à divers types de résidences.

La méthode présentée utilise une formulation unitaire du risque basée sur les taux d'endommagement distribués et reliés à diverses périodes de retour de crues à l'eau libre. Ceux-ci sont d'abord calculés à partir des hauteurs de submersion qu'on déduit de la topographie, des niveaux d'eau pour des périodes de retour représentatives, et du mode d'implantation des résidences (présence de sous-sol, hauteur moyenne du rez-de-chaussée). Ensuite, le risque unitaire est obtenu par intégration du produit du taux d'endommagement croissant par son incrément de probabilité au dépassement. Le résultat est une carte représentant le risque en % de dommage direct moyen annuel. Une étude pilote sur un tronçon de la rivière Montmorency (Québec, Canada) a montré que les cartes sont expressives, flexibles et peuvent recevoir tous les traitements additionnels permis par un SIG tel que le logiciel **MODELEUR/HYDROSIM** développé à l'INRS-ETE, l'outil utilisé pour cette recherche. Enfin, l'interprétation sur la Montmorency des cartes d'inondation en vigueur actuellement au Canada (les limites de crue de 20/100 ans) soulève des interrogations sur le niveau de risque actuellement accepté dans la réglementation, surtout quand on le compare aux taux de taxation municipale.

Mots-clés : *risque d'inondation, taux d'endommagement, modélisation hydrodynamique 2D, système d'information géographique, gestion du risque, carte d'inondation, hauteur de submersion.*

1 – INTRODUCTION

Parmi les nombreuses caractéristiques des inondations, leur grande variabilité spatiale, leur magnitude et la difficulté d'en prévoir les conséquences moyennes à long terme compliquent la tâche des aménagistes. Les autorités concernées désirent toutefois avoir une idée la plus précise possible, et le plus possible sous une forme cartographique, des conséquences des inondations futures sur les bâtiments et infrastructures actuelles et potentielles situées dans la plaine inondable, et cela tout en limitant le coût et la durée des études pour y parvenir. Or, les méthodes actuelles de cartographie des zones inondables sont conçues pour représenter, soit la probabilité de certains événements jugés problématiques pour des fins de prévention (ex : les cartes « 20-100 ans » de la Convention Canada-Québec), soit encore pour fixer des objectifs de protection contre des aléas de probabilité donnée (la méthode **INONDABILITÉ**, GILARD et GENDREAU, 1998), ou d'indemnisation des assurés (Cartes d'assurabilité du FEMA, 2004). À notre connaissance, aucune méthode ne permet de cartographier le risque moyen annuel de dommages directs aux

parcs résidentiels en tenant compte à la fois de la probabilité des aléas et de la vulnérabilité du terrain (son exposition aux aléas) en zone inondable. Le développement d'une nouvelle méthode de cartographie unitaire des dommages directs d'inondations semblait une voie intéressante pour répondre aux différentes préoccupations à l'égard de la prévention de ces risques.

Pour cartographier les conséquences potentielles des inondations, il ne suffit pas de partir des dommages connus pour quelques événements historiques de probabilité donnée et de les extrapoler pour l'ensemble des périodes de retour en se basant sur les niveaux d'eau atteints lors de ces événements. En effet, différents facteurs d'hétérogénéité des données de base comme le développement ou les améliorations du parc immobilier, l'évolution géomorphologique du cours d'eau et parfois, la non-stationnarité des paramètres statistiques des crues compliquent singulièrement l'évaluation du dommage moyen annuel infligé aux bâtiments.

Un retour à la notion de *risque* combinant une évaluation de la *vulnérabilité* (prise ici au sens restreint de potentiel de dommages directs résidentiels) sur un terrain donné et de l'*aléa* (la crue elle-même, sa probabilité et ses paramètres hydrauliques) semble la façon la plus appropriée pour bâtir une méthode capable d'évaluer les conséquences moyennes annuelles des inondations. Mais si l'expression du risque moyen annuel doit se faire en termes financiers absolus pour un secteur donné (en dollars par exemple), la valeur individuelle et les caractéristiques d'implantation actuelles des propriétés à risque doivent être prises en compte. Cela nous ramène au problème de l'hétérogénéité de ces variables dans le temps et l'espace. La méthode devient ainsi spécifique à chaque tronçon de plaine inondable à un moment donné de son développement. De plus, une telle approche éloigne des objectifs de cartographie. En d'autres termes, les dommages directs, et donc le risque se rapportant à ceux-ci, dépendent alors de la valeur de chaque maison, de son implantation en terme d'altitude et de sa localisation sur le terrain de même que de tous les autres facteurs externes pouvant influencer la valeur de celle-ci.

Puisque l'expression du risque en valeur absolue (i.e. en unités monétaires) posait difficulté, le problème a été abordé en valeur relative unitaire plutôt qu'absolue, c'est-à-dire, en considérant le risque sous la forme d'un taux d'endommagement (ou pourcentage de destruction), ce qui permet de s'affranchir des valeurs individuelles des résidences. Une telle variable (%) peut être cartographiée en posant certaines hypothèses, notamment à l'égard de l'homogénéité du mode d'implantation dans le terrain (présence ou non de sous-sol, altitude du premier plancher, etc.) et de l'existence de relations fonctionnelles empiriques permettant d'estimer ce pourcentage en fonction de paramètres hydrauliques simples comme la profondeur de submersion découlant des crues.

Concernant le problème de la cartographie, l'instrument doit à notre avis répondre aux critères suivants, la plupart reliés à la tâche de l'aménagiste :

1. Facilité d'utilisation, de consultation et d'application des cartes ;
2. Résultats distribués spatialement, i.e., en tous points du territoire étudié ;
3. Simplicité de mise à jour si nécessaire ;
4. Applicabilité à un éventail représentatif des types d'implantation de résidences.

Dans le cadre de cette recherche exploratoire, l'aspect vulnérabilité est limité aux possibilités de dommages directs aux résidences uni-familiales, i.e. les dommages de type immobilier. Cette limitation s'explique simplement par le fait que les autres types de dommages, comme par exemple, les dommages indirects ou d'incertitude, les dommages aux bâtiments industriels, aux commerces ou aux infrastructures publiques, ou encore, les dommages psychologiques, sont très complexes, voire impossibles à évaluer de façon unitaire car ils sont, soit trop spécifiques (ex, commerces, industries), ou tout simplement non quantifiables car appartenant à une classe orthogonale de conséquences (ex, pertes de vie, dommages à l'environnement). Enfin, la portée de cette recherche se limite aux dommages reliés aux crues à l'eau libre. C'est donc dans une optique limitée d'analyse, et éventuellement dans un contexte de planification de l'aménagement du territoire à des fins résidentielles que se situe la présente recherche.

Suite à une brève revue bibliographique portant sur les autres méthodes de cartographie utilisées, la méthode proposée sera présentée et illustrée à l'aide d'une application pilote sur un tronçon de la rivière Montmorency (Québec, Canada). Enfin, le potentiel d'analyse et l'éclairage nouveau apportés par cet outil de cartographie unitaire seront exposés et discutés à partir de résultats concernant la cartographie des risques couramment appliquée au Canada à des fins préventives.

2 – REVUE DE LA BIBLIOGRAPHIE

2.1 Définition du risque retenue

Si les termes choisis et son expression mathématique peuvent varier d'un auteur à l'autre, la définition généralement acceptée du *risque* comporte deux principales composantes : l'*aléa* qui représente l'événement problématique, dans ses aspects physiques, hydrologiques et statistiques, et la *vulnérabilité* de la plaine inondable qui représente les dommages de différents types résultant des aléas, en l'occurrence les inondations (BRETON et MARCHE, 1999), et qui dépend du degré d'exposition à la submersion. Si la définition physique du risque fait à peu près consensus, celle de la vulnérabilité présente beaucoup plus de nuances quant à ce qui doit ou peut y être inclus (GRIGG et HELWEG, 1975 ; PLURAM Inc., 1983 ; EL-JABI *et al.*, 1981). Conséquemment, il y a différentes façons de traiter de la relation entre les deux aspects du risque. La définition adoptée pour la présente recherche, de même que pour l'application sur la rivière Montmorency est traduite mathématiquement par l'expression suivante, laquelle peut prendre une forme continue ou discrète (Canadian Standards Association, 1991) :

$$R = \int D(P) \cdot dP \equiv \sum D(P_i) \Delta P_i \quad (1)$$

Où,

R : risque moyen annuel de dommages, exprimé en unités monétaires absolues ;

D ou $D(P)$: valeur des dommages (économiques ou autres) ou des interventions reliées ;

P ou P_i : probabilité au dépassement (annuelle) des aléas ;

i : indice de l'intervalle de probabilité attribué à une classe d'aléa ;

dP ou ΔP_i : incrément de la probabilité annuelle au dépassement.

On peut illustrer cette équation par la figure 1. Graphiquement, le risque correspond à l'aire sous la courbe.

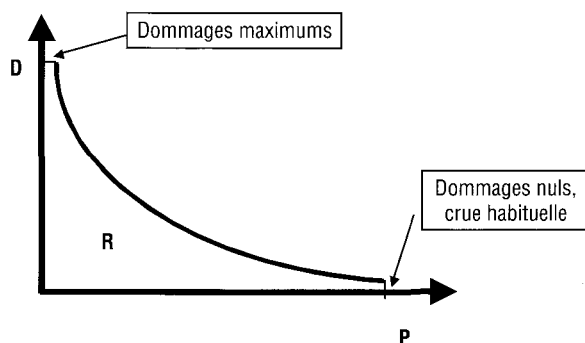


Figure 1 Interprétation graphique du risque (D : dommages ; P : probabilité au dépassement).

Graphical interpretation of the risk (D : Damage; P : probability of exceedance).

2.2 Méthodes de cartographie existantes

Ce qui distingue les méthodes existantes de cartographie des risques tient à la variable représentée et à l'usage réservé à l'instrument, lequel est la plupart du temps dédié à l'application de processus législatifs ou réglementaires. Considérons quelques exemples de méthodes.

2.2.1 La cartographie des risques dans le cadre de la Convention Canada-Québec et du PDCC

La méthode utilisée actuellement au Québec a servi jusqu'en 2001 dans le cadre d'un programme conjoint fédéral-provincial appelé Convention Canada-Québec relativement à la Cartographie et à la Protection des Plaines d'inondation et au Développement durable des Ressources en eau, et elle a été reprise depuis peu par le Programme de Détermination des Cotes de Crue (PDCC, 2001) du ministère de l'Environnement du Québec. Les cartes ainsi produites par le PDCC n'ont que valeur indicative et seules les cotes calculées de période de retour 20 ans et 100 ans ont une portée officielle. Cette technique

de représentation du risque ne tient pas compte du volet conséquences et seules les zones inondables délimitées par les crues à l'eau libre de périodes de retour de 20 ans (zone dite de « grand courant ») et de 100 ans (faible courant) (PDCC, 2001) sont indiquées sur la carte en plus des éléments planimétriques de base. Le contexte de normalisation dans lequel sont utilisées ces cartes permet de réglementer la construction dans ces zones. Ainsi, dans les zones de grand courant, toutes constructions, ouvrages ou travaux sont interdits avec cependant des possibilités d'exclusion ou de dérogation pour des fins d'utilité publique. Dans les zones de faible courant, toutes constructions, ouvrages ou travaux « non immunisés » sont interdits avec encore là des possibilités d'exclusion ou de dérogation. D'autres dispositions sont aussi attachées aux cartes produites.

La base de cette méthode est exclusivement hydrologique/hydraulique ; elle ne considère que l'aléa et son rapport avec le terrain. Elle ne considère aucunement les caractéristiques locales des résidences présentes ou potentielles et traite implicitement les conséquences qui forment pourtant l'une des deux variables de base de la définition du risque. Il s'agit donc à proprement parler d'une méthode de cartographie des aléas et non du risque quoi qu'elle s'en approche d'assez près.

2.2.2 Autres méthodes québécoises

D'autres méthodes d'évaluation du risque ont été développées dans divers centres de recherches au Québec. Citons ici la méthode DOMINO (BRETON et MARCHE, 1999) et celle de Centre de Développement Technologique de l'école Polytechnique de Montréal (EL-JABI *et al.*, 1981). Même si des éléments de ces contributions permettraient de mettre en œuvre une méthode de cartographie du risque au sens où nous l'entendons ici, aucune tentative dans ce sens n'a encore été entreprise.

2.2.3 La méthode de cartographie des zones d'assurabilité des États-Unis

La méthode américaine ressemble un peu à la méthode utilisée actuellement au Québec en ce sens que la carte de risque d'inondation ne représente souvent que des limites de niveau d'eau en relation avec des aléas de magnitude et de probabilité donnée. La différence tient surtout à la législation et au mode d'intervention applicable dans ces zones. En effet, la question des inondations aux États-Unis est majoritairement administrée par la « Federal Emergency Management Agency » (FEMA, 2004) dans le cadre du « National Flood Insurance Program » (NFIP). Ce programme se base sur une entente entre les communautés locales (états, comtés, villes ou toutes autres formes de gouvernement local) et le gouvernement fédéral. Elle établit que les communautés doivent prendre des mesures restrictives (ou remédiatrices) d'aménagement des zones inondables nommées « Special Flood Hazard Area » (SFHA). En échange de quoi, le gouvernement fédéral rend disponible une assurance d'inondation protégeant financièrement ces communautés contre les pertes dues aux inondations. Sans cette disposition, la plupart des communautés et citoyens concernés n'auraient pas les moyens financiers d'obtenir une autre forme d'assurance à moins d'une déclaration présidentielle de désastre. Ce programme a ainsi pour but de réduire à terme les pertes dues aux inondations et de même que d'éliminer ou du moins limiter les développements dans les

secteurs à risques. Notons que ce programme s'applique à tous les bâtiments compris dans les SHFA et cela, peu importe les améliorations apportées à celles-ci (rehaussement, imperméabilisation, immunisation, etc.). (FEMA, 2004).

La cartographie du risque d'inondation est réalisée par le U.S. Army Corps of Engineers (USACE) et se limite aux SFHA. Une SFHA est en fait la partie de la plaine inondable d'une communauté qui a 1 % de probabilité ou plus de se faire inonder en une année (récurrence de 100 ans). Il existe deux types de cartes, spécifiques à chaque communauté, pour représenter les SFHA : la « Flood Hazard Boundary Map » (FHBM) et la « Flood Insurance Rate Map » (FIRM). La première, basée sur des données approximatives, ne fait que donner la limite des SFHA en leur donnant une teinte de gris foncé et sert surtout dans les cas plus urgents. La seconde donne les cotes de base d'inondation et les différentes zones d'assurances du risque en plus, évidemment, des limites de la plaine d'inondation comme sur la FHBM. Il est important de mentionner que les SFHA ne sont pas les seules zones à être représentées sur la carte FHBM, les zones correspondant à une période de récurrence de 500 ans y sont aussi présentes. De plus, dans le cadre du NFIP, les SFHA sont aussi catégorisées en zones selon divers critères dont le degré de précision des analyses hydrologiques, l'état des aménagements de protection ou selon que l'on y représente l'élévation de base de l'inondation ou la profondeur moyenne d'inondation (FEMA, 2004).

Une certaine complexité peut ressortir de cette méthode car elle ne se limite pas à montrer des critères hydrologiques ou économiques mais y présente aussi des critères d'ordre administratif (état des travaux d'aménagement, état des études hydrologiques). De plus, cette méthode n'est définitivement pas précise puisqu'elle ne s'appuie en fait que sur un critère (récurrence 100 ans) pour déterminer les zones assurables, donc sous-entendues à risque. Malgré une forme d'avertissement, amenée par une représentation de la zone correspondant à une période de récurrence de 500 ans, cette méthode peut causer un faux sentiment de sécurité, une erreur de perception. En effet, elle induit à penser que si l'on n'est pas dans les SFHA, on n'est pas à risque, ce qui est faux. Par contre, cette méthode semble être efficace puisqu'elle impose pratiquement l'application de mesures de protection contre les inondations dans les zones de récurrence de 100 ans.

2.2.4 La méthode INONDABILITÉ (France)

La méthode INONDABILITÉ du CEMAGREF (GILARD et GENDREAU, 1998) utilise une définition et propose une application d'un concept particulier de risque qui reprend en mode cartographique les deux éléments de la notion de risque : l'*aléa* et la *vulnérabilité*. Les deux variables sont quantifiées en unités de période de retour, ce qui permet une comparaison homogène de deux grandeurs *a priori* très différentes. De plus, la quantification du risque est estimée à l'aide d'une différence ($Risque = \Delta (aléa, vulnérabilité)$) contrairement aux approches courantes du risque qui privilégient un produit ($Risque = Coût \times probabilité$), permettant ainsi la définition d'un risque acceptable (Δ négatif). La cartographie des deux variables s'effectue en deux couches séparées et c'est l'écart entre les deux pour une zone donnée qui sert à évaluer, le cas échéant, les besoins d'intervention.

La procédure d'estimation de la *vulnérabilité* fait intervenir la notion d'acceptabilité des dommages par les intervenants du milieu et pour ce faire,

nécessite le recours à diverses formes de négociation et de sensibilisation. En effet, en prenant pour acquis que le risque nul n'existe pas et en éduquant les intervenants en ce sens, ceux-ci doivent décider du seuil de dégâts, exprimé sous forme de probabilité de submersion, qu'ils seraient prêts à accepter. Ce terme de probabilité sera ajouté à la forme classique d'estimation des dommages. GILARD et GENDREAU (1998) résument bien leur vision en disant : « [...] il est nécessaire de définir un risque acceptable, socio-économiquement parlant, indépendamment de la contrainte hydraulique subie, et traduisant la reconnaissance sociale de l'impossibilité de maîtriser tous les risques. ». Ce seuil d'acceptabilité statistique devient par la suite un objectif de protection (Variable TOP). Par exemple, on voudra prémunir les résidences contre les crues de récurrence 100 ans tandis que les récoltes ne seront protégées que contre celles dépassées aux cinq ans seulement.

L'estimation de l'aléa se base sur l'événement initiant le début des dommages sur une parcelle donnée. Cette estimation s'effectue avec un modèle synthétique nommé « QdF » (Débit-durée-Fréquence) associé à un modèle hydraulique classique. La valeur statistique représentée est désignée par la variable TAL.

On se trouve donc à avoir pour chaque parcelle, une période de retour équivalente à l'aléa (TAL) qui correspond au début d'inondation et une autre équivalente à l'objectif de protection (TOP). Il est donc très aisé de procéder à la cartographie de ces deux variables et de les comparer.

L'avantage principal de cette méthode est l'indépendance qui est maintenue entre l'aléa et la vulnérabilité. Ceci permet de définir un seuil d'acceptabilité du risque spécifique à chaque situation et cela de façon purement socio-économique. Par contre, cette méthode a aussi le défaut de son avantage puisque c'est justement dans cette détermination de la vulnérabilité acceptable que résident les plus grandes difficultés. En effet, le facteur socio-économique est peu précis et très variable, ce qui peut conduire à des résultats disparates d'une région à l'autre et par conséquent plus difficiles à interpréter. Cet aspect est discuté dans GILARD et GENDREAU (1998) et fait toujours l'objet d'analyses.

2.2.5 Le besoin d'une cartographie intégrée du risque

À notre connaissance, les méthodes inventoriées ne permettent pas une cartographie intégrée du risque au sens classique (*dommages x probabilité*) du terme. La méthode américaine impose des normes « d'assurabilité » pour les zones riveraines mais ne permet pas de procéder à une réelle évaluation spatiale du coût du risque d'inondation actuel ou potentiel. Parmi les méthodes européennes, la méthode INONDABILITÉ permet une certaine catégorisation du risque mais ne permet pas d'en évaluer le coût directement, mais elle permet de mieux mesurer l'écart entre la situation actuelle et une autre socio-économiquement négociée et acceptable. Quant à la méthode utilisée actuellement au Québec (PDCC, 2001), si elle est de nature préventive, elle n'en demeure pas moins une approche strictement statistique axée sur l'aléa et sans égard à la notion de vulnérabilité.

3 – PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE UNITAIRE

Après avoir présenté les bases mathématiques de la méthode proposée, nous allons introduire les hypothèses préalables ainsi qu'une schématisation des étapes à franchir pour sa mise en œuvre.

3.1 Les bases mathématiques

Pour une résidence individuelle de type donné, le risque moyen annuel de dommages directs est représenté par l'équation 1. En simplifiant la notation de la façon suivante :

$$D_i = D(P_i)$$

On a sous forme incrémentale :

$$R = \sum D_i \Delta P_i \quad (2)$$

Posons l'existence d'une relation empirique simplifiée $f(\mathbf{A}_i)$ permettant de lier les dommages physiques directs D_i à la valeur du potentiel maximum de dommages de la propriété V et à un vecteur $\mathbf{A}_i(x, y)$ de variables physiques distribuées dans le plan (x, y) décrivant l'aléa de classe statistique i :

$$D_i = V * f(\mathbf{A}_i(x, y)) \quad (3)$$

Réduisons ce dommage événementiel en valeur unitaire d_i ainsi :

$$d_i(x, y) \equiv \frac{D_i}{V} = f(\mathbf{A}_i(x, y)) \quad (4)$$

L'équation 2 peut aussi s'exprimer en valeur unitaire :

$$r \equiv R(x, y) = \sum d_i(x, y) \Delta P_i \equiv f(\mathbf{A}_i(x, y)) * \Delta P_i \quad (5)$$

C'est précisément cette variable $r(x, y)$ que l'on désire cartographier. Elle exprime le taux d'endommagement sous forme adimensionnelle (unitaire) et intègre les variables physiques qui traduisent le comportement local distribué de l'aléa de classe i ainsi que l'incrément de probabilité attribué à cette classe d'aléa.

3.2 Les conditions préalables

Afin d'élaborer une carte unitaire des risques, on doit disposer des éléments suivants :

1. Un *système d'information géographique* (SIG) pour la modélisation spatiale des variables du terrain et des écoulements ainsi que de la cartographie ;
2. Un *modèle numérique d'élévation* (MNE) du tronçon à une échelle permettant d'obtenir une précision suffisante dans la verticale (habituellement, à l'échelle 1:2000 ou mieux) ;
3. Un *modèle hydraulique* empirique (surface de niveau d'eau) ou déterministe uni- ou bi-dimensionnel (1D ou 2D) des écoulements dans le tronçon à

l'étude ; le type d'outil et le degré de discrétisation dépendent de la complexité morphologique et de la précision recherchée ;

4. Une *relation fonctionnelle empirique du taux d'endommagement* lié à la submersion (et d'autres variables de l'écoulement, le cas échéant) pour chaque type de résidence visé ;

5. Les *paramètres statistiques* des crues à une échelle de temps appropriée à la dynamique des écoulements (débits horaires ou journaliers).

Une courte discussion de ces différents aspects est fournie ci-après.

3.2.1 L'information géographique, la modélisation du terrain et de l'hydrodynamique et la cartographie

Différents outils d'information géographique et de cartographie s'offrent à l'analyste pour réaliser les différentes étapes de la procédure de modélisation terrain. Pour les fins de la présente recherche, nous avons utilisé le logiciel MODELEUR (SECRETAN *et al.*, 1999 ; 2001) qui sous-tend tout le traitement spatial des données, la visualisation et le traçage. Il s'agit d'un outil de type SIG qui est équipé de fonctionnalités appropriées à la modélisation de l'altitude et d'autres paramètres du terrain. Il comporte une calculatrice distribuée (pouvant traiter des champs continus d'information) avec des fonctions de post-traitement adaptées au calcul du risque unitaire (équation 5). De plus, il est directement interfacé à un simulateur hydrodynamique bi-dimensionnel aux éléments finis à bancs couvrant-découvrant appelé HYDROSIM (HENICHE *et al.*, 1999a,b) permettant de calculer les variables physiques en relation avec les crues de différentes probabilités. MODELEUR permet aussi d'extrapoler latéralement dans la plaine de débordement les lignes d'eau obtenues, le cas échéant avec un modèle hydraulique 1D, ou plus simplement des courbes de tarage.

3.2.2 La modélisation des écoulements

La plupart du temps, dans des géométries simples, une modélisation hydraulique 1D des écoulements à l'aide de programmes de courbe de remous suffit pour établir le lien entre une crue de récurrence donnée et le niveau d'eau. Pour ce faire, on utilise généralement un programme tel HEC-RAS du US Army Corps of Engineers (USACE, 1990). Dans les cas plus complexes ou dominés par des écoulements transitoires (ex : la marée), il est préférable d'utiliser des programmes résolvant les équations de type Saint-Venant à une dimension comme le code ONE-D d'Environnement Canada (ENVIRONNEMENT CANADA, 1998) ou encore DAMBRK (FREAD, 1984), ce dernier permettant aussi de résoudre les écoulements en cas de bris de barrage. Dans certains cas encore plus complexes liés à une topographie très variable (tronçon anastomosé), ou encore pour prédire les écoulements en présence de nouveaux ouvrages de contrôle des niveaux d'eau, un simulateur 2D, de préférence couvrant-découvrant peut s'avérer nécessaire. Par exemple, le programme HYDROSIM (HENICHE *et al.*, 1999a,b) évoqué plus haut est un instrument approprié pour ce faire.

Quelle que soit l'approche utilisée, les lignes d'eau (1D) ou les surfaces de niveau (2D) obtenues doivent être mises en relation au modèle d'élévation du terrain afin d'en extraire les champs de submersion, variable expliquant la majeure partie des dommages. Dans le cas d'une étude hydraulique 1D (lignes d'eau), une procédure d'extrapolation transversale doit être appliquée pour obtenir un champ de submersion hors du lit mineur. Si la prise en compte des

vitesses de courant s'avérerait nécessaire, l'emploi d'un modèle 2D serait requis puisque les modèles 1D ne donnent qu'une valeur moyenne des vitesses dans la section d'écoulement.

3.2.3 Relations fonctionnelles prédictives des dommages

Le développement de modèles théoriques non biaisés pour l'estimation des dommages d'inondation a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche dans la dernière décennie (BOOY et LYE, 1989 ; BEARD, 1997 ; GOLDMAN, 1997 ; STE-DINGER, 1997) et de nouvelles courbes sont proposées régulièrement dans la bibliographie (voir BONNIFAIT, 2004). Un tel modèle repose généralement sur la construction d'une fonction de dommages qui fait intervenir un certain nombre des paramètres de l'aléa et de la vulnérabilité (OUELLETTE *et al.*, 1985 ; EL-JABI et ROUSSELLE, 1987 ; OUARDA *et al.*, 1995). La fonction de dommages s'écrit généralement sous la forme :

$$D_i = f(\mathbf{K}, \mathbf{A}_i) \quad (6)$$

où $\mathbf{K}$ est un vecteur décrivant un bâtiment individuel ou l'ensemble du capital physique (valeur résidentielle en l'occurrence), et $\mathbf{A}_i$ est un vecteur dont les éléments décrivent les caractéristiques de l'aléa i . Cette fonction peut être étalonnée pour une région et pour un secteur économique donnés, et être ensuite utilisée pour l'évaluation du risque et la gestion des activités (construction de levées, programme d'assurance, implantation d'immeuble, etc.) dans ladite région (EL-JABI et ROUSSELLE, 1987).

La hauteur de submersion des bâtiments H_i est notoirement reconnue comme la variable qui explique une bonne partie des dégâts pour un aléa i (GRIGG et HELWEG, 1975). De plus, elle est souvent corrélée avec plusieurs des autres facteurs qui contribuent aux dommages (ex : les vitesses, les débris, l'érosion). La plupart des approches actuelles ne considèrent que ce facteur car il est le plus simple à caractériser sur le terrain (à partir du niveau d'eau représenté par les délaissés de crue) et à représenter sous la forme d'une variable numérique distribuée (LECLERC *et al.*, 1997, 2003). En plus de la valeur de la propriété (V) et de l'élévation du premier plancher, les caractéristiques $\mathbf{K}$ du bâtiment sont le nombre d'étages et le type de construction (GRIGG et HELWEG, 1975) lequel peut fortement dépendre des pratiques de construction en usage dans un pays ou une région (BONNIFAIT, 2004). Cet énoncé peut facilement restreindre la transférabilité des courbes en usage dans une région vers une autre.

Suite aux crues du Saguenay en 1996 (CSTGB, 1997), LECLERC *et al.* (1997, 2003) ont été sollicités par le ministère de l'Environnement du Québec pour mettre au point une méthode de prédiction des dommages prenant appui sur les données des indemnisations accordées aux sinistrés de la rivière Chicoutimi et sur les paramètres physiques, principalement la hauteur locale de submersion H au-dessus du premier plancher du bâtiment. La figure 2 illustre la notion de submersion utilisée dans cette étude. La hauteur de submersion y est toujours donnée par rapport à la face supérieure du premier plancher du bâtiment qu'il s'agisse du sous-sol ou du rez-de-chaussée. Les auteurs ont mis au point des relations fonctionnelles non biaisées (lois de type Gompertz) permettant de prédire en moyenne le taux d'endommagement d infligé aux bâtiments en fonction de la submersion locale H à la position de ce bâtiment. Deux axes explicatifs ont été identifiés définissant quatre courbes distinctes : d'une part, les bâtiments ayant une valeur supérieure ou inférieure à 50 000\$CAD

(paramètre établi en fonction de la valeur inscrite au rôle d'évaluation municipale de 1996) et d'autre part, les résidences avec ou sans sous-sol. Les courbes décrivant la vulnérabilité à la submersion sont représentées à la figure 3. La présente recherche prend justement appui sur ces relations pour mettre en œuvre la cartographie souhaitée.

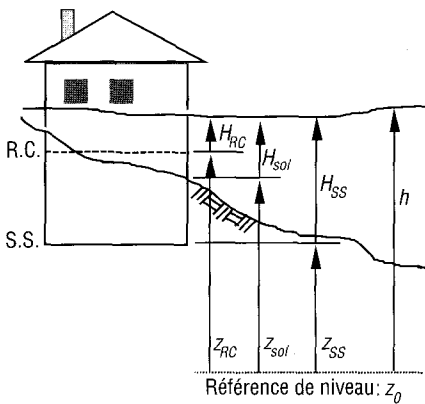


Figure 2 Variables déterminant la submersion en zone résidentielle.
Variables determining the submersion of the residential zones.

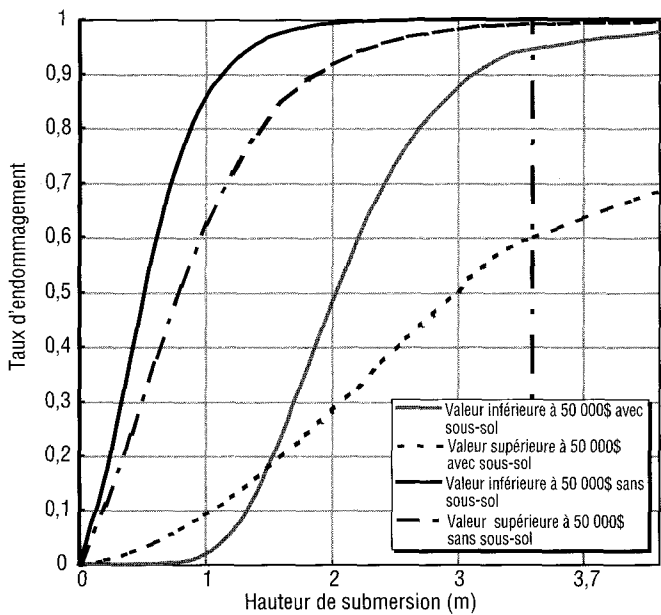


Figure 3 Relations fonctionnelles du taux d'endommagement direct aux résidences en fonction de la hauteur de submersion du premier plancher (D'après LECLERC *et al.*, 1997; 2003) – Le trait vertical pointillé indique un changement d'échelle de l'abscisse.
Functional relationships between the residential damage rate and the submersion height of the first floor. The vertical dashed line indicates a change in the x-axis scale.

3.2.4 Statistiques hydrologiques

La description des approches statistiques les plus appropriées pour définir la probabilité au dépassement annuel des crues de référence déborde du présent propos. Notons simplement que la méthode habituellement utilisée pour ce faire consiste à ajuster une loi statistique à la série des débits maximums annuels observés (méthode du Débit maximum annuel ou DMA). Trop souvent cependant, seules les données journalières sont utilisées. Pourtant, c'est au moment de la pointe horaire, voire instantanée de la crue que la submersion et les dommages sont maximums, en particulier pour les petites rivières. On peut corriger ce biais en appliquant un *facteur de pointe* moyen calculé à partir des *rapports* Maximum horaire/Moyenne journalière, ou mieux en appliquant directement la méthode du DMA à la série annuelle des maximums horaires. À l'occasion, la mise en œuvre d'une méthode de séries partielles (*Peaks-Over-Threshold*) peut s'avérer encore plus représentative (voir OUARDA et ASHKAR, 1995, notamment). Cette nuance prend d'autant plus d'importance que le bassin versant est de petite taille donc répond plus subitement à une impulsion pluviométrique d'extension limitée mais de grande intensité.

3.3 Méthode de cartographie des risques unitaires d'endommagement (CRUE) par inondation

Présentons brièvement les étapes successives de la méthode proposée, en signalant au passage les choix retenus pour l'application à la rivière Montmorency (voir la figure 4) :

1. *Délimitation du tronçon à l'étude* ; cette étape nécessite d'interpréter *a priori* le comportement hydraulique du cours d'eau et l'identification de biefs ou de sections où l'on dispose de données suffisantes pour mettre en œuvre des simulations hydrauliques (conditions aux limites, débits).

2. Suite à la collecte des données topographiques, *construction du modèle numérique de terrain* ou MNT (principalement l'élévation) à l'aide d'un outil approprié de type SIG. Elles peuvent provenir de différentes sources. Pour l'exemple d'application sur la rivière Montmorency, la photogrammétrie classique (plan géomatique de la Ville de Beauport), la caractérisation aéroportée par balayage laser, la bathymétrie par échosondeur et positionnement dGPS ainsi que les mesures directes recueillies à la station totale ont été utilisés pour représenter le terrain. L'importance de disposer d'un outil adapté à la fusion de ces ensembles hétérogènes apparaît plus évidente lorsqu'on est confronté à une si grande diversité de sources disponibles (voir SECRETAN *et al.*, 2001, pour une discussion détaillée de cet aspect) ; pour cette étude, c'est le logiciel MODELEUR qui a permis l'intégration des données.

3. *Simulations hydrauliques* afin de déterminer les niveaux d'eau pour une série de crues de référence i définies par le débit Q_i et la probabilité au dépassement P_i . Dans l'étude présente, les résultats bi-dimensionnels de niveau d'eau déjà calculés par DOYON (2001) dans une étude précédente dans le même secteur ont été utilisés. Le simulateur employé est HYDROSIM (HENICHE *et al.*, 1999a,b) mentionné précédemment. Les données de débit proviennent de la station hydrométrique des Marches Naturelles (#051001) opérée par le ministère de l'Environnement du Développement durable et des Parcs du Québec. Les statistiques ont été établies en tenant compte de la délocalisation du site en amont de

la station (-6%) en faisant usage expérimentalement de différentes méthodes dont celles du DMA horaire et de séries partielles (HENICHE *et al.*, 1999c).

4. *Calcul de la hauteur de submersion du terrain $H_i(x,y)$* en soustrayant l'altitude provenant du modèle de terrain du niveau d'eau résultant des i simulations hydrodynamiques (figure 2).

5. *Calcul de la distribution des dommages directs unitaires événementiels $d_i(x,y)$* à partir de courbes de taux d'endommagement en fonction de l'hydraulicité du tronçon (équation 4). Pour l'étude présente, les lois développées suite aux crues du Saguenay ont été employées en introduisant comme seules variables indépendantes le type d'implantation (valeur, sous-sol ou pas, hauteur du premier plancher) ainsi qu'une hauteur de submersion du premier plancher théorique dépendant de la localisation (x,y) et du type d'implantation et ce, pour chaque événement de crue. Tous ces calculs peuvent s'effectuer naturellement dans le MODELEUR.

6. *Calcul et cartographie du risque unitaire $r(x,y)$* (équation 5) pour chaque type d'implantation résidentielle. Cette variable se laisse aisément cartographier et on obtient des cartes de risque adimensionnelles dont l'unité est le pourcentage de destruction moyen annuel. Une carte est produite pour chaque catégorie de résidence. Les périodes de retour de référence permettant de discrétiser la structure de probabilité ont été 1, 2, 5, 10, 25, 50 et 100 ans.

7. *Utilisation dans différents contextes d'analyse, de planification de l'aménagement du territoire ou de médiation.* Les différentes possibilités d'utilisation seront présentées plus loin.

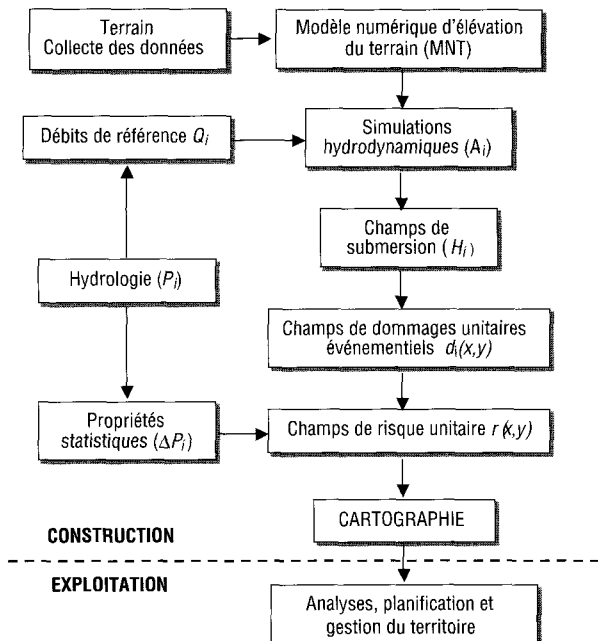


Figure 4 Méthodologie de cartographie du risque unitaire d'inondation résidentielle.

Unit flood risk mapping methodology for the residential sector.

4 – RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Site d'étude

La rivière Montmorency se situe juste au nord de la ville de Québec (Québec, Canada). Son bassin versant s'étend vers le nord jusque dans la Réserve faunique des Laurentides sur une longueur approximative de 90 km. Le tronçon à l'étude se situe dans la partie inférieure du réseau hydrographique (figure 5). Il est bordé en amont par le secteur de la rue Bocage et en aval par les limites de l'Arrondissement de Beauport (Québec) et de Boischatel, un peu en amont du rapide des Trois-Sauts. D'une longueur approximative de 1,7 km, ce tronçon en partie anastomosé est caractérisé par la présence de méandres, d'embranchements et d'îles dont la morphologie varie assez rapidement avec le temps. Les analyses de risque unitaire ont été concentrées dans un segment appelé « secteur des îlets » dont la localisation est présentée à la figure 5. Ce segment avait déjà fait l'objet de simulations hydrodynamiques (HENICHE *et al.*, 1999c ; LECLERC *et al.*, 1998 ; DOYON, 2001).

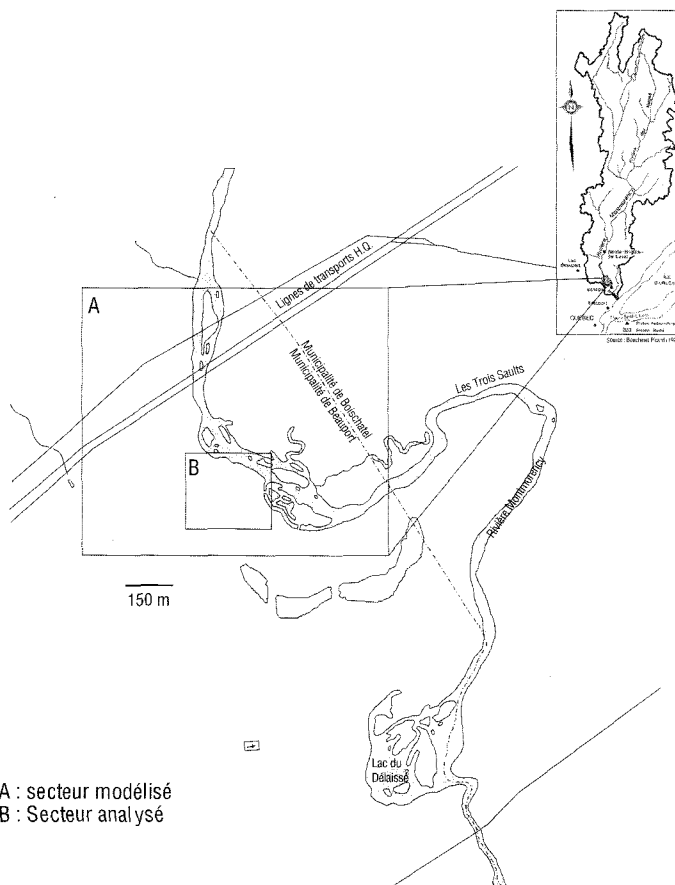


Figure 5 Rivière Montmorency (Québec, Canada) – Localisation du secteur à l'étude.

Montmorency River (Quebec, Canada): location of the study area.

Les résidents du secteur subissent depuis de nombreuses années des inconvénients occasionnels reliés aux crues de la rivière (isolement temporaire, évacuation préventive, inondation, érosion) et le secteur des Îlets est identifié depuis peu comme zone inondable (BOUCHER et PICARD, 1994 ; COMMUNAUTÉ URBAINE DE QUÉBEC, 2000). Les résidences situées à proximité de la prise d'eau municipale située immédiatement en aval dans le même secteur comptent parmi les plus touchées par les crues de la rivière qui, à cet endroit, se produisent habituellement en eau libre quoique des embâcles de glace puissent à l'occasion affecter le secteur (LECLERC *et al.*, 2001).

4.2 Présentation de cartes de risque unitaire

Les cartes de la figure 6 et de la figure 7 ont été obtenues par la méthode présentée (BLIN, 2002). Celles-ci recouvrent spécifiquement le secteur résidentiel des Îlets. Nous nous sommes limités à deux cas de figure : ainsi, la première carte illustre le risque unitaire pour des résidences sans sous-sol d'une valeur supérieure à 50 000\$CAD (en 2001) dont le rez-de-chaussée serait soulevé de 0,3 m par rapport au terrain ; la deuxième illustre la même information pour des résidences avec sous-sol (SS) aménagé, également d'une valeur de plus de 50 000\$CAD et dont le premier plancher (SS) serait établi à 1,6 m sous le terrain. Les points noirs sur les cartes montrent les centres géodésiques des résidences présentes. Les paramètres des cartes ne sont pas forcément représentatifs des résidences présentes. La représentation se limite au territoire étant ou pouvant être l'objet d'un développement résidentiel à l'exclusion donc des talus, du lit de la rivière et des zones réservées aux infrastructures municipales.

On constate de prime abord que, selon les hypothèses posées, les parties habitées de ce territoire subiraient entre 1 et 5 % de dommages moyens annuels directs par les crues à l'eau libre en l'absence de sous-sol. Si les mêmes implantations résidentielles étaient pourvues d'un sous-sol habitable, plusieurs verraient leurs dommages moyens annuels directs augmenter au-delà de 10 %, voire 15 % pour certaines. Cette simple constatation montre bien l'intérêt de telles cartes pour mettre en évidence les effets pervers d'implantations inappropriées.

D'autres exemples d'analyse de portée plus générique sont exposés ci-après.



Figure 6 Carte du risque unitaire d'inondation des résidences de valeur supérieure à 50 000 \$CAD sans sous-sol - Rivière Montmorency, secteur des Îlets.

Map of the unit flood risk for residences valued at more than \$CAD 50,000 without basement – Montmorency River, des Îlets Sector.



Figure 7 Carte du risque unitaire d'inondation des résidences de valeur supérieure à 50 000 \$CAD avec sous-sol - Rivière Montmorency, secteur des Îlets.

Map of the unit flood risk for residences valued at more than \$CAD 50,000 with basement – Montmorency River, des Îlets Sector.

4.3 Le risque correspondant aux cartes de risques d'inondation dans le cadre de la Convention Canada-Québec ou du PDCC

Il est vite apparu intéressant de comparer les cartes unitaires de risque à celle de la Convention Canada-Québec ou de sa mise à jour récente par la Communauté urbaine de Québec (CUQ, 2000) en concordance avec les résultats de HENICHE *et al.* (1999c). Le but est double : d'abord, apprécier la valeur du risque unitaire correspondant aux limites normées par la réglementation, et en second lieu, montrer le potentiel d'analyse de l'outil pour mettre en évidence les incertitudes liées à la méthode de cartographie préconisée dans la réglementation.

La mise à jour des cartes initiales (Convention Canada/Québec) par la CUQ (2000) touche différents aspects de la méthodologie. L'emploi d'une méthode de type DMA horaire plutôt que journalière corrigée par un facteur de pointe, une meilleure estimation de la relation empirique niveau/débit à la frontière aval du modèle (en crue sévère notamment), l'utilisation d'un modèle numérique de terrain plus précis dans le lit de la rivière et d'un simulateur 2D ont permis de réduire considérablement les incertitudes de la première approche, ce qui explique les différences notables observées dans les résultats ci-après.

Pour établir la comparaison, une évaluation quantitative du risque unitaire a été réalisée le long des limites des zones de grand et de faible courants (récurrence 20 ans et 100 ans). Pour ce faire, il a suffi de superposer les cartes des organismes sur les cartes de risque unitaire et d'en retirer les valeurs de risque unitaires moyennes sur le tracé des limites indiquées. Le tableau 1 présente les résultats comparatifs mentionnés pour des résidences qui seraient évaluées à plus de 50 000\$CAD avec et sans sous-sol pour une surélévation par rapport au terrain correspondant aux paramètres de base du modèle.

Tableau 1 Comparaison des résultats de risque unitaire de dommages directs (en % de l'évaluation municipale) aux limites d'inondation de récurrence 20 et 100 ans des cartes du ministère de l'Environnement du Développement durable et des Parcs (MEDDP) et de la CUQ.

Table 1 Comparison of results of unit flood risks (in % of the municipal evaluation) at the flooding limits of recurrence 20 and 100 years after the maps by ministère de l'Environnement du Développement durable et des Parcs (MEDDP) and CUQ.

Période de retour	20 ans				100 ans			
	Sans SS		Avec SS		Sans SS		Avec SS	
Catégorie								
Organisme	MEDDP	CUQ	MEDDP	CUQ	MEDDP	CUQ	MEDDP	CUQ
% de destruction moyen annuel	2,9 %	0,7 %	13,1 %	7,8 %	0,7 %	0,03 %	7,8 %	1,9 %

De prime abord, on constate sur les cartes (figure 6 et figure 7) que la pratique d'interdire toute construction dans la zone de grand courant est parfaitement justifiée si l'on tient compte que même sans sous-sol, une résidence « normale » ayant son rez-de-chaussée rehaussé de 0,3 m par rapport au sol subirait malgré tout au minimum 0,7 % de dommages directs en moyenne selon la carte de la CUQ. Cette valeur de pourcentage indique le minimum car

elle est prise à la limite de la zone (récurrence 20 ans), c'est-à-dire là où le risque est le moins élevé pour cette zone. Si l'on tient compte que le taux combiné de taxation municipale et scolaire se situe habituellement aux alentours de 2 % de l'évaluation municipale, on corrobore la pertinence de la réglementation en vigueur dans ces zones. Bien sûr, il est important de mentionner que les dommages directs ne sont pas indemnisés entièrement par la municipalité et les autres instances gouvernementales puisque les sinistrés assument environ 40-50 % des coûts de ces dommages (LECLERC *et al.*, 2001). Par contre, si l'on rappelle que les résultats de cette étude ne représentent que les dommages directs aux bâtiments et ne prennent pas en considération toutes les autres formes de dommages (meubles et effets personnels, coûts des mesures d'urgence, pertes fiscales dues à la dévaluation liée au dommage d'incertitude, dommages indirects, etc.) qui sont assumés par les individus et les divers paliers de gouvernements, sans compter les dommages par embâcles, il est évident que le taux réel de dommages d'inondations est significativement plus élevé que celui représenté sur nos cartes.

Concernant l'implantation entre la limite de la zone de récurrence 20 ans et celle de 100 ans, les dommages subis par les résidences sans sous-sol seraient entre 0,7 % (20 ans) et 0,03 % (100 ans) selon la carte de la CUQ. On peut encore là se poser des questions sur l'acceptabilité de tels risques lorsque ces taux sont comparés à ceux des taxes municipales et scolaires. Au minimum doit-on considérer l'intérêt de la méthodologie comparative utilisée pour apprécier l'efficacité des pratiques d'immunisation.

Une troisième analyse a donc porté sur la pertinence d'interdire toute construction non immunisée dans la zone de faible courant (20-100 ans). Considérons que l'implantation sans sous-sol constitue la forme la plus élémentaire d'immunisation en zone inondable sans égard aux autres mesures, notamment l'élévation du premier plancher ou le mode de construction. En utilisant les chiffres correspondant à la carte révisée de la CUQ, on constate que les taux d'endommagement passent de la gamme 7,8-1,9 % avec sous-sol à 0,7-0,03 % sans sous-sol ce qui constitue une réduction par un facteur 10 des dommages directs anticipés. La démonstration de la pertinence de la réglementation est encore très claire ici.

Enfin, il est apparu nécessaire de mettre en évidence les dangers reliés à l'incertitude des méthodes employées pour construire les cartes dans le cadre de la réglementation actuelle (PDCC) et le gain de précision qui peut être obtenu d'un affinement des méthodes tant statistiques qu'hydrauliques. Les différences entre les méthodes employées par le MEDDP (BOUCHER et PICARD, 1994) et la CUQ (HENICHE *et al.*, 1999c) ont été évoquées précédemment. Parmi les quatre facteurs de différenciation entre les deux approches, nous croyons que la méthode statistique employée et un fort écart d'appréciation dans la relation niveau-débit sont les plus déterminants pour expliquer les écarts dans les résultats obtenus, les deux items jouant dans le même sens. Ainsi, alors que le dommage unitaire pour les résidences sans sous-sol aux limites de la zone « 20 ans » du MEDDP est estimé à 2,9 %, le résultat de la CUQ donne 0,7 % soit quatre fois moins, ce qui montre le caractère plus sécuritaire de l'approche révisée de la CUQ. De même, aux limites de la zone « 100 ans », la ligne du MEDDP est associée à 0,7 % de dommages alors que celle de la CUQ est virtuellement négligeable (0,03 %). Le constat général est vrai pour tous les cas de figure, ce qui met en évidence les différences impor-

tantes qui peuvent surgir dans l'application de telles normes de cartographie du risque en relation avec l'incertitude des méthodes ou un choix inapproprié de celles-ci dans un contexte donné. Bien sûr, les constats mis en évidence sont ceux d'un cas particulier, celui de la rivière Montmorency dans le secteur des Îlets mais les écarts rencontrés demeurent significatifs et plaident à tout le moins pour un renforcement des méthodes employées. Il est surtout intéressant de pouvoir quantifier les conséquences des incertitudes sur la valeur du risque inhérent aux cartes produites.

4.4 Les incertitudes de l'approche cartographique proposée

La méthode proposée produit des cartes dont la paramétrisation se base, pour chacune, sur un mode d'implantation homogène dans la zone inondable qui prend seulement en compte les facteurs suivants : présence ou non d'un sous-sol, limites à la valeur de la propriété, hauteur du premier plancher par rapport au terrain fixée en moyenne. Or, les situations réelles peuvent varier énormément sur tous ces plans, en plus de présenter d'autres caractéristiques qui ajoutent à l'incertitude sans qu'on puisse en tenir compte explicitement d'après le jeu de courbes submersion-dommages disponible : finition du sous-sol en zone habitable, présence d'un second étage, immunisation du bâtiment, exposition aux courants et débris. Les cartes produites laissent place à une certaine marge d'incertitude même dans le cas où un mode d'implantation hypothétique de résidence correspondrait exactement aux paramètres de cartographie (la courbe retenue). De plus, le jeu de courbes utilisé provient des données disponibles suite aux crues du Saguenay (1996) ce qui limite l'applicabilité de ce modèle de submersion-dommages à d'autres régions jusqu'à ce que des validations probantes autorisent leur transfert. D'ailleurs, BONNIFAIT (2004) a récemment publié un jeu de courbes plus génériques prenant appui sur des données de Châteauguay, de Sorel et du Saguenay. La distinction reposant sur la valeur de la propriété a été retirée du jeu de paramètres tandis que l'état de finition du sous-sol peut désormais être pris en compte en plus du nombre d'étages. Ce modèle dont la publication est postérieure à la présente recherche n'a pas pu être utilisé ici mais sa forme peut parfaitement convenir à la cartographie proposée.

Il ne faut donc pas voir la présente méthode de cartographie comme un aboutissement ultime mais plutôt comme une démonstration de la faisabilité de cartographier le taux d'endommagement prévisible dans des conditions particulières d'aménagement d'un quartier résidentiel. Sous certaines hypothèses, ce qui inclut le jeu de courbes à utiliser, les cartes peuvent donc avoir leur utilité pour mieux planifier et vérifier l'adéquation des pratiques restrictives de construction et/ou des moyens d'immunisation en zone à risque.

5 – CONCLUSION

La présente recherche a permis de mettre au point un concept intégré de cartographie du taux d'endommagement direct moyen annuel que subirait, à l'eau libre, une résidence quelconque située en zone inondable par rapport à sa position et son mode d'implantation dans le terrain. La méthode développée permet d'intégrer les différentes caractéristiques des crues, notamment leur probabilité au dépassement et les hauteurs de submersion du terrain ; la méthode intègre de façon continue la topographie distribuée des zones inondables. De plus, en liant l'ampleur des dommages à la hauteur de submersion, il est possible de prendre en compte le mode d'implantation et la vulnérabilité des résidences représentée par la hauteur du premier plancher du bâtiment, qu'il comporte ou non un sous-sol.

La nouvelle méthode de cartographie du risque unitaire d'endommagement (CRUE) par inondation développée ici offre une plus-value par rapport aux méthodes existantes. En effet, en plus d'utiliser des jeux de données similaires, les cartes développées à l'aide de cette méthode sont faciles d'utilisation et de compréhension, elles produisent des résultats distribués en tous points du territoire étudié, elles sont d'une mise à jour facile tout en étant adaptables à un large éventail de modes d'implantation résidentielle.

Enfin, elles ont permis de constater que les cartes actuelles servant de base à la réglementation de la construction en zones inondables, du moins au Canada, forment une représentation tronquée du risque et qu'elles pourraient mieux informer par rapport à sa valeur réelle. Ainsi, on pourrait conclure qu'il ne faut plus cartographier le risque seulement en fonction d'une période de retour mais plutôt en fonction d'un pourcentage de destruction moyen annuel pour différents types d'implantation.

Quelques points de cette méthode sont encore sujets à amélioration. En effet, il faudrait procéder à une analyse de sensibilité afin de valider complètement la méthode et mesurer le degré de précision requis au niveau des intrants. Afin de confirmer le caractère générique de la méthode développée, il faudrait aussi vérifier, pour l'ensemble des résidences uni-familiales du Québec, la validité des courbes de dommage établies au Saguenay. Les paramètres de sélection parmi les courbes disponibles devraient aussi s'exempter de considérer la valeur du bâtiment ($>$ ou $<$ que 50 000\$CAD) qui en réduit la généralité. Le nombre d'étages serait certainement plus pertinent comme l'indiquent les travaux récents de BONNIFAIT (2004). Enfin, il faudra explorer les moyens d'intégrer une gamme plus étendue des facteurs de risque, en particulier les risques d'inondation dus aux embâcles de glace. Finalement, il serait très pratique, une fois un seuil d'acceptabilité défini, en utilisant par exemple les paramètres fiscaux des municipalités riveraines, d'en déduire la cote correspondante sur les cartes.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Centre d'Expertise et de Recherche en Infrastructures urbaines (CERIU), les municipalités de Beauport (maintenant la ville de Québec, arrondissement Beauport), de Sainte-Brigitte-de-Laval et de Boischatel, le Programme conjoint fédéral-provincial de Protection civile (PCPC), le Fonds pour la Formation des Chercheurs et l'Aide à la Recherche (FCAR ; maintenant le Fonds Québécois de recherche sur la Nature et les Technologies ou FQRNT) pour leur soutien financier dans ce projet qui recherchait également des méthodes innovatrices de contrôle des inondations par embâcle.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BEARD L.R. (1997). Estimating Flood Frequency and Average Annual Damage, *ASCE J. of Water Res. Plan. and Manag.*, **123**(2): 84-87.
- BLIN P. (2002). Développement d'une nouvelle méthode de cartographie du risque unitaire d'inondation (CRUE) pour des résidences. Mémoire de maîtrise INRS-ETE. 111 p.
- BONNIFAIT L. (2004). Développement de courbes submersion-dommages pour l'habitat résidentiel québécois. Mémoire de maîtrise de l'INRS-ETE. Décembre. 87 p.
- BOOY C. et L.M. LYE (1989). A New Look at Flood Risk Determination, *Wat. Res. Bull.*, **25**(5): 933-943.
- BOUCHER J.-P. et F. PICARD (1994). Cartographie des zones inondables – Rivière Montmorency, du rapide de Trois Saults jusqu'à l'île Enchanteresse, Ministère de l'Environnement et de la Faune, Direction du milieu hydrique, Service de l'hydrologie et de la cartographie, Rapport no DH-94-01, 25 pages + annexes.
- BRETON C. et C. MARCHE (1999). Une aide à la décision pour le choix des interventions en zone inondable, École polytechnique de Montréal, Département de génie civil, géologique et des mines, 30 p.
- CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION (CSA) (1991). Risk Analysis requirements and guidelines. CAN/CSA-Q634-91. Rexdale, Ont.
- COMMISSION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE SUR LA GESTION DES BARRAGES (CSTBG) (1997). Rapport de la commission. Janvier.
- COMMUNAUTÉ URBAINE DE QUÉBEC (CUQ) (2000). Carte des zones inondables de Beauport dans le secteur des Trois-Saults et des îlets, échelle 1:2000. Service d'aménagement du territoire.
- CONVENTION CANADA/QUÉBEC (1994). Convention entre le gouvernement du Canada et le gouvernement du Québec relativement à la cartographie et à la protection des plaines d'inondation, et au développement durable des ressources en eau. s.l. :s.n.
- DOYON B. (2001). Développement d'un modèle lagrangien de transport de glace de surface en milieu fluvial, Thèse de doctorat en Sciences de l'eau, Québec, Université du Québec INRS-Eau, 272 p.
- EL-JABI N. et J. ROUSSELLE (1987). A Flood Damage Model for Flood Plain Studies, *Wat. Res. Bull.*, **23**(2): 179-188.
- EL-JABI N., D. RICHARD et J. ROUSSELLE (1981). Estimation des dommages moyens causés par les inondations. Rapport au ministère de l'Environnement du Québec, Centre de Développement Technologique de l'École Polytechnique de Montréal, CDT-P-624, janvier 1981, 77 p., 4 appendices.

- ENVIRONMENT CANADA (1998). Environment Canada One-Dimensional Hydrodynamic Model – Computer Manual, Water Modelling Section, Ottawa.
- FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (FEMA) (2004). National Flood Insurance Program, URL (validé en 2004): <http://www.fema.gov/nfip/>.
- FREAD D. L. (1984). DAMBRK : The NWS Dam-Break Flood Forecasting Model. National Weather Service, Office of Hydrology, Silver Spring, Md.
- GILARD O. et N. GENDREAU (1998). Inondabilité : une méthode de prévention raisonnable du risque d'inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants, *Rev. des Sciences de l'Eau*, **3**(1998) : 429-444.
- GOLDMAN D. (1997). Estimating Expected Annual Damage for Levee Retrofits, *ASCE J. of Water Res. Plan. and Manag.*, **123**(2): 89-94.
- GRIGG N.S. et O.J. HELWEG (1975). State of the art of estimating flood damage in urban areas. *Wat. Res. Bul. (AWRA)* **11**(2), 379-390.
- HENICHE M., SECRETAN Y., BOUDREAU P. et LECLERC M. (1999a). A new finite element drying-wetting model for rivers and estuaries. *Int. J. Advances in Water Resources*. **38**(3): 163-172. Janvier.
- HENICHE M., SECRETAN Y., BOUDREAU P. et LECLERC M. (1999b). MODELEUR/HYDROSIM – Guide d'utilisation. Document HYDROSIM 1.0a06. 90p. p.v., Janvier.
- HENICHE M., LECLERC M., SECRETAN Y. et OUARDA T.B.M.J., (1999c). Travaux d'atténuation des risques de crue à l'eau libre de la rivière Montmorency dans le secteur des Îlets – Phase 2. Mise à jour de l'analyse hydrologique, dimensionnement des travaux d'atténuation et analyse de l'impact sur les risques résiduels de dommage aux résidences. Travail réalisé pour le compte de la Ville de Beauport, Rapport scientifique INRS-Eau #R555, 176 p.
- LECLERC M., SECRETAN Y., HENICHE M., OUARDA T.B.M.J. et MARION J. (2003). Une méthode prédictive non biaisée et géoréférencée d'estimation des dommages résidentiels d'inondation. *Revue canadienne de Génie civil*. **30**(5): 914-922.
- LECLERC M., MORSE B., FRANCOEUR J., HENICHE M., BOUDREAU P. et SECRETAN Y. (2001). Analyse de risques d'inondations par embâcles de la rivière Montmorency et identification de solutions techniques innovatrices – Rapport de la phase 1- Préfaisabilité, Document de travail présenté au Comité de suivi, Rapport conjoint enregistré à l'INRS-Eau R577, et à l'Université Laval – Département de Génie civil, Janvier, 118 pages.
- LECLERC M., DOYON B., SECRETAN Y., HENICHE M., LAPOINTE M. et BOUDREAU P. (1998). Simulation hydrodynamique et analyse morphodynamique de la rivière Montmorency dans le secteur des Îlets. Pour le compte de la ville de Beauport. Rapport scientifique INRS-Eau #R522. 120 p.
- LECLERC M., MARION J., HENICHE M., OUARDA T.B.M.J. et SECRETAN Y. (1997). Prédiction des dommages résidentiels d'inondation en fonction de l'hydraulicité des rivières Chicoutimi, aux Sables et du lac Kénogami. Rapport scientifique INRS-Eau #R511. 108 p.
- OUARDA T.B.M.J., EL-JABI N., et ASHKAR F. (1995). Flood Damage Estimation in the Residential Sector, in « *Water Resources and Environmental Hazards* » (R. Herrmann, R. C. Sidle, W. Back and A. I. Johnson Edts.), *AWRA Technical Publication series*, TPS-95-2, 73-82.
- OUARDA T.B.M.J. et ASHKAR F. (1995). The Peaks-over-threshold method for regional flood frequency estimation. 48^e Conférence annuelle de l'Association canadienne des Ressources en eaux : *Gérer le milieu aquatique*. Fredericton, 20-23 juin.
- QUELLETTE P., LEBLANC D., EL-JABI N. et ROUSSELLE J. (1985). Cost-benefit analysis of flood plain zoning. *J. Wat. Res. Plan. & Man (ASCE)*. **114**(3), 326-334, paper # 22468, May.
- PROGRAMME DE DÉTERMINATION DES COTES DE CRUE (PDCC) (2001). URL (validé en 2004) : <http://www.menv.gouv.qc.ca/communiques/1998/c981215a.htm>.
- PLURAM INC. (1983). Étude de rentabilité – Solutions aux inondations, Ville de Richmond, Présenté à Min. de l'environnement, Gouvernement du Québec, 55 p.

SECRETAN Y., LECLERC M., DUCHESNE S. et HENICHE M. (2001). Une méthodologie de modélisation numérique de terrain pour la simulation hydrodynamique bidimensionnelle. vol. 14 no. 2, p. 187-212.

SECRETAN Y., ROY Y., GRANGER Y. et LECLERC M. (1999). MODELEUR/HYDROSIM – Guide d'utilisation. Document MODELEUR 1.0a01. 235p. p.v., Janvier.

STEDINGER J.R. (1997). Expected Probability and Annual Damage Estimators, *ASCE J. of Water Res. Plan. and Manag.*, **123**(2): 125-135.

US ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE) (1990). HEC-2 Water Surface Profiles User's Manual. Hydraulic Engineering Centre Davis, California, USA, 308 p.