

Université du Québec

INRS-EAU

**DÉVELOPPEMENT D'UNE NOUVELLE MÉTHODE DE CARTOGRAPHIE DU
RISQUE UNITAIRE D'INONDATION (CRUE) POUR DES RÉSIDENCES**

Par

Pierrick Blin

(B.Sc. Géographie Physique)

Mémoire présenté

pour l'obtention

du grade de Maître ès sciences (M.Sc.)

Jury d'évaluation

Examineur externe

André Bouillon
CUQ

Examineur interne

Yves Secretan
INRS-EAU

Directeur de recherche

Michel Leclerc
INRS-EAU

Co-directeur

Brian Morse
Université Laval

Décembre 2001

* Droits réservés de Pierrick Blin, 2001

AVANT-PROPOS

Ce mémoire de type « par article » comporte d'abord une synthèse qui fait principalement état de la pertinence du sujet et du besoin d'une nouvelle méthode de cartographie des risques d'inondation démontré par une revue bibliographique complète. De plus, une discussion permet de donner une bonne idée des diverses applications possibles des cartes développées. L'article soumis à la *Revue canadienne de Génie Civil* constitue le dixième chapitre de ce mémoire.

La contribution des auteurs de l'article au projet de recherche s'établit comme suit :

- Pierrick Blin :
- Réalisation du projet :
 - Traitement des données
 - Test et réalisation des cartes
 - Bibliographie
 - Rédaction de la synthèse
 - Rédaction de l'article
- Michel Leclerc :
- Conception du projet
 - Correction de l'article et de la synthèse
- Yves Secretan :
- Conception de l'outil Modeleur-Hydrosim
 - Correction de l'article et de la synthèse
 - Conception du projet
- Brian Morse :
- Application à la rivière Montmorency

REMERCIEMENTS

Cette étude n'aurait pu être réalisée sans la collaboration, de près ou de loin, de plusieurs personnes.

Je tiens d'abord à remercier mon directeur de recherche M. Michel Leclerc pour m'avoir fait confiance et guidé tout au long de ce projet. J'ai apprécié particulièrement le côté professionnel et humain de sa direction et sa manière de me « remettre sur les rails » en temps voulu. Un gros merci à Paul Boudreau pour ne pas avoir compté les heures mises à m'aider. Merci aussi à Yves Secretan pour ses conseils et son appui en cas de « code 30 ». Merci à André Bouillon d'avoir accepté de donner de son temps pour lire et corriger ce mémoire. Merci à Brian Morse pour son précieux appui.

Merci à Marcel Roy et la ville de Beauport pour leur appui financier et technique. Vous m'avez grandement simplifié la vie.

Merci aux nombreuses personnes et organismes qui m'ont donné de la documentation dans le seul but de m'aider.

Merci au reste de l'équipe de recherche (Mourad Heniche, Véronique Dubos) pour ne pas avoir compté leur temps à me répondre.

Merci à mes précieux amis de Québec (Marc, Steve, Payse et Véronique) pour leur appui et leurs services.

Enfin, l'étude a été réalisée grâce au support financier du Fonds pour la Formation des Chercheurs et l'Aide à la Recherche (FCAR), dans le cadre de leur programme de bourse en milieu pratique en collaboration avec la Ville de Beauport.

« Dans la vie, l'essentiel est de porter sur tout des jugements a priori. Il apparaît, en effet, que les masses ont tort, et les individus toujours raison. Il faut se garder d'en déduire des règles de conduite : elle ne doivent pas avoir besoin d'être formulée pour qu'on les suive.[...]»

Boris Vian

La Nouvelle-Orléans,

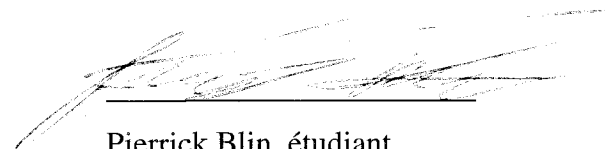
10 mars 1946

tiré de L'écume des jours

RÉSUMÉ

Les intervenants responsables de la gestion des inondations ont besoin d'outils permettant de traiter ce problème de façon simple et précise. Il existe plusieurs méthodes dites de cartographie des risques d'inondation dans le monde ayant pour but de répondre à ces besoins. Actuellement, en considérant simultanément les éléments constitutifs du risque, soit l'aléa et la vulnérabilité, aucune de ces méthodes ne permet d'établir de façon précise et quantifiables en tous points du territoire les risques d'inondation.

La méthode de cartographie du risque unitaire d'inondation à l'eau libre (CRUE) pour les habitations résidentielles développée par cette étude permet de répondre à ce besoin en procédant à un traitement unitaire (au sens adimensionnel du terme) de la définition du risque. Pour ce faire, les dommages sont d'abord calculés à partir des profondeurs de submersion déduites elles-mêmes des niveaux d'eau pour des périodes de retour représentatives. Le calcul de ces dommages se fait en utilisant une forme de la loi de Gompertz pré-établie dans une étude précédente de Leclerc (Leclerc *et al*, 1997). Enfin, le risque est l'intégration des dommages (ou taux d'endommagement) unitaires obtenus correspondant à chaque période de retour par rapport à la probabilité de ces périodes de retour. Cette méthode donne des cartes représentant le risque en pourcentage de destruction moyen annuel. Les cartes sont d'une grande flexibilité et peuvent recevoir tous les traitements additionnels permis par un système d'information géographique. La représentation des résultats peut ainsi se faire selon les besoins spécifiques des intervenants. Enfin l'interprétation des cartes de risque en vigueur actuellement au Québec a permis de conclure que celles-ci sous-estiment clairement le risque et qu'un renforcement de la législation ou des méthodes de cartographie semble requis.



Pierrick Blin, étudiant
recherche



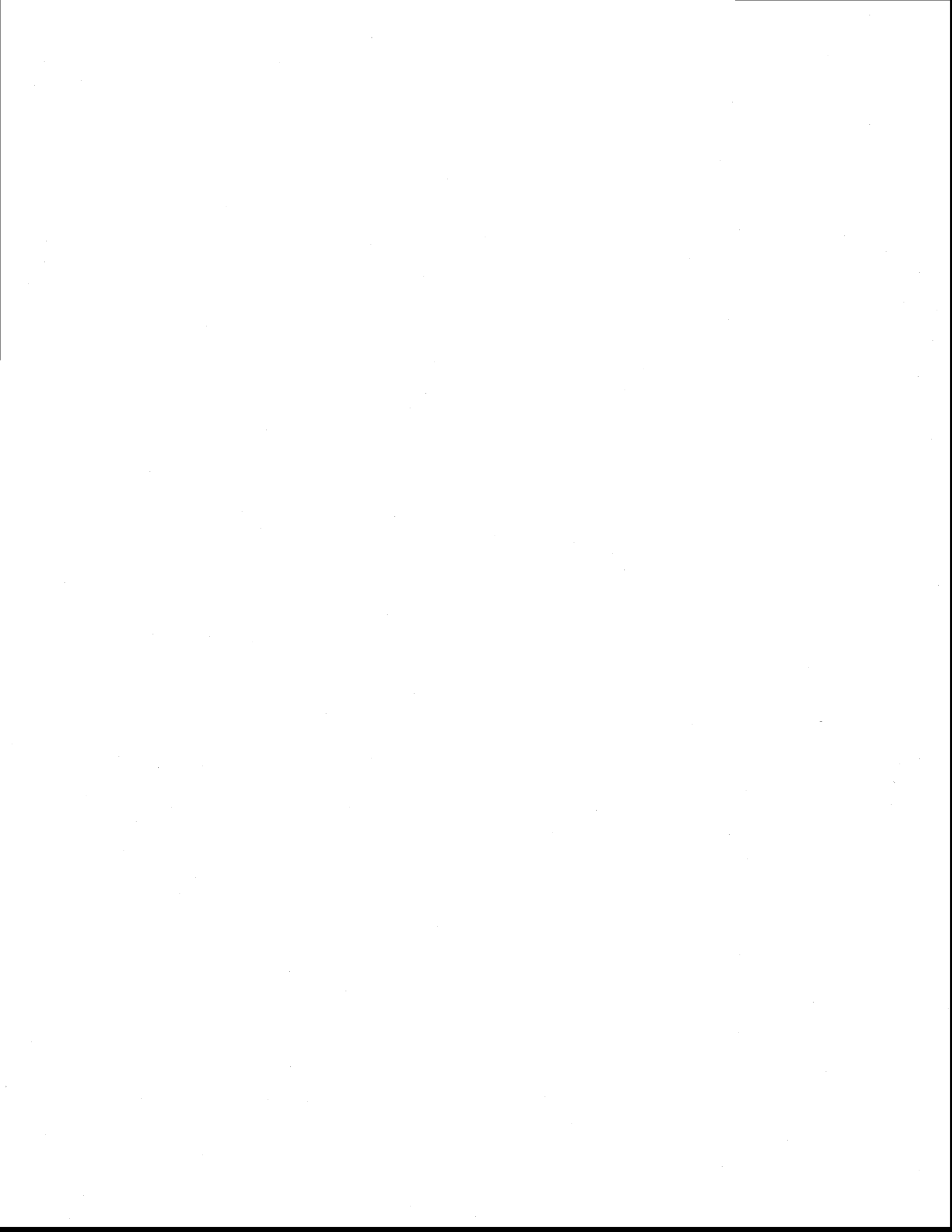
Michel Leclerc, directeur de

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS.....	III
REMERCIEMENTS	V
RÉSUMÉ.....	VII
TABLE DES MATIÈRES.....	IX
LISTE DES TABLEAUX	XIII
LISTE DES FIGURES	XV
1. INTRODUCTION.....	1
2. REVUE BIBLIOGRAPHIE	5
2.1. Notion de risque	5
2.1.1. Définition du risque retenue	5
2.1.2. Orthogonalité de la composante vulnérabilité du risque	6
2.1.3. Perception du risque	7
2.2. Aléa (aspect physique).....	8
2.2.1. Survol des notions hydrologiques et hydrauliques	8
2.2.2. Embâcles	9
2.3. Vulnérabilité (potentiel de dommage).....	10
2.3.1. Typologie des dommages	10
2.3.2. Méthodes d'estimation des dommages.....	12
2.3.2.1. Méthode linéaire agrégée.....	13
2.3.2.2. Méthode historique.....	13
2.3.2.3. Méthode niveau-dommage (trad. de 'stage-damage').....	13
2.3.2.4. Méthode du US. Army Corps. of Engineers (USACE).....	14
2.3.2.5. Méthode DOMINO	16
2.3.2.6. Méthode d'estimation et d'analyse des dommages du Centre de Développement Technologique (CDT)	17
2.3.2.7. Méthode INRS-ETE/MEF.....	19
2.4. Les méthodes de cartographie	23
2.4.1. U.S.A.	23
2.4.2. Europe	24
2.4.2.1. Méthode classique	24
2.4.2.2. Méthode INONDABILITÉ (CÉMAGREF)	25
2.4.3. La Convention Canada-Québec et le PDCC.....	25
3. PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS	29
3.1. Problématique.....	29

3.2.	Objectifs.....	31
4.	RÉGION D'ÉTUDE.....	33
5.	PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE	35
5.1.	Les bases mathématiques.....	35
5.2.	Les pré-requis	35
5.3.	Méthode de cartographie des risques unitaires d'endommagement (CRUE) dû aux inondations.....	36
6.	RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION.....	39
6.1.	Présentation de cartes de risque unitaire d'inondation à l'eau libre	39
6.2.	Le risque correspondant aux cartes de risques d'inondation dans le cadre de la Convention Canada-Québec ou du PDCC.....	42
6.2.1.	Cartes actuelles	42
6.2.2.	Résultats comparatifs.....	43
6.2.3.	Commentaires sur les cartes de risque d'inondation	44
7.	DISCUSSION.....	47
7.1.	Avantages et inconvénients de la méthode.....	47
7.2.	Extension de la portée de la méthode	48
7.3.	Facteurs potentiels de sensibilité de la méthode.....	50
7.4.	Immunsation	51
8.	CONCLUSION.....	53
9.	BIBLIOGRAPHIE.....	55
10.	ARTICLE.....	59
10.1.	Résumé	60
10.2.	Introduction.....	61
10.3.	Revue de la bibliographie	63
10.3.1.	Définition du risque retenue	63
10.3.2.	Méthodes de cartographie existantes	64
10.3.2.1.	La cartographie des risques dans le cadre de la Convention Canada-Québec et du PDCC.....	64
10.3.2.2.	Autres méthodes québécoises	66
10.3.2.3.	La méthode de cartographie des zones d'assurabilité des USA	66
10.3.2.4.	La méthode INONDABILITÉ (France).....	68
10.3.2.5.	Le besoin d'une cartographie intégrée du risque.....	70
10.4.	Présentation de la méthode unitaire.....	70
10.4.1.	Les bases mathématiques.....	71
10.4.2.	Les pré-requis	71
10.4.2.1.	L'information géographique, la modélisation du terrain et de l'hydrodynamique et la cartographie	72
10.4.2.2.	La modélisation des écoulements	72

10.4.2.3.	Relations fonctionnelles prédictives des dommages	73
10.4.2.4.	Statistiques hydrologiques	75
10.4.3.	Méthode de cartographie des risques unitaires (CRU) d'inondation	75
10.5.	Résultats et discussion.....	77
10.5.1.	Site d'étude	77
10.5.2.	Présentation de cartes de risque unitaire	78
10.5.3.	Le risque correspondant aux cartes de risques d'inondation dans le cadre de la Convention Canada-Québec ou du PDCC	79
10.6.	Conclusion.....	81
10.7.	Remerciements	83
10.8.	Bibliographie	83



LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Typologie des dommages	11
Tableau 2 - Comparaison des résultats de risque unitaire d'endommagement moyen (en % de destruction moyen annuel) aux limites d'inondation de récurrence 20 ans et 100 ans des cartes du Ministère de l'Environnement (MENV) et de la CUQ.....	43



LISTE DES FIGURES

Figure 1- Interprétation graphique du risque.....	6
Figure 2 – Orthogonalité de la vulnérabilité.....	7
Figure 3 – Méthode niveau-dommage.....	14
Figure 4 – Notion de hauteur (profondeur) de submersion	20
Figure 5 – Lois de comportement des dommages (d’après Leclerc <i>et al</i> , 1997).....	22
Figure 6 – Carte de localisation du Secteur des Îlets (B).	34
Figure 7 – Étapes de la méthode de cartographie des risques unitaires d’inondation.	36
Figure 8 – Carte de risque unitaire d’inondation pour des résidences avec sous-sol d’une valeur supérieure à 50 000 \$.....	40
Figure 9 - Carte de risque unitaire d’inondation pour des résidences sans sous-sol d’une valeur supérieure à 50 000 \$.....	41
Figure 10 – Limites des cartes de risque d’inondation de la CUQ et de la Convention Canada-Québec.....	42



1. INTRODUCTION

Les inondations sont parmi les catastrophes naturelles les plus dommageables. Bien qu'elles n'aient pas l'ampleur de certaines catastrophes telles que les volcans ou les ouragans tropicaux, elles constituent le risque le mieux distribué sur la planète (White W.R., 1999). De plus, leur grande fréquence dans certaines régions du globe, leur dépendance face aux changements climatiques, et la pression démographique de plus en plus forte sur les rives des cours d'eau en font des événements de plus en plus préoccupants et difficiles à gérer. Le problème des inondations se complexifie d'autant plus qu'il touche à un élément naturel à la base même de la culture et de l'économie de la plupart des peuples. En effet, chacun sait que les rivières et les fleuves ont été et sont encore les éléments fondamentaux du développement des civilisations. Le fait que ces éléments soient fondamentaux accentue le nombre de sphères de la société qui sont concernées par le risque ou le danger qu'ils représentent. L'inondation n'est pas seulement une question technique, c'est aussi un problème qui touche de près les domaines économiques, sociaux, légaux, environnementaux, etc. Dans le cadre de ce projet de maîtrise, nous nous sommes attardés particulièrement à l'aspect économique des inondations à l'eau libre, plus spécifiquement aux risques matériels pour les résidences.

Au Québec, c'est aux cours des années 60 que les inondations ont commencé à devenir plus complexes à gérer. En effet, la construction de nombreux ouvrages et aménagements, de même que l'installation de résidences permanentes (auparavant des chalets) sur les rives des cours d'eau, ont eu pour conséquence d'augmenter, ou du moins modifier, le risque face aux crues exceptionnelles. De plus, l'absence ou la mauvaise transmission vers les intervenants des connaissances sur l'hydrologie fluviale a eu pour conséquence le manque ou l'absence de règlements régissant la construction dans les zones inondables. Ceci a permis à de nombreux citoyens de s'installer en permanence sur les plaines inondables et d'obtenir des droits acquis face aux lois et règlements subséquents (Leclerc, 2000). Enfin, le transfert de responsabilité des citoyens vers l'état par diverses mesures sociales, et les programmes d'indemnisation lors de catastrophes

dans les cas qui nous intéressent, ont rendu nécessaire une gestion serrée du risque d'inondation et plus particulièrement de leurs coûts de la part des gouvernements. Depuis lors, les autorités concernées désirent avoir une idée aussi précise que possible, et cela sous une forme cartographique, des conséquences des inondations futures sur les bâtiments et infrastructures actuelles et potentielles situées dans la plaine inondable. Cependant, ces mêmes autorités désirent limiter le coût et la durée des études pour parvenir à obtenir cette information. C'est ainsi que depuis une quinzaine d'années, il s'est développé diverses méthodes de gestion, de prévision et d'évaluation du risque d'inondation. L'évolution des connaissances et des technologies a permis d'établir des méthodes de plus en plus précises adaptées aux besoins des intervenants concernés. Par contre, aucune des méthodes existantes ne permet de réaliser une évaluation à la fois préventive et quantitative précise des coûts liés au risque d'inondation. Le développement d'une nouvelle méthode de cartographie unitaire des risques (CRUE) de dommages directs d'inondation semble être une voie intéressante pour répondre aux différentes préoccupations à l'égard de la prévention de ces événements. D'autant plus que cette nouvelle méthode se base sur une définition précise et reconnue du risque combinant ses deux aspects constitutifs, soit l'aléa et la vulnérabilité.

Dans le cadre de cette recherche qui se veut 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 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, sinon impossibles à évaluer de façon unitaire car ils sont, soit trop spécifiques (ex, commerces, industries), ou non-quantifiables car ils appartiennent 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 et ne prend donc pas en considération les inondations dues aux embâcles. 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 revue bibliographique résumant les divers aspects à prendre en compte lorsqu'il est question de risque d'inondation et présentant 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 apporté par cet outil de cartographie unitaire seront exposés et discutés.

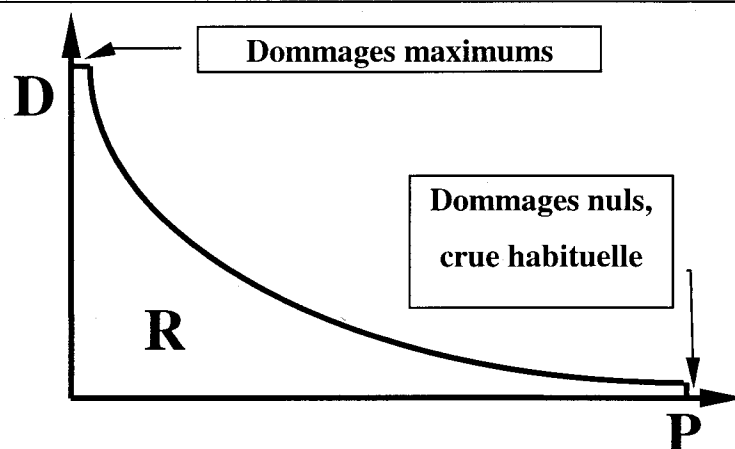


Figure 1- Interprétation graphique du risque

On peut ainsi voir qu'à partir d'un certain seuil de grande probabilité au dépassement (courte période de retour), les dommages sont nuls ou négligeables en raison de l'aspect commun de la crue s'y rapportant. Ainsi, il est évident que pour une crue de période de retour annuelle, il n'y a pas ou très peu de dommages puisque aucune construction ne se situe dans ce qui correspond au lit majeur de la rivière. Les dommages augmentent à mesure que la probabilité des crues diminue. Cette augmentation se poursuit jusqu'à l'atteinte de la probabilité où la destruction est quasi totale et donc les dommages maximums. Graphiquement, la notion de risque correspond à l'aire sous la courbe de la Figure 1. Bien que l'intégration du dommage financier puisse atteindre un plafond en raison de la valeur limitée du patrimoine bâti vulnérable, le dommage matériel peut continuer à croître dû aux changements morphologiques majeurs qui surviennent en cas de crues catastrophiques structurant le réseau hydrographique (ex : les crues du Saguenay en 1996, notamment la rivière Ha!Ha! et la rivière à Mars). Dans ce cas, le risque ne peut plus se quantifier financièrement au-delà d'un certain seuil.

2.1.2. Orthogonalité de la composante vulnérabilité du risque

Un aspect de la vulnérabilité qu'il est important de connaître est l'orthogonalité ou l'indépendance de ses trois composantes principales. Selon Leclerc (2000), la vulnérabilité comporte trois composantes : écologique, humaine ou sociale, et économique. Pour les deux premières, la décision d'intervenir est d'ordre politique alors

que pour la dernière la décision prend appui sur une argumentation mieux quantifiable, habituellement un rapport coûts-bénéfices. Cette orthogonalité des composantes, illustrée à la Figure 2, amène une certaine forme d'indépendance dans les prises de décision. Dans les deux premiers cas, la portée du débat peut s'étendre à des échelles très différentes. Ainsi, la préoccupation écologique peut interpeller un public très large (régional, voire national) alors que le facteur social ou humain pourra ne concerner que les populations riveraines, notamment en cas de projet d'expropriation ou de relocalisation hors des zones à risque

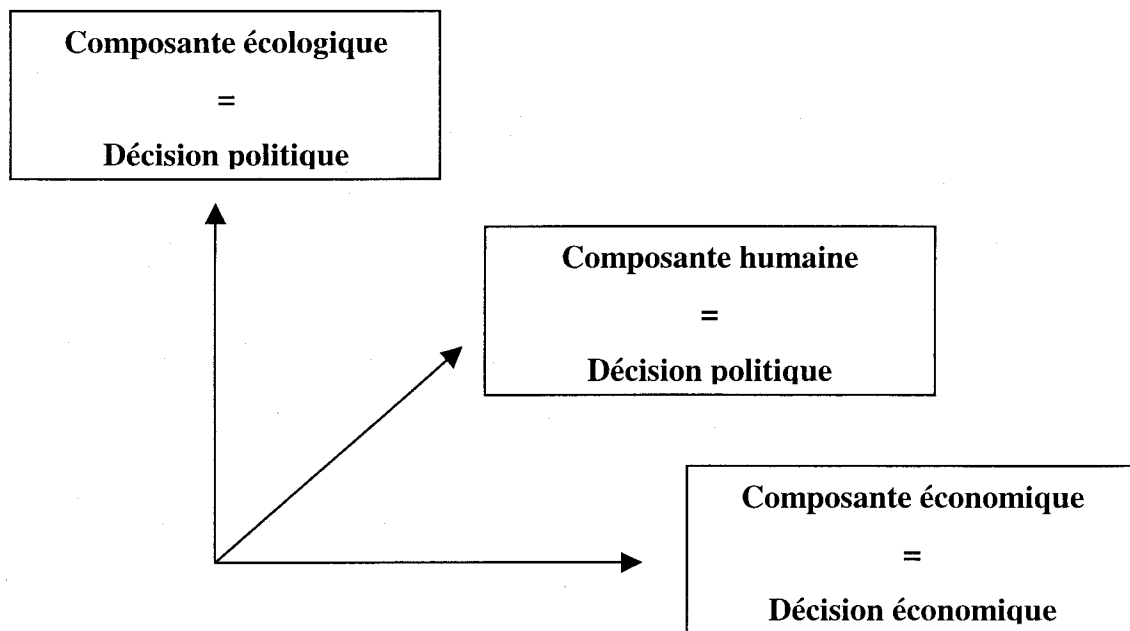


Figure 2 – Orthogonalité de la vulnérabilité

2.1.3. Perception du risque

Un aspect capital dans la problématique du risque d'inondation est la perception que les différents organismes et personnes concernés en ont. En effet, la perception des gens a une influence primordiale autant sur la vulnérabilité que sur les éventuelles interventions visant à corriger le problème. C'est la perception du risque d'inondation qui détermine en partie la vulnérabilité et les besoins d'intervention (Burn, 1999). Nous verrons plus loin que dans certaines approches (ex : méthode INONDABILITÉ), la perception socio-

économique du risque d'inondation est au cœur même de la définition de la vulnérabilité (Givone et Guillard, 1997)

La perception est basée sur deux grands facteurs, l'expérience et l'éducation. Les gens ne croient pas à un risque tant que qu'ils n'en ont pas fait l'expérience ou qu'ils n'ont pas été éduqués et dûment informés sur ce risque. Même dans ces cas, chaque individu absorbe et donne une réponse différente à l'information reçue ou l'expérience vécue. De plus, les gens ont tendance avec le temps à oublier ou à négliger une expérience ou les informations reçues (Burn, 1999). Ce dernier principe est à la base de la culture du risque (Leclerc, 2000). De plus, l'expérience d'un événement n'est vraiment profitable que pour un événement similaire. Ainsi, pour maintenir le public et les autorités en alerte (sensibilisation), il faut considérer tous ces points (Burn, 1999).

Burn (1999) fait donc certaines recommandations simples pour y arriver. Tout d'abord, l'expérience et l'éducation du public doivent être révisées et mises à jour à chaque événement. Il conclut aussi que le meilleur moment pour informer et éduquer est directement après un désastre alors que les gens sont les plus réceptifs. Cependant, il est essentiel que cette information soit fondée sur des bases crédibles et fiables afin que la sensibilisation soit efficace.

2.2. Aléa (aspect physique)

2.2.1. Survol des notions hydrologiques et hydrauliques

L'aléa interpelle deux disciplines principales : l'hydrologie et l'hydraulique fluviale. Pour résumer, l'hydrologie comporte l'ensemble des démarches et procédés qui mènent à la détermination des débits dans une rivière, incluant leur probabilité d'occurrence. L'hydraulique concerne les applications, calculs et traitements qui permettent d'obtenir les niveaux d'eau à partir de ces débits calculés à l'échelle du tronçon. Dans le cas des inondations, l'hydrologie est la discipline qui permet d'obtenir les débits et leurs périodes moyennes de retour. L'hydraulique, quant à elle, est la discipline qui permet d'obtenir

les niveaux d'eau et accessoirement les vitesses correspondant à ces débits. La combinaison de ces deux disciplines permet donc d'associer des périodes de retour à des niveaux et vitesses d'écoulement en divers points d'un cours d'eau.

Il y a deux approches en hydrologie : l'approche déterministe et l'approche statistique. L'approche déterministe considère tous les apports et facteurs pouvant influencer le débit (Ex : pluie, neige, eau dans le sol, etc.) et les introduit généralement dans un modèle qui estime le débit. Cette méthode n'est pas conçue pour donner une période de retour correspondant au débit trouvé. C'est d'ailleurs ce qui empêche son utilisation dans le cadre de la méthode développée ici puisque la probabilité des crues est un élément essentiel du calcul du risque. Par contre, l'outil peut servir à la prévision des crues et conséquemment à la gestion opérationnelle du risque.

L'approche statistique permet d'estimer des débits, d'une probabilité donnée, à partir de lois statistiques qui ont été ajustées à partir de séries de données de débits mesurés. Il y a différentes méthodes d'analyse et d'expression des débits qui s'appliquent selon la taille des bassins versants ou plus particulièrement selon leur temps de réponse moyen. Ainsi, pour un grand bassin versant, une moyenne journalière du débit est suffisante pour avoir une bonne idée du débit de pointe de la crue. Par contre, comme dans le cas de la rivière Montmorency, où le temps de réponse est relativement court (douze heures environ, Leclerc, 1998), des moyennes horaires sont requises pour représenter plus exactement les pointes.

2.2.2. Embâcles

Au Québec, les embâcles provoquent généralement des inondations plus fréquentes et ayant des niveaux d'eau plus élevés que les crues à l'eau libre. Selon Rousselle (Rousselle, 1990), il y a de grandes distinctions hydrologiques entre les inondations à l'eau libre et par embâcles. En effet, les embâcles sont beaucoup plus complexes à traiter en raison d'abord de leur caractère très local et difficilement prévisible mais aussi d'un manque de connaissances et de données à leur sujet. Ainsi, le fait qu'ils ne soient pas

semblables d'un tronçon à l'autre d'un cours d'eau empêche la régionalisation à l'échelle du bassin, induit des techniques analytiques moins poussées, demande plus de données historiques locales et oblige à connaître très bien leurs caractéristiques physiques. De plus, les embâcles sont beaucoup plus sensibles aux changements de régime des cours d'eaux que les crues en eau libre, ce qui ajoute à la difficulté de l'analyse de ces phénomènes. L'embâcle survient lorsque la glace mise en mouvement (débâcle) rencontre un obstacle ou une restriction de la section d'écoulement et s'accumule au point de bloquer significativement l'écoulement du cours d'eau. Les lieux où l'on observe des variations importantes de la pente du cours d'eau, particulièrement un redressement de celle-ci, sont les plus propices à la formation d'embâcles. Il est important de noter que l'analyse de fréquence des crues dues aux embâcles ne peut être dissociée de celles en eau libre. En effet, malgré que celles-ci ne soient pas homogènes en raison de la nature différente des phénomènes en cause, elles devraient être combinées car une distribution mixte est nécessaire pour délimiter le périmètre de protection (Rousselle, 1990).

La problématique du manque de données historiques peut être résolue de différentes façons mais demande généralement des campagnes de terrain souvent coûteuses. Deux types de sources possibles de données sont disponibles, les sources environnementales et les sources publiques. Les sources environnementales comprennent, entre autres, les cicatrices sur les arbres, les lignes de démarcation des zones de végétation, les déplacements de matériaux sur les berges, le pavage du gravier et les crêtes de matériaux de rivage créées par l'action des glaces. Les sources publiques sont surtout constituées des témoignages des riverains, des archives existantes de même que les données des stations météorologiques (Rousselle S., 1990).

2.3. Vulnérabilité (potentiel de dommage)

2.3.1. Typologie des dommages

Le Tableau 1 présente deux formes de catégorisation des types de dommages, l'une plus théorique par Grigg & Helweg (1975) et l'autre plus descriptive par Leclerc (2000).

Tableau 1 – Typologie des dommages

Type de dommage	Définition
Théorique	Auteur: Grigg et Helweg (1975)
Dommages directs Souvent divisés en dommages : <ul style="list-style-type: none"> • à la bâtisse • au contenu de la bâtisse 	Dommages aux structures, infrastructures et immeubles privés ou publics; certains sont facilement monnayables comme les infrastructures et les résidences alors que d'autres le sont beaucoup plus difficilement comme ceux des secteurs commerciaux ou industriels.
Dommages indirects	Dommages généralement économiques résultant de l'inondation. Les exemples classiques sont la perte de roulement des commerces et industries ou encore les coûts des secours, des détournements routiers et ferroviaires, des délais et autres phénomènes causés par la crue.
Dommages secondaires	Dommages surtout économiques que subissent ceux qui ne sont pas directement inondés. Par exemple, les pertes d'approvisionnements ou d'achalandage par les commerces et industries.
Dommages intangibles	Dommages environnementaux, sociaux, esthétiques. Ils comprennent les dommages qui peuvent être réels et importants mais très difficilement quantifiables en argent.
Dommages d'incertitude	Dommages liés à l'incertitude des victimes quant au moment et à la probabilité de la prochaine inondation. Se calcule par le montant que les propriétaires seraient prêts à déboursier pour être délivrés du problème. La perception joue un rôle.
Descriptif	Auteur : Leclerc (2000)
Dommages personnels	Vie humaine, santé, stress. Difficile à évaluer.
Dommages physiques	Dommages aux propriétés, aux infrastructures ou à la nature. Sauf pour la nature, ils sont relativement faciles à monnayer.
Interventions physiques ou non	Exécution des plans d'urgences, alerte précoce, surveillance, études, coordination, soutien psychologique. Généralement facilement monnayables.
Inconvénients	Évacuations, pertes de jouissance des biens, relocalisations temporaires.
Indirects	Pertes de production des entreprises.

La plupart des auteurs (Grigg & Helweg, 1975; Pluram inc., 1983; El-Jabi *et al.*, 1981; Leclerc, 2000) utilisent les mêmes notions de typologie des dommages en les insérant

dans deux catégories principales, les dommages directs incluant surtout les pertes matérielles et les dommages indirects incluant les autres inconvénients et pertes. Les différences surviennent surtout au niveau des termes et du degré de détail employé par chacun d'eux selon leurs besoins. En effet, certains se contentent de distinguer les dommages matériels directement liés à l'inondation des dommages indirects qui en découlent, alors que d'autres apportent des définitions beaucoup plus détaillées des dommages indirects possibles lors d'une inondation. El-Jabi (1981) et le US Army Corps of Engineers (USACE) (1996) utilisent plutôt les termes *dommages physiques*, correspondant aux dommages directs et *dommages non-physiques primaires* (« Income costs » pour USACE) ou *secondaires* (« Emergency Costs » pour USACE). Les dommages non-physiques primaires correspondent grossièrement aux dommages indirects et secondaires du Tableau 1 alors que les dommages non-physiques secondaires correspondent « à la valeur des pertes évaluées par les mesures de prévention mises sur pied en vue de limiter les dommages causés par la crue. » (El-Jabi & al, 1981).

2.3.2. Méthodes d'estimation des dommages

À ce jour, les méthodes d'estimation des dommages sont surtout axées sur les dommages directs ou physiques. Ceci est dû au fait que le calcul des autres types de dommages implique souvent des éléments qui sont difficiles, voire impossibles, à monnayer d'une manière précise. Il existe une multitude de méthodes pour obtenir une estimation des dommages directs et chaque expert ou organisme en utilise une ou quelques unes qui semblent appropriées à leurs travaux. Le développement de modèles théoriques non-biaisés pour l'estimation des dommages d'inondation a fait l'objet de plusieurs travaux de recherche dans les dernières années (Booy et Lye, 1989 ; Beard, 1997 ; Goldman, 1997 ; Stedinger, 1997). 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, 1988; El-Jabi et Rousselle, 1987; Ouarda *et al.*, 1995). On présente ici les méthodes qui représentent le mieux les différentes approches.

2.3.2.1. Méthode linéaire agrégée

C'est une méthode qui consiste en une équation combinant divers facteurs menant à une estimation des coûts des dommages pour une inondation spécifique (Grigg et Helweg, 1975).

$$C_d = K_d * U * M_s * H * A \quad [2]$$

C_d = coût des dommages pour une inondation spécifique;

K_d = dommage par pied de profondeur d'inondation par dollar de la valeur de la structure sur le marché;

U = proportion de la plaine d'inondation comportant un développement urbain;

M_s = valeur sur le marché de la structure inondée en dollars par acre développé;

H = profondeur moyenne de l'eau sur la surface inondée en pieds;

A = superficie inondée en acres.

2.3.2.2. Méthode historique

Cette méthode consiste à mettre en relation sur une courbe, les dommages résultant des crues dont on a les données historiques et les hauteurs d'eau qui ont causé ces dommages. Bien sûr, il faut faire une correction de la valeur pour tenir compte des nouvelles constructions et de l'inflation (Grigg et Helweg, 1975).

2.3.2.3. Méthode niveau-dommage (trad. de 'stage-damage')

Généralement la plus utilisée, cette méthode permet d'estimer les dommages annuels moyens d'inondation. Elle permet, notamment, de tenir compte des dommages aux routes et autres infrastructures, bien que ceux-ci soient souvent négligeables par rapport à l'ensemble. Cette méthode nécessite quatre intrants de bases qui sont par la suite agrégés en une relation dommage-fréquence. Cette relation permet d'estimer les pertes moyennes annuelles dues aux inondations. Cette méthode est représentée à la figure 3 suivante (Grigg & Helweg 1975).

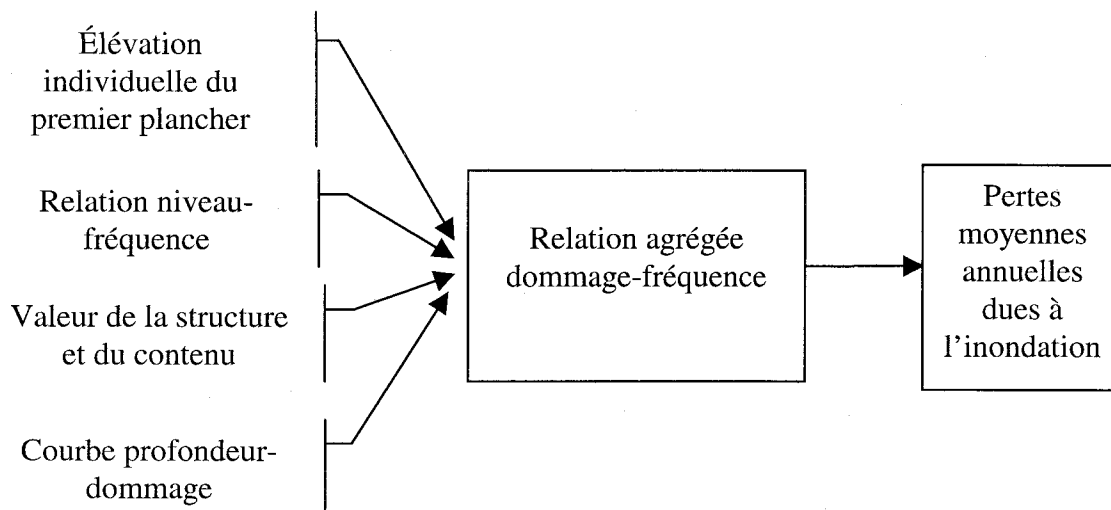


Figure 3 – Méthode niveau-dommage

2.3.2.4. Méthode du US. Army Corps. of Engineers (USACE)

La méthode d'estimation des dommages de l'USACE (1996) s'inscrit dans le cadre de leur procédure plus générale d'évaluation des bénéfices d'interventions en plaine inondable. Deux méthodes s'appliquent selon que l'on veuille déterminer les dommages au patrimoine existant dus aux inondations ou les dommages futurs et potentiels. Dans le premiers cas, une méthode historique semblable à celle décrite précédemment est utilisée. L'USACE (1996) définit les dommages futurs dus aux inondations comme étant ceux qui seraient causés aux activités économiques dans le cas où aucune intervention ne serait entreprise pour diminuer les risques d'inondation. Les dommages en question ne concernant pas seulement ceux assumés par les occupants de la plaine inondable mais aussi ceux pris en charge par les gouvernements (pertes de taxes, dédommagements, coûts d'intervention), les assureurs et les autres citoyens des communautés affectées.

L'estimation des dommages futurs requiert la prise en compte de plusieurs facteurs qui peuvent changer au cours des années. En effet, il peut survenir des changements hydrologiques qu'on ne peut pas toujours considérer puisqu'ils sont très difficiles voire impossibles à prévoir, notamment les changements climatiques. Les facteurs de changements économiques éventuels sont les principaux éléments à prendre en compte

dans les études coûts-bénéfices. Les facteurs les plus intéressants à considérer dans le cadre de nos travaux sont les prévisions de l'évolution des dommages physiques, non-physiques primaires (perte de revenu) et non-physiques secondaires (coûts d'urgence). L'USACE (1996) affirme que la projection des dommages non-physiques primaires doit se faire sur la même base que la projection de l'utilisation du sol; elle est par contre problématique à obtenir car plusieurs facteurs économiques locaux viennent brouiller les cartes. Les dommages non-physiques secondaires ne doivent pas être projetés comme une fonction directe des dommages physiques puisqu'ils sont très variés (nourriture et logement d'urgence, policiers et pompiers, équipements etc).

La projection dans le futur des dommages physiques constitue la grande partie de l'estimation des dommages. Elle s'effectue en trois étapes :

- 1- Déterminer le nombre et la taille des unités physiques qui sont déjà ou qui s'établiront éventuellement dans la plaine inondable et cela par zone de risque (voir section 2.4.1) et par type d'activité économique.
- 2- Déterminer la valeur potentielle de ces unités physiques en considérant les expansions et constructions éventuelles. Pour cela, la procédure comporte quatre sous-étapes :
 - a) Évaluer la valeur future des structures actuelles en se basant sur le taux de croissance régional du revenu per capita;
 - b) Faire de même avec les nouvelles constructions résidentielles;
 - c) Traduire en dommages futurs d'inondations. Pour le contenu, utiliser le taux de croissance de la valeur du contenu des résidences susceptibles d'être inondées;
 - d) La valeur du contenu ne doit jamais excéder 75 % de la valeur de la structure, sauf exception. De plus, l'évaluation de la croissance du contenu se limite à une période maximale de 50 ans;

- 3- Déterminer la susceptibilité des unités aux dommages. Plusieurs facteurs peuvent faire changer celle-ci comme les caractéristiques du cours d'eau, les types d'activités, le développement vertical, la localisation dans la plaine d'inondation, la nature des mesures de protection face aux inondations, le type de matériaux constituant les structures, et enfin la réponse des gens face à l'inondation.

Enfin, l'USACE (1996) mentionne quelques autres coûts reliés aux inondations qui ne sont pas compris dans les pertes directement liées à celles-ci. Il est d'abord fait état des coûts de la protection contre les inondations qui varient d'un milieu à l'autre. Il y a aussi, dans le cas des États-Unis, le coût de leur assurance nationale face aux inondations (« National Flood Insurance ») (voir section 2.4.1). Finalement, les coûts provenant de la perte d'efficacité de certaines structures causée par les inondations ne doivent pas être oubliés.

2.3.2.5. Méthode DOMINO

La méthode d'estimation des dommages utilisées par le modèle DOMINO (Breton et Marche, 1999) comporte trois facteurs : la valeur des bâtiments, la valeur de leur contenu et les pertes de vie potentielles. Cette estimation se base sur l'évaluation foncière du bâtiment, sur le nombre d'occupants et sur les conditions d'inondation. Pour ce faire, les bâtiments touchés doivent être identifiés et les conditions locales déterminées. En fait, l'estimation des dommages dans le cadre du modèle DOMINO se fait à partir du rôle d'évaluation municipal. Les facteurs sont par la suite pondérés selon les normes de l'American Society of Civil Engineering (1988) et compilés afin d'obtenir des résultats indiquant les dommages « totaux » pour un secteur. Bien sûr, ces résultats peuvent être représentés sous forme de cartes.

2.3.2.6. Méthode d'estimation et d'analyse des dommages du Centre de Développement Technologique (CDT)

Méthode d'estimation

Les méthodes proposées par le CDT (École Polytechnique, El-Jabi *et al.*, 1981) se basent sur trois paramètres affectant les dommages. Elles utilisent d'abord les paramètres hydrologiques directement liés à l'occurrence des crues. Ensuite, elles prennent en compte les paramètres d'ajustement humain. Ces derniers comprennent l'influence du délai d'avertissement. À ce propos, il est établi que les dommages sont inversement proportionnels aux mesures de prévention prises dans la plaine inondable. Enfin, elles indiquent les paramètres d'occupation du sol qui comprennent, le type et la valeur des propriétés affectées de même que l'emplacement et la valeur du matériel (contenu) endommagé. À partir de ces paramètres, le CDT (El-Jabi *et al.*, 1981) définit trois méthodes d'estimation selon la conception de la relation crue-dommage que l'on désire utiliser. Notons que les trois méthodes présentées sont toutes dépendantes d'une enquête précise sur le terrain.

Une fois que les dommages ont été estimés, la méthode consiste à établir la fonction de dommage globale sous la forme d'une loi de Gompertz et cela « [...] en fonction de la hauteur de submersion, de la valeur du stock de capital physique et de la fonction de productivité totale; on suppose que les dommages physiques et non physiques sont invariants en fonction de la date et de la durée d'apparition des eaux extrêmes d'une part, et d'autre part la fonction de productivité totale $g(k)$ est considérée égale à l'unité par manque de renseignements nécessaires dans l'enquête. » (El-Jabi *et al.*, 1981, p. 22). Ceci a pour résultat l'obtention de dommages globaux unitaires (dollars / unité). À la différence de la méthode de l'INRS-ETE/MEF (voir section suivante 2.3.2.7), la méthode du CDT établit sa fonction non pas selon le type de résidence mais plutôt selon le type de dommage (physiques, non-physiques primaires, etc...) (El-Jabi *et al.*, 1981).

Méthode empirique

Cette méthode, assimilable à l'approche historique de Grigg et Helweg (1975), se base sur la relation entre les caractéristiques hydrologiques et les dommages historiques pour différentes périodes de retour. Sa précision dépend de la qualité des données. Elle est valable dans la même région que l'enquête sur le terrain et ne peut donc pas être généralisée de façon spatiale ou temporelle. On peut utiliser des courbes par secteur d'activité mais en respectant les limites spatio-temporelles de validité (El-Jabi *et al.*, 1981).

Méthode de simulation

Elle consiste à faire des simulations de crue et de dommage en plaine inondable par secteur économique. Elle permet d'établir une fonction de transfert sectorielle « crue-dommage » qui peut être généralisée dans le temps et l'espace. Elle peut être ajustée à l'évolution économique et hydrologique. Elle se prête aussi à une démarche de régionalisation (El-Jabi *et al.*, 1981).

Méthode de corrélation

Elle utilise la relation estimant directement le dommage causé à une propriété en fonction de la hauteur d'inondation et cela par une formule agrégée. Cette formule provient de l'analyse de corrélation entre les dommages estimés à partir d'une enquête sur le terrain et les caractéristiques hydrologiques et économiques des plaines inondables. Elle représente surtout une estimation des dommages annuels pour une région donnée (El-Jabi *et al.*, 1981).

Méthode d'analyse et de cartographie des dommages

La première étape de cette analyse des dommages d'inondations consiste à décomposer les plaines inondables en cellules hydro-économiques dont les limites sont les cotes d'inondation de périodes de retour 20 et 100 ans. Par la suite, on comptabilise trois gammes de dommages : le dommage maximum, le dommage moyen et le dommage

correspondant au centroïde de la zone endommageable. Le dommage maximum correspond à la pire situation pour toutes les unités de la cellule. Le dommage moyen répond au fait qu'il est impossible que toutes les unités soient situées au même niveau d'inondation maximum dans la même cellule hydro-économique puisque celles-ci varieront selon la position de l'unité par rapport aux limites que sont les cotes d'inondation. Idéalement, il faudrait donc considérer la cote de chaque résidence, ce qui selon le CTD (El-Jabi *et al.*, 1981) est pratiquement impossible dans la réalité. On se contente donc d'une estimation globale au niveau de la cellule (voir les détails des équations utilisées dans El-Jabi *et al.*, 1981 p. 25). Enfin, le dommage correspondant au centroïde de la cellule hydro-économique consiste simplement en une agrégation de toutes les unités économiques à la cote du centroïde, et cela pour les deux périodes de récurrence ciblées (El-Jabi *et al.*, 1981).

Les gros handicaps de la méthode du CDT sont que l'estimation des dommages se fait par zone et qu'elle se limite à la considération de seulement deux périodes de retour. Il en résulte que cette méthode manque de précision et est difficilement applicable dans le cadre d'un plan d'aménagement.

2.3.2.7. Méthode INRS-ETE/MEF

Cette méthode se caractérise par une définition individualisée et géoréférencée du dommage à chaque résidence. Elle a été développée et validée à partir des dommages aux résidences compensés suite aux crues du Saguenay en 1996 (CSTGB, 1996). Suite à cet événement, l'INRS-ETE a été sollicité par le Ministère de l'Environnement du Québec pour mettre au point une méthode de prédiction des dommages physiques aux résidences (excluant les meubles) prenant appui sur les données des indemnisations accordées aux sinistrés de la rivière Chicoutimi et sur les paramètres physiques tels, principalement, la hauteur locale de submersion au-dessus du premier plancher du bâtiment (Leclerc *et al.*, 1997). Cette méthode est donc basée sur cette profondeur (hauteur) locale de submersion laquelle est déterminée à l'aide du modèle hydrodynamique Modeleur-Hydrosim (Heniche *et al.*, 1999a,b) ou de toute autre approche établissant la relation niveau-débit. La Figure 4 illustre la notion de submersion utilisée dans cette étude.

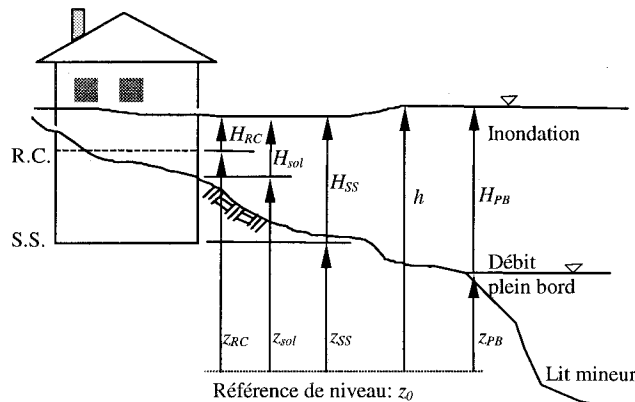


Figure 4 – Notion de hauteur (profondeur) de submersion

Dans la méthode INRS-ETE/MEF, le dommage associé à chaque probabilité d'aléa est fonction de la valeur de remplacement des résidences et de la hauteur de submersion. On peut exprimer cette fonction par le modèle suivant :

$$D_i = f(K, A_i) \quad [3]$$

où \mathbf{K} est un vecteur décrivant un bâtiment individuel ou l'ensemble du capital physique (valeur foncière associée au bâtiment en l'occurrence), et \mathbf{A}_i est un autre vecteur dont les éléments décrivent les caractéristiques de l'aléa i . Cette fonction peut être étalonnée pour une région et pour un secteur économique donné, 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). Dans la méthode INRS-ETE, la fonction est applicable aux habitations individuelles pour lesquelles elle prédit le dommage moyen annuel. La hauteur de submersion des bâtiments H_i est notamment 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). En plus de la valeur de la propriété (V) et de l'élévation du premier plancher, les

caractéristiques K du bâtiment sont le nombre d'étages et le type de construction (Grigg et Helweg, 1975).

Suite à une enquête sur le terrain afin de recueillir les valeurs de remplacement (évaluations municipales) et les hauteurs de submersion H (par des mesures de terrain et/ou des simulations hydrodynamiques), les résidences endommagées du Saguenay et ayant fait l'objet d'indemnisation ont été classées ainsi :

- Valeur de plus de 50 000 \$CAD avec sous-sol;
- Valeur de plus de 50 000 \$CAD sans sous-sol;
- Valeur de moins de 50 000 \$CAD avec sous-sol;
- Valeur de moins de 50 000 \$CAD sans sous-sol;

Suite aux traitements statistiques, 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 au niveau de ce bâtiment. La loi de Gompertz utilisée est illustrée par l'équation suivante :

$$D = \frac{K[e^{(-\beta H)^{\alpha}} - 1]}{(e^{\alpha} - 1)} \quad [4]$$

où

D : dommage résidentiel au bâtiment lié à un aléa;

K : valeur de remplacement de la résidence (\$);

H : hauteur de submersion (m) par rapport au premier plancher du bâtiment;

β : coefficient calibré;

α : coefficient calibré;

Les coefficients α et β paramétrisent la loi de Gompertz et dépendent des classes définies plus haut. La hauteur de submersion est la différence entre la hauteur du premier plancher et le niveau d'eau maximum de la crue. La hauteur du premier plancher est obtenue par mesure directe, ce qui peut devenir fastidieux, ou plus simplement en apportant une

correction systématique et non-biaisée au champ de topographie. Les valeurs de correction qui sont utilisées sont +0,3m pour les résidences sans sous-sol et -1,6m pour les résidences avec sous-sol. Elles proviennent des résultats de la campagne de mesure des hauteurs des premiers planchers des résidences du Saguenay qui ont révélé de plus que l'immunisation de ces résidences (imperméabilisation des sous-sols, surélévation des sous-sols, etc) était rare sinon absente (Leclerc, 2002. comm. personnelle). À partir de ces données, des calculs statistiques ont été réalisés afin de déterminer les lois de comportement du taux d'endommagement (dommage unitaire) en fonction de la hauteur de submersion, et cela pour chaque type de résidence. Ces lois de comportement sont représentées à la Figure 5 sous forme de courbes en S (loi de Gompertz) où la hauteur de submersion est en abscisse et les dommages unitaires en ordonnée.

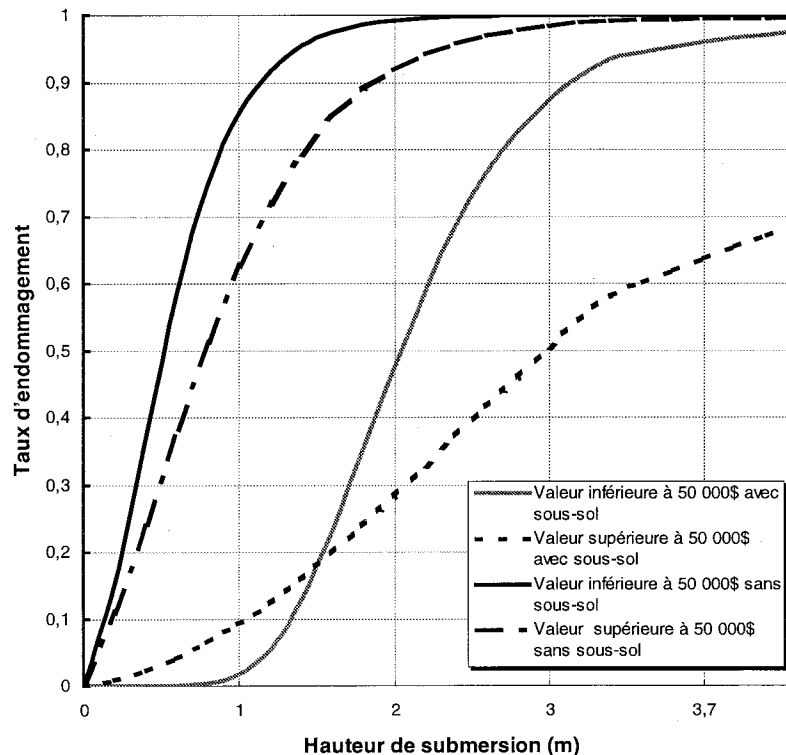


Figure 5 – Lois de comportement des dommages (d'après Leclerc *et al*, 1997)

C'est à partir de ces lois de comportement qu'il est possible de construire une méthode de cartographie unitaire des dommages résidentiels.

2.4. Les méthodes de cartographie

2.4.1. U.S.A.

Le programme national d'assurance contre les inondations (FEMA, site web)

La problématique des inondations aux États-Unis est généralement régie par la « Federal Emergency Management Agency » (FEMA) dans le cadre du « National Flood Insurance Program » (NFIP). Ce programme se base sur une entente établie entre les communautés locales (états, comtés, villes ou toutes autres formes de gouvernement local) et le gouvernement fédéral. Cette entente spécifie que les communautés doivent prendre des mesures d'aménagement à l'égard des plaines inondables afin de réduire les risques d'inondations pour les nouvelles constructions localisées dans des zones cartographiées spécifiquement désignées. Ces zones sont nommées « Special Flood Hazard Areas » (SFHA). Lorsqu'une telle entente est réalisée, le gouvernement fédéral dote ces communautés d'une assurance les protégeant financièrement contre les pertes dues aux inondations. Sans le NFIP, 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 à ces aléas voire d'éliminer les développements dans les secteurs risqués. Notons que ce programme implique toutes les bâtisses dans les SFHA, peu importe les améliorations apportées à celles-ci (rehaussement, imperméabilisation, etc.) (FEMA, 2000).

La cartographie des SFHA est réalisée par le US. Army Corps of Engineers (USACE). Une SFHA est en fait la partie de la plaine inondable d'une communauté qui a, au moins 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 SHFA en leur donnant une teinte gris foncé et sert surtout dans les cas peu documentés où l'on doit intervenir rapidement. La seconde, plus précise, ajoute à la FHBM des élévations de base des inondations et délimite les différentes zones d'assurance du risque. 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 retour 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 et la présence de l'élévation de base de l'inondation ou la profondeur moyenne de submersion (FEMA, 2000).

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 la prise de mesures de protection contre les inondations dans les zones de récurrence de 100 ans.

2.4.2. Europe

2.4.2.1. Méthode classique

De façon traditionnelle, la gestion des risques en Europe est beaucoup plus axée sur l'aléa que sur la vulnérabilité. En effet, en raison d'une histoire beaucoup plus ancienne, les plaines inondables sont beaucoup plus habitées et utilisées qu'en Amérique ce qui rend beaucoup plus difficile et coûteux une intervention sur la vulnérabilité. Ainsi, la tendance

est à la construction d'ouvrages ou d'aménagements relativement lourds de contrôle des crues ou du niveau d'eau (Givone et Gilard, 1997).

En général, les méthodes actuelles consistent à établir une courbe de dommage reliant la submersion et le coût des dommages. Cela donne évidemment des données pour les endroits où les mesures de dommages existent. Les méthodes classiques de cartographie se basent généralement sur une traduction des facteurs hydrologiques en termes socio-économiques afin d'obtenir une évaluation du risque en unités monétaires. Ainsi, le paramètre probabiliste de l'aléa est associé à la courbe de dommages afin d'obtenir le coût annuel moyen des dégâts. Gilard et Gendreau (1998) affirment que l'inconvénient majeur de cette méthode est de donner une mesure positive du risque, ce qui amène une tendance à vouloir minimiser celui-ci en s'approchant du risque 0, pourtant inexistant de par sa nature même. Cette propension à la minimisation conduirait à la mise en place de mesures de protection contre les crues de périodes de retour de plus en plus courtes, ce qui ne ferait que perpétuer le cercle vicieux amené par la fausse perception de sécurité qui découle de l'instauration de ces mesures. Ainsi, au lieu de faire accepter une certaine portion du risque par les citoyens, les autorités ont tendance à viser le risque nul, généralement par la construction d'ouvrages, ce qui entraîne souvent des coûts importants. (Givone et Gilard, 1997).

2.4.2.2. Méthode INONDABILITÉ (CÉMAGREF)

Une description détaillée de la méthode INONDABILITÉ du Cemagref est donnée dans la section 10.3.2.4. du Chapitre 10 de ce document.

2.4.3. La Convention Canada-Québec et le PDCC

La description suivante de la méthode de cartographie des risques d'inondation actuellement en vigueur au Québec est tirée directement de l'article du Chapitre 10.

La méthode de cartographie du risque d'inondation utilisée actuellement au Québec a servi jusqu'en 1996 dans le cadre d'un programme conjoint fédéral-provincial appelé Convention Canada-Québec, et elle a été reprise depuis peu par le Programme de Détermination des Cotes de Crue (PDCC, 2001) opéré exclusivement par le ministère de l'Environnement du Québec. Cette technique de représentation du risque ne tient pas compte du volet vulnérabilité et seules les limites d'inondation correspondant à des probabilités normées sont indiquées. Ainsi, 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 possibilité 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. Bouillon fait aussi remarquer qu'« il y a également certains éléments qui sont soustraits d'office de convention Canada-Québec. Parmi ceux-ci, il y a certains éléments publics (quais, aides à la navigation, aqueducs, égouts, puits et fosses septiques étanches notamment pour des bâtiments existants). Il est aussi possible, là où des réseaux d'aqueducs et d'égouts existent à une certaine date (parfois plus de dix ans après que les zones inondables n'aient été délimitées) de construire dans les zones de grands courants. Il est même possible de les reconstruire dans des secteurs non desservis par les réseaux publics. Le but poursuivi par la soustraction d'office de ces éléments à la convention Canada-Québec est de permettre aux municipalités de rentabiliser les équipements et infrastructures municipales. » (Bouillon A., 2002, comm. Personnelle).

La base de cette méthode est donc 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 néglige ainsi tout l'aspect vulnérabilité qui est pourtant une des variables de base de la définition du risque.

Il s'agit donc à proprement parler d'une méthode de cartographie des aléas et non de risque comme sa désignation l'indique. Par conséquent, elle ne permet pas de quantifier directement le risque quoi qu'elle s'en approche d'assez près. Enfin, les multiples exclusions et soustractions d'office présentes dans la loi se rapportant à ces cartes limitent grandement la portée de celles-ci.

3. PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

3.1. Problématique

Comme nous venons de le voir, la méthode de cartographie du risque d'inondation servant de base à la législation en cours actuellement au Québec (les cartes « 20-100 ans » de la Convention Canada-Québec ou du PDCC) ne permet que de délimiter les zones de construction généralement interdites (période de retour 20 ans) ou permises avec immunisation (période de retour 100 ans). De plus, elle ne se base que sur la probabilité de certains événements jugés problématiques. Elle ne considère aucunement les caractéristiques locales des résidences présentes et néglige ainsi tout l'aspect vulnérabilité à la base même de la définition du risque. Par conséquent, elle ne conduit pas à une quantification concrète du risque et à une évaluation économique lors de la réalisation des plans d'aménagement du territoire ou d'urbanisme et/ou de construction autorisée. Telles qu'elles se présentent actuellement, ces cartes se révèlent surtout utiles pour des fins de prévention.

Les autres méthodes actuellement utilisées dans le monde ne permettent pas non plus une quantification précise du risque d'inondation au plan économique. 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 (Cartes d'assurabilité du FEMA, 2001). Du côté européen, la méthode INONDABILITÉ permet une certaine catégorisation du risque mais ne donne pas d'évaluation des coûts. L'évaluation de l'aspect vulnérabilité se base sur une négociation de la valeur des dommages potentiels avec les instances locales. Ainsi, la valeur donnée à la vulnérabilité peut très bien changer selon les lieux et perd ainsi son aspect homogène et générique si important pour les plans d'aménagement plus globaux. Cette méthode est donc avant tout conçue pour fixer des objectifs de protection contre des aléas de probabilité donnée (Gilard et Gendreau, 1998). À notre connaissance, aucune méthode ne permet de cartographier le risque moyen annuel de dommages directs en tous points de

l'espace et en tenant compte à la fois des probabilités des aléas et de la vulnérabilité du terrain en zone inondable.

Pour cartographier les conséquences potentielles des inondations, il ne suffit pas de partir des dommages connus pour quelques événements 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 et parfois, la non-stationnarité des paramètres statistiques des crues compliquent singulièrement l'évaluation du dommage moyen annuel infligé aux bâtiments.

Un retour à l'utilisation de la notion de *risque* combinant une évaluation de la *vulnérabilité* (pris 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 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. financière) pose difficulté, le problème est abordé en valeur relative unitaire plutôt qu'absolue. Le risque sera donc exprimé sous la forme d'un pourcentage de destruction sur une période donnée. Une telle

variable (pourcentage de destruction moyen annuel par exemple) peut être cartographiée en posant certaines hypothèses, notamment à l'égard de l'homogénéité du mode d'implantation sur 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.

3.2. Objectifs

L'objectif de cette recherche est de développer et tester une méthode de cartographie du risque unitaire d'inondation à l'eau libre. Ce risque sera applicable uniquement aux dommages directs aux résidences et permettra une évaluation aussi précise que possible des coûts associés. La méthode et les cartes en résultant doivent répondre aux critères suivants :

- Les cartes doivent être valides pour les aménagements actuels et potentiels;
- Les cartes doivent présenter des résultats distribués spatialement, i.e., en tous points du territoire étudié;
- Les cartes doivent être facile d'utilisation, de consultation et d'application tout en gardant un maximum de précision;
- La mise à jour de ces cartes, si nécessaire, doit être simple;
- La méthode de cartographie doit être applicable à un large éventail de types de résidence;

4. RÉGION D'ÉTUDE

La rivière Montmorency se situe à la limite est 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 (voir Figure 6). Il est bordé en amont par le secteur de la rue Bocage et en aval par les limites des municipalités de Beauport (Québec depuis la fusion en 2002) 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 ont été concentrées dans un segment appelé « secteur des Îlets » dont la localisation est présentée à la Figure 6. Ce segment du cours d'eau a déjà fait l'objet de simulations hydrodynamiques (Heniche *et al*, 1999c; Leclerc *et al*, 1998; Doyon, 2001).

Les résidents du secteur subissent, depuis de nombreuses années, des inconvénients occasionnels reliés aux crues de la rivière (isolement temporaire, évacuation préventive, inondation, érosion). Le secteur des Îlets est identifié depuis peu comme zone inondable (Boucher et Picard, 1994; Communauté urbaine de Québec (CUQ), 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 surtout par l'isolement routier du secteur, mais assez peu par les dommages d'inondation à cause de pratiques d'immunisation apparemment assez efficaces. Les inondations, à cet endroit, se produisent habituellement en eau libre quoique des embâcles puissent à l'occasion affecter le secteur (Leclerc *et al*, 2001).

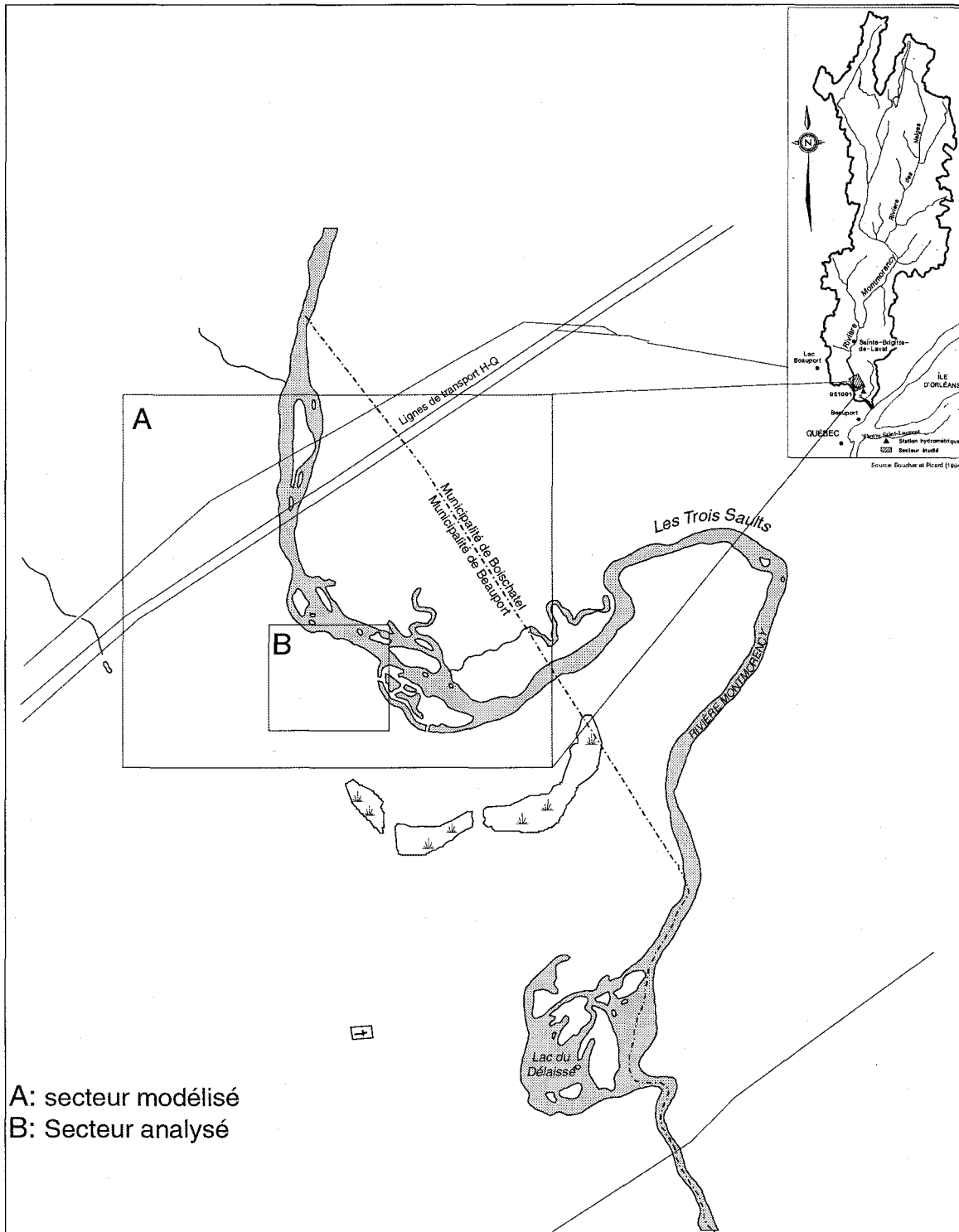


Figure 6 – Carte de localisation du Secteur des Îlets (B).

5. PRÉSENTATION DE LA MÉTHODE

5.1. Les bases mathématiques

Les bases mathématiques de la méthode développée sont présentées dans la section 10.4.1. du Chapitre 10. Elles montrent, à partir des deux éléments formant la définition du risque, les étapes pour obtenir le risque unitaire distribué.

5.2. Les pré-requis

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

1. Un ou des outils de représentation spatiale de type S.I.G (Système d'Information Géographique) pour la modélisation spatiale des variables du terrain et des écoulements, ainsi que leur cartographie. Pour plus détails voir la section 10.4.2. du Chapitre 10;
2. Une carte numérique représentant le *modèle numérique d'élévation* du tronçon à une échelle permettant d'obtenir une précision suffisante dans la verticale (habituellement, à l'échelle 1:2000 ou mieux). Pour plus détails, voir la section 10.4.2. du Chapitre 10;
3. Un *modèle hydraulique* uni- ou bi-dimensionnel validé des écoulements dans le tronçon à l'étude; le degré de discrétisation dépend de la complexité morphologique et de la fiabilité recherchée à l'égard du résultat. Pour plus détails, voir la section 10.4.2. du Chapitre 10;
4. Une *relation fonctionnelle empirique du taux d'endommagement* lié à la submersion (et d'autres variables de l'écoulement, le cas échéant). Pour plus de détails, voir la section 2.3.2.7;
5. Les *paramètres statistiques* des crues à une échelle de temps appropriée à la dynamique des écoulements (débits horaires ou journaliers). Pour plus de détails, voir la section 10.4.2 du Chapitre 10.

5.3. Méthode de cartographie des risques unitaires d'endommagement (CRUE) dû aux inondations

Présentons les étapes successives de la méthode proposée, en signalant au passage les choix retenus pour l'application à la rivière Montmorency. Ces étapes sont représentées à la Figure 7 et seront commentées par la suite.

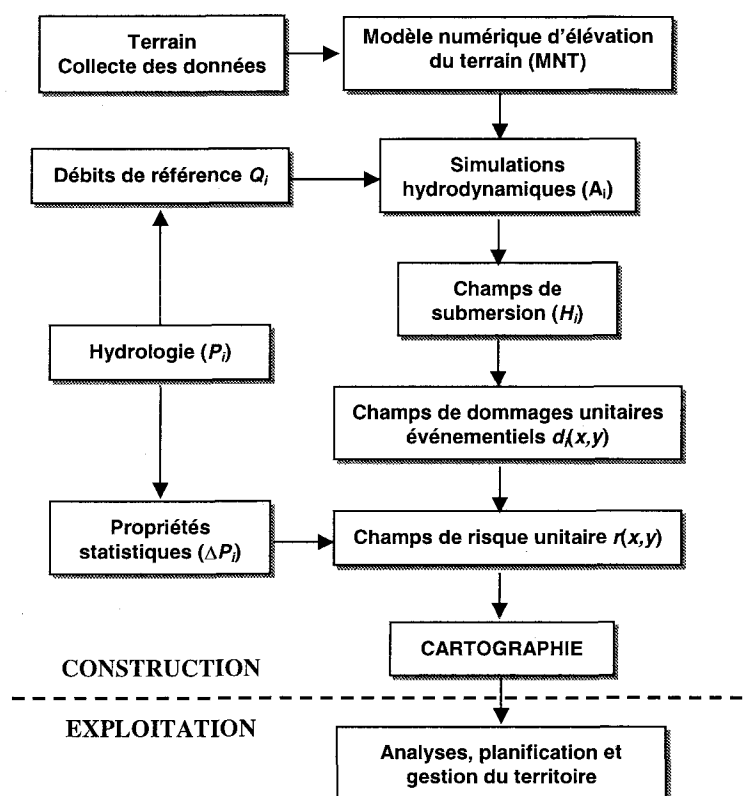


Figure 7 – Étapes de la méthode de cartographie des risques unitaires d'inondation.

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). Puisque c'est le cas dans cette étude, la cartographie du risque a d'abord été faite pour l'ensemble du secteur des Îlets. Dans un but de simplification des résultats, la zone de cartographie a ensuite été restreinte au domaine résidentiel (Figure 6). En effet, puisque l'ensemble des sujets de discussion portent sur l'interprétation du risque pour les résidences et sur une

- comparaison des cartes actuelles de risque régissant la construction résidentielle, il est apparu plus logique de se concentrer sur le secteur où il y a des résidences et où il y a encore un potentiel théorique de développement;
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. Les données peuvent provenir de différentes sources. Pour l'exemple d'application sur la rivière Montmorency, la photogrammétrie classique (plan géomatique de la Ville de Québec, anciennement 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 utilisées 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 présentation détaillée de l'approche de modélisation numérique de terrain dans le contexte des risques d'inondation); pour cette étude, c'est le logiciel MODELEUR qui a permis l'intégration des données (Heniche *et al*, 1999a,b);
 3. *Simulations hydrodynamiques* 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 Québec. Les statistiques ont été établies en tenant compte de la délocalisation du site en amont à la station (réduction de 6% du bassin versant) et en faisant usage expérimentalement de différentes méthodes dont celles du débit maximum annuel (DMA) horaire et de séries partielles (Leclerc *et al*, 1999c);
 4. *Calcul de la hauteur de submersion* $H_i(x,y)$ en soustrayant l'altitude corrigée (voir section 5.3) provenant du modèle de terrain du niveau d'eau résultant des i

simulations hydrodynamiques. La Figure 4 (page 20) illustre bien le concept à la base de cette soustraction.

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 (voir section 5.3). 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. Concrètement, le calcul de la distribution des dommages a été effectué pour chacun des niveaux d'eau correspondant aux périodes de retour retenues (1, 2, 5, 10, 25, 50 et 100 ans). Tous ces calculs peuvent s'effectuer naturellement dans le MODELEUR, ou autrement. Le programme informatique qui a servi au calcul de ces distributions de dommage est présenté en Appendice A;
6. *Calcul et cartographie du risque unitaire $r(x,y)$* (voir équation 5 dans la section 10.4.1. du chapitre 10) 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. Pour l'application à la rivière Montmorency, nous avons intégré le risque numériquement en utilisant la méthode des trapèzes. Ainsi, nous avons calculé les portions du risque se rapportant à chacune des périodes de retour (à l'exception du 1 an puisque le risque entre 0 et 1 an est considéré comme nul) et nous les avons ensuite additionnés pour obtenir le risque total pour l'ensemble des périodes de retour.
7. *Utilisation dans différents contextes d'analyse, de planification de l'aménagement du territoire ou de remédiation.* Les différentes possibilités d'utilisation seront présentées à la section suivante et en discussion.

6. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

6.1. Présentation de cartes de risque unitaire d'inondation à l'eau libre

Les cartes de la Figure 8 et de la Figure 9 ont été obtenues par la méthode présentée. Celles-ci recouvrent spécifiquement le secteur résidentiel des Îlets. Nous nous sommes limités à deux cas de figure seulement : ainsi, la première illustre le risque unitaire pour des résidences quelconques 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 également d'une valeur de plus de 50 000 \$CAD dont le premier plancher serait enfoui à 1,6 m sous le terrain. Les points noirs sur les cartes montrent les centres géométriques 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 à prime abord que les parties habitées de ce territoire subiront entre 1 et 5% de dommages moyens annuels directs par les crues à l'eau libre en l'absence de sous-sol (Figure 9) selon l'hypothèse d'exhaussement adoptée par rapport au terrain. Si les mêmes implantations résidentielles étaient pourvues d'un sous-sol habitable, plusieurs verraient leur dommages directs augmenter au-delà de 10%, voire 15% pour certaines (Figure 8). Cette simple constatation montre bien l'intérêt de telles cartes pour mettre en évidence les effets d'implantations inappropriées.

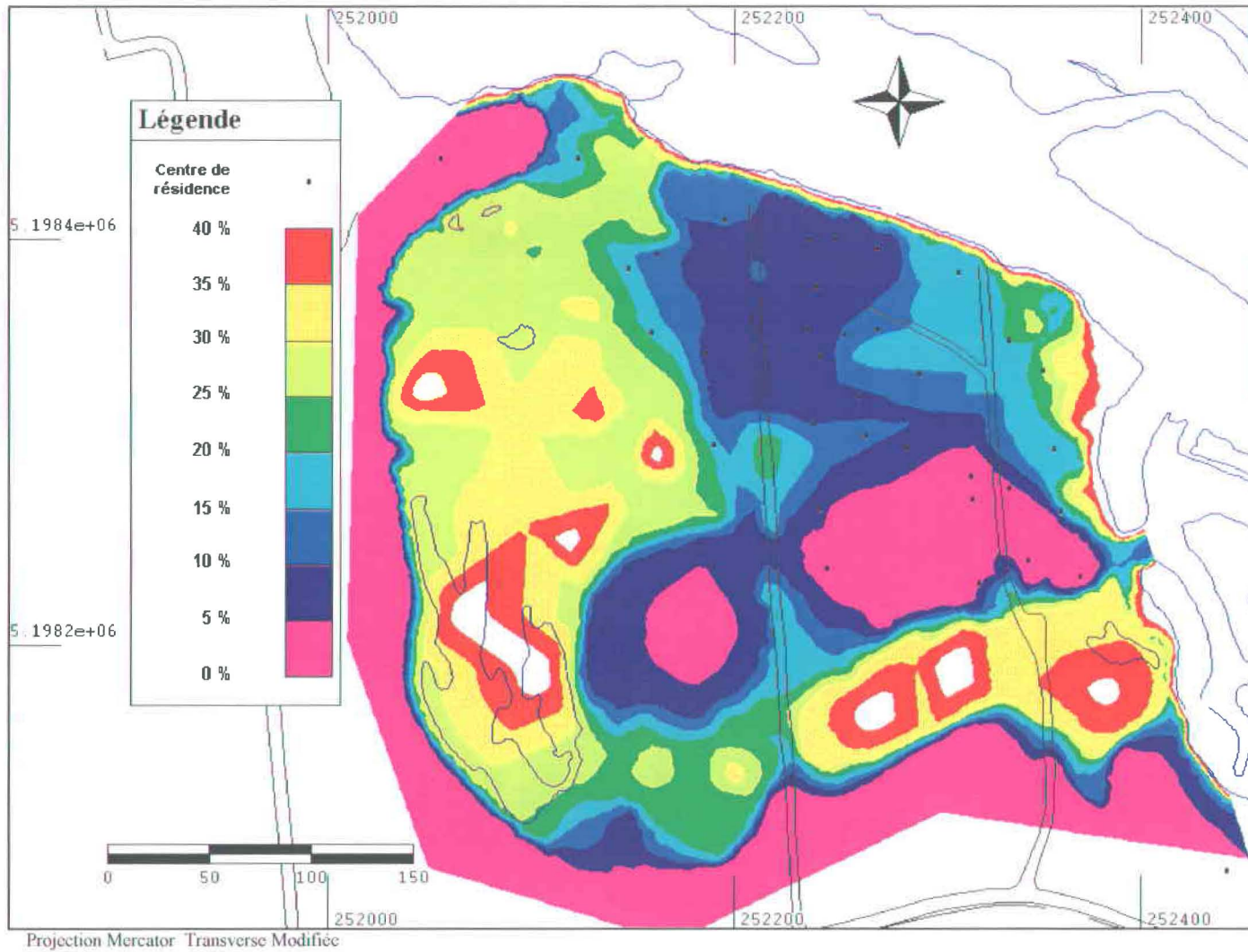


Figure 8 – Carte de risque unitaire d’inondation pour des résidences avec sous-sol d’une valeur supérieure à 50 000 \$.

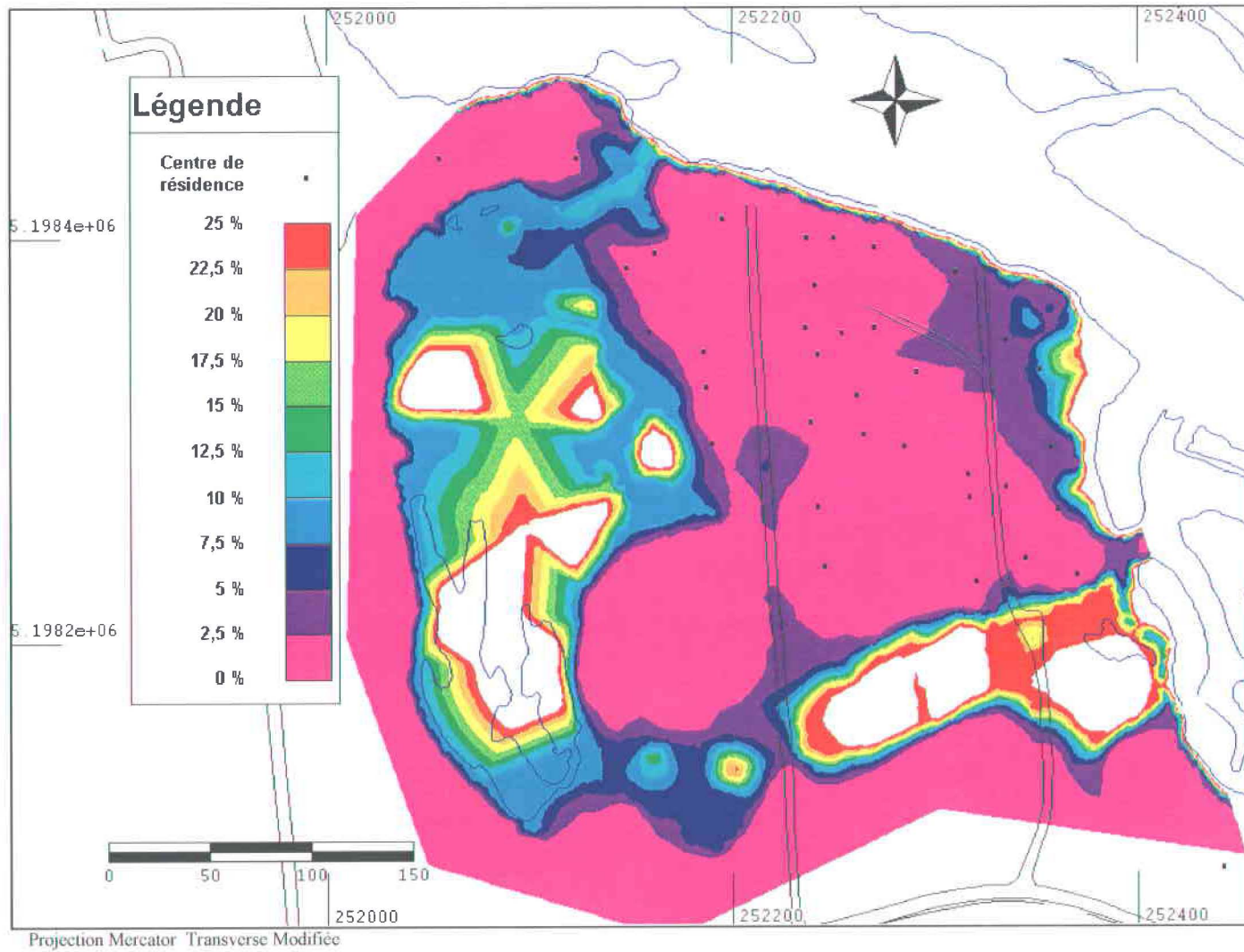


Figure 9 - Carte de risque unitaire d'inondation pour des résidences sans sous-sol d'une valeur supérieure à 50 000 \$.

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

6.2.1. Cartes actuelles

Il est vite apparu intéressant de comparer les cartes unitaires de risque (CRUE) à celles de la Convention Canada-Québec et à ses versions mises à jour récemment par la Communauté urbaine de Québec (CUQ, 2001) 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 des zones inondables telle que prévu dans la réglementation.

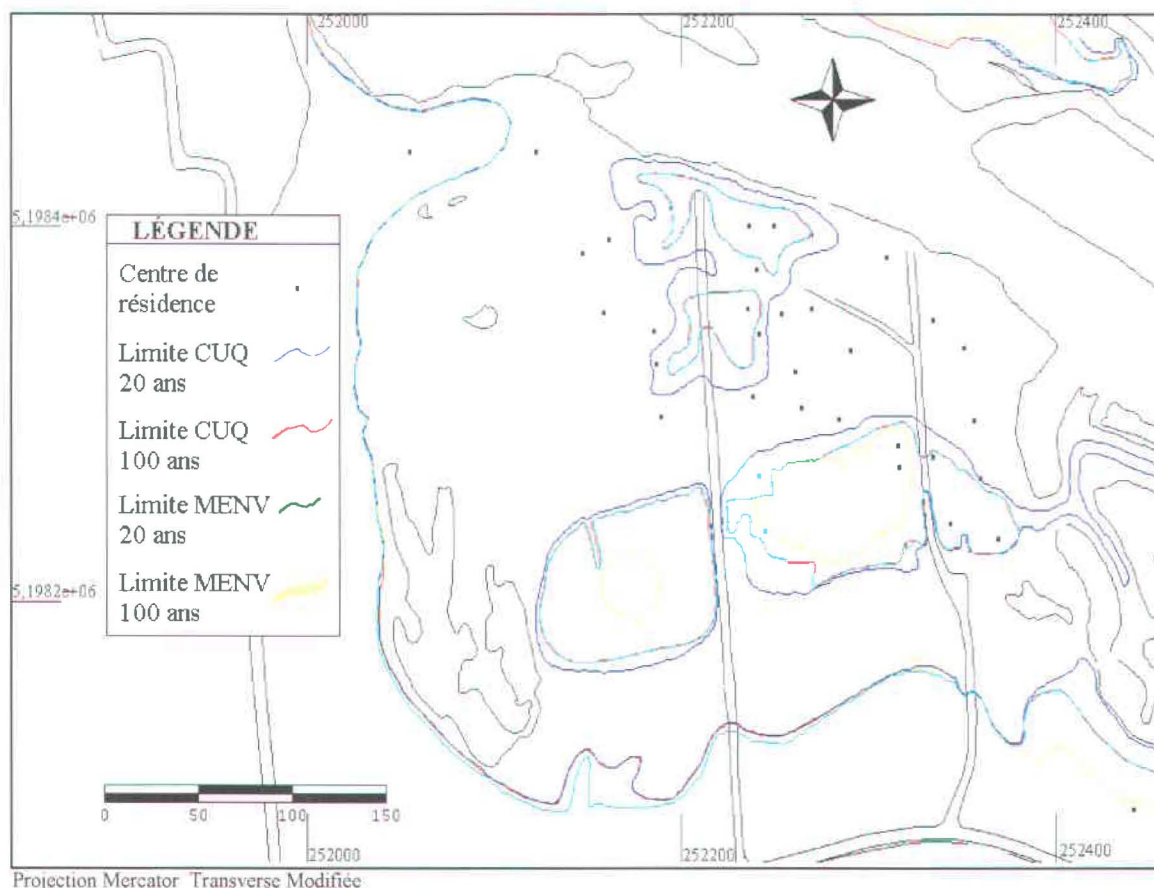


Figure 10 – Limites des cartes de risque d'inondation de la CUQ et de la Convention Canada-Québec

La version mise à jour des cartes initiales du MENV par la CUQ (2001) 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 bi-dimensionnel ont permis de réduire considérablement les incertitudes de la première approche, ce qui explique les différences notables observées dans les résultats ci-après.

6.2.2. Résultats comparatifs

Pour établir la comparaison, une évaluation quantitative du risque unitaire a été réalisée le long des limites des zones de grands et de faibles courants (réurrences 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 unitaire et de les moyenner. Le Tableau 3 présente les résultats comparatifs mentionnés pour des résidences évaluées à plus de 50 000 \$CAD avec et sans sous-sol (SS).

Tableau 2 - Comparaison des résultats de risque unitaire d'endommagement moyen (en % de destruction moyen annuel) aux limites d'inondation de récurrence 20 ans et 100 ans des cartes du Ministère de l'Environnement (MENV) et de la CUQ

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

6.2.3. Commentaires sur les cartes de risque d'inondation

Ces commentaires sont tirés de l'article du Chapitre 10.

À prime abord, on constate sur les cartes (Figure 8 et Figure 9) 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 de taxation municipale et scolaire se situe habituellement aux alentours de 1,5-2% du rôle d'évaluation, on a ainsi une donnée déterminante à l'appui pour corroborer 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 50 % des coûts de ces dommages (Leclerc *et coll.*, 2001). Par contre si l'on rappelle que les résultats de cette étude ne représentent que les dommages directs et ne prennent pas en considération toutes les autres formes de dommages (coût d'intervention, pertes de taxes dues à la dévaluation des résidences, etc.) qui sont assumés par les divers paliers de gouvernements, il est facile de constater que les coûts totaux de tous les dommages dus aux inondations risquent d'être plus élevés que les résultats obtenus sur les cartes de risques présentées.

Concernant l'implantation entre la limite de la zone de récurrence 20 ans et celle de 100 ans, les dommages subis 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 les taux d'endommagement sont comparés au niveau de la fiscalité municipale et scolaire. 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. 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. Les différences entre les méthodes employées par le MENV (Boucher et Picard, 1994) et celles de la CUQ (Heniche *et al*, 1999c) ont été évoquées précédemment. Parmi les quatre facteurs de différenciation entre les deux approches (voir p. 43), nous croyons que la méthode statistique employée et un fort écart d'appréciation dans la relation niveau-débit à l'aval du modèle hydraulique 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 MENV 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 MENV 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 importantes 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.



7. DISCUSSION

7.1. Avantages et inconvénients de la méthode

La caractéristique des cartes de risque unitaire d'endommagement (CRUE) qui les démarque le plus des autres cartes de risque est sa précision spatiale. En effet, alors que les autres cartes proposent des classifications zonales uniformes (CUQ, MENV) qui réduisent les possibilités d'utilisation à celles prévues par la réglementation, les CRUE offrent une représentation distribuée continue et ce, pour toute une palette de situations d'analyse. En effet, puisque le risque est connu en tous points du territoire étudié, il est possible de le classer rapidement selon différentes hypothèses d'aménagement.

De plus, les CRUE donnent des résultats entièrement géoréférencés et facilement transférables vers la plupart des systèmes d'information géographique (SIG) utilisés par les autorités municipales. Ceci permet ainsi de procéder à toutes les applications et traitements qu'il est normalement possible de faire avec un SIG. Il suffit de superposer des couches d'informations diverses pour obtenir des résultats précis et faciles à traiter statistiquement. L'utilisation qui nous semble la plus opportune serait de superposer sur les cartes de risque les plans d'aménagement d'un développement résidentiel futur (ou actuel) afin d'avoir une idée du risque encouru par les futures résidences ou encore de pouvoir estimer une forme d'assurance ou de taxation spéciale pour un projet, ce qui pourrait ainsi influencer la rentabilité de ce projet pour les divers intervenants concernés (municipalité, futurs résidents, promoteurs, etc).

De plus, cette méthode de cartographie du risque unitaire d'inondation pourrait facilement devenir générique de par le fait qu'elle peut aisément être appliquée à n'importe quelle plaine inondable présentant une certaine homogénéité (actuelle ou potentielle) dans le type de résidence. En effet, puisque cette méthode se base sur une étude de la relation entre les niveaux d'eau et les dommages directs, il suffirait de trouver les débits correspondant aux périodes de retour pour pouvoir arriver à des résultats. Ce qui ne permet pas de qualifier cette méthode de générique est le fait que la validation pour

d'autre cours d'eau des courbes de dommages du Saguenay utilisées dans cette étude n'a pas été faite. Ainsi, l'hypothèse que le mode d'implantation résidentielle est valide sur les rives de la rivière Montmorency, bien que très crédible, n'a pas été vérifiée.

Enfin, il est important de mentionner que, mis à part le choix des méthodes statistiques utilisées pour calculer les probabilités de débit, l'établissement des CRUE utilise exactement les mêmes ensembles de données que le Programme de détermination des cotes de crues (PDCC) et de cartographie des risques. Qu'il s'agisse de la topographie à l'échelle 1:2000, des calculs hydrauliques de niveau d'eau ou des probabilités, la méthode des CRUE prend appui sur les mêmes informations. Sans nécessiter de coûts additionnels, cette méthode apporte une valeur ajoutée à l'approche classique.

7.2. Extension de la portée de la méthode

La méthode de CRUE présentée ici se limite bien sûr aux dommages directs aux bâtiments résidentiels provoqués par les crues à l'eau libre, à l'exclusion des autres types de dommages, indirects ou d'incertitude, de ceux aux meubles (contenu), ou encore de ceux provoqués par les embâcles. Tous ces types de dommages sont pourtant très significatifs quand ils ne dépassent pas tous ensembles la valeur des dommages directs. Par exemple, il a été démontré par Leclerc *et al* (2001) que les dommages d'incertitude liés à la dévaluation des propriétés riveraines situées dans les zones à risque de la rivière Montmorency (ex. : Île-Enchanteresse) atteignait près de 40% de leur valeur de remplacement, privant les municipalités auxquelles elles appartiennent d'une source de revenus fiscaux récurrents très appréciables, et soulevant par le fait même un problème d'équité pour les autres contribuables qui doivent supporter les coûts de prévention et d'intervention dans ces zones. En terme de cartographie unitaire, ce type de dommage lié à l'incertitude peut être représenté comme un taux fixe uniforme pour l'ensemble du secteur considéré étant donné que c'est la réputation à risque du secteur qui semble engendrer ce type de dommage et non pas la position d'une maison particulière dans le terrain. Ainsi, la perception du risque, qui pourrait pourtant être injustifiée sur les hauteurs inaccessibles aux crues, engendre cette baisse de valeur. Ceci a aussi pour effet

de développer une forme perverse de culture du risque chez les riverains. En effet, ceux-ci, suite à l'achat de leur résidence en zone inondable, se retrouvent pris dans une sorte de piège. Ne pouvant revendre à un prix raisonnable, ils ont tendance à se sédentariser encore plus et à se consoler par des rénovations ce qui conduit à faire augmenter la valeur de leur propriété et conséquemment le potentiel de dommage. Ce phénomène amène donc progressivement une augmentation du risque d'inondation sans que cela ne soit aisément quantifiable. C'est donc un aspect qu'il est important de prendre en compte pour certains secteurs à risque.

Il est important de mentionner que les CRUE développées dans cette étude ne concernent que les dommages directs. Comme nous l'avons expliqué précédemment, il est possible d'étendre la méthode développée à d'autres types de dommages, en adaptant les courbes de dommage à la catégorie cible. Le problème réside plutôt dans la validité et l'utilité de ce travail. En effet, les autres types de dommages, qu'ils soient reliés à des commerces ou industries, à des routes ou encore que ce soit des dommages d'ordre psychologique ou de coûts d'intervention, sont beaucoup plus difficiles à évaluer et reposent le plus souvent sur l'analyse «cas par cas». Cette difficulté réside dans le fait que ces dommages sont trop ponctuels (résidences rares = trop faible échantillon), trop hétérogènes (ex: commerce), ou encore trop variables selon l'importance de l'événement (intervention d'urgence, dommages psychologiques).

Par ailleurs, il a été démontré dans le cadre de la Convention Canada/Québec que les dommages par embâcles représentent près de 60% du total des dommages directs dans nos régions froides. Dans une version améliorée de la méthode de CRUE, on pourrait chercher à ramener les dommages directs par embâcles en dommages équivalents à l'eau libre. Pour ce faire, il est requis de poser certaines hypothèses quant à la période de retour du phénomène, sa magnitude et sa localisation qui peuvent varier selon les secteurs riverains d'un même cours d'eau. Il apparaît difficile de procéder autrement que par une classification sommaire des observations disponibles et l'établissement de probabilités

empiriques événementielles et par secteurs riverains (sectorielles). Une telle approche a été tentée avec succès par Leclerc *et al* (2001) sur la rivière Montmorency.

7.3. Facteurs potentiels de sensibilité de la méthode

C'est la variabilité et l'incertitude des intrants qui déterminent la sensibilité de la méthode développée. Puisque les données utilisées sont de deux types, il y a deux sources de facteurs influençant la sensibilité, soit l'aléa et la vulnérabilité. Étant donné que nous n'avons pas procédé à une analyse de sensibilité en bonne et due forme, nous nous contenterons ici de discuter des facteurs pouvant l'influencer.

Les intrants reliés à l'aléa sont constitués des données de topographie, de la paramétrisation de la résistance à l'écoulement (coefficients de Manning) dans le modèle hydraulique, de la courbe de tarage appliquée comme condition aux limites aval du modèle ainsi que des débits correspondant aux diverses périodes de retour. Ces éléments constituent les données de base nécessaires aux simulations qui nous ont permis d'obtenir les niveaux d'eau les plus précis possible. Comme nous l'avons constaté dans la section 6.2.3., les débits de crue correspondant à des périodes de retour données varient souvent selon la méthode utilisée (ex : DMA journalier ou horaire, méthode au dépassement), ce qui en fait un facteur significatif d'influence de la sensibilité. Les données de topographie et de rugosité du lit sont quant à elles moins variables mais peuvent changer selon les outils utilisés pour les recueillir. Mais, étant donné que la nature déterministe de la composante hydraulique est sujette à validation sur le terrain (modèle hydraulique), nous pouvons supposer que ce facteur, de moyenne influence en ce moment, deviendra de moins en moins influent sur la sensibilité.

Les facteurs reliés à la vulnérabilité proviennent essentiellement des erreurs pouvant survenir dans la détermination des courbes de dommages. Ainsi, la sensibilité de notre méthode sur cet aspect sera influencée par la précision de l'échantillon qui a servi à déterminer ces courbes (Leclerc *et al*, 1997). Nous pouvons voir deux sources principales

de variabilité, les corrections de profondeur et la précision des paramètres appliqués dans la loi de Gompertz qui est utilisée pour déterminer les courbes (Leclerc *et al*, 1997). Les corrections de profondeur (+ 0,3 m pour le premier plancher et - 1,6 m pour la profondeur des sous-sols) sont basées sur des moyennes faites à partir d'un échantillon de résidences situées sur les rives des rivières et lacs touchés lors de la crue du Saguenay (Leclerc *et al*, 1997); nous avons émis l'hypothèse que ce mode d'implantation résidentielle était valide sur les rives de la rivière Montmorency mais aucune étude précise n'a été faite pour la vérifier. C'est d'ailleurs ce qui empêche de qualifier cette méthode de générique dans son état actuelle. Il en est de même pour les paramètres appliqués dans la loi de Gompertz.

Pour une application concrète de la méthode sur un secteur résidentiel, la position des maisons, ou plutôt la hauteur du premier plancher à laquelle elle correspond, est aussi un facteur qui peut grandement influencer la sensibilité de la méthode. En effet, dans le cas illustré sur les cartes, nous avons fait l'hypothèse que la position du centre géométrique d'une résidence correspond au point où le premier plancher serait au niveau du sol (un ajustement de +0,3 m a été ensuite apporté lors du calcul du dommage). La même chose prévaut pour les maisons avec sous-sol car celles-ci sont toutes, dans la méthode, considérées comme ayant la même profondeur par rapport au premier plancher (-1,6 m) (Leclerc *et al*, 1997). Bien sûr, la profondeur du sous-sol par rapport au terrain est variable et peut avoir une influence sur les résultats, en particulier si les maisons sont situées en terrain incliné. Mais, étant donné que la méthode de détermination des dommages considère que le sous-sol est inondé dès que le niveau de crue atteint le niveau du plancher du sous-sol, cette variabilité par rapport au sol n'est pas si importante (Leclerc *et al*, 1997). En effet, il n'est pas nécessaire que l'eau s'infilte par les fenêtres pour qu'un sous-sol soit inondé. C'est plutôt le drain de fond et les fissures qui servent de voies d'entrée.

7.4. Immunisation

Il est facile, une fois que l'on a défini le niveau d'acceptabilité des dommages en considérant tous les facteurs influençant le risque de réglementer l'immunisation. Cette

dernière doit faire en sorte que le premier plancher respecte l'altitude correspondant au % de destruction moyen annuel jugé acceptable par le consensus des intervenants, idéalement 0 %. Par contre, il est important dans la détermination de l'immunisation de considérer les facteurs d'accessibilité aux résidences immunisées. Ainsi, il ne suffirait pas d'immuniser la maison pour la soustraire à toutes les formes de dommages (indirects, incertitude) ou d'inconvénients (inaccessibilité temporaire, évacuation). Les routes et accès qui permettent de s'y rendre doivent également être disponibles dans une mesure acceptable (ex : durée tolérable d'isolement). Par contre, ce qui est cartographié dans cette étude est ce qui représente la majorité des frais d'indemnisation lors d'un désastre et permet ainsi d'avoir une bonne idée des bénéfices d'une immunisation adéquate.

8. CONCLUSION

En constatant le manque de précision et la difficulté d'application des méthodes de cartographie des risques actuellement en vigueur dans le domaine de la gestion des inondations, il est apparu évident qu'il existe un besoin réel d'une nouvelle méthode de cartographie des risques d'inondation. En effet, les divers intervenants et aménagistes pourraient grandement tirer profit de cartes dont la manipulation et le traitement sont faciles tout en représentant des résultats précis et signifiants en tous points du territoire étudié. Si de surcroît, ces cartes varient peu ou pas dans le temps, on s'évite les mises à jour souvent coûteuses et complexes liées à l'évolution du patrimoine bâti ou des facteurs financiers.

La présente recherche a permis de mettre au point un concept 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 aléas de 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 telle que représentés par la hauteur du premier plancher du bâtiment qu'il comporte ou non un sous-sol.

Cette nouvelle méthode de cartographie du risque unitaire (CRU) d'inondation offre une grande valeur ajoutée par rapport aux cartes déjà proposées, notamment celles produites au Québec dans le cadre du PDCC. En effet, les cartes développées à l'aide de cette méthode entièrement générique sont faciles d'utilisation et de compréhension, elles sont pratiques parce qu'elles donnent des résultats distribués en tous points du territoire étudié, elles sont d'une mise à jour facile tout en étant applicables à un large éventail de modes d'implantation résidentielle. Aussi, elles nous ont permis de constater que les cartes en vigueur en ce moment qui servent de base à la législation, du moins au Canada, offrent

peu d'information par rapport à la valeur réelle du risque, voire forment une représentation beaucoup trop simpliste de ceux-ci. Ainsi, nous pouvons conclure qu'en plus de cartographier les zones soumises aux crues en fonction d'une période de retour comme c'est le cas actuellement, la représentation du risque en terme de pourcentage de destruction moyen annuel est de nature à améliorer significativement la pertinence des cartes. Ainsi, les résultats obtenus jusqu'ici permettent de procéder à une nouvelle interprétation de diverses interventions de prévention des risques.

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 unifamiliale du Québec, la validité des courbes de dommage établie au Saguenay. De plus, explorer les moyens d'intégrer une gamme plus étendue des facteurs de risque, en particulier les risques d'inondation dues aux embâcles, est définitivement une voie de recherche pour le futur. 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. Le concept d'immunisation aurait ainsi un caractère plus quantitatif, voire financier, que qualitatif à l'égard du risque.

Ainsi, avec les nouvelles données résultant des cartes de risque unitaire d'inondation, plusieurs concepts et définitions peuvent être questionnés ou du moins discutés. C'est le cas pour les notions d'acceptabilité du risque et d'immunisation, d'où découlent les conditions d'autorisation de construire ou de reconstruire, ou encore de discuter de fiscalité municipale comme partie intégrante des études économiques de risque.

9. BIBLIOGRAPHIE

- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE). 1988. Evaluation Procedures for Hydrologic Safety of Dams. Task Committee on Spillway Design Flood Selection, New York:ASCE, Special publication 8726-26520, 107 p.
- BEARD, L.R.. 1997. "Estimating Flood Frequency and Average Annual Damage". ASCE J. of Water Res. Plan. and Manag., vol. 123(2), p. 84-87.
- BOOY, C., AND L.M. LYE. 1989. "A New Look at Flood Risk Determination". Water Ressources Bulletin, vol. 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.
- BOUILLON, A. 2002. Communication personnelle.
- BRETON, C. & 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.
- BURN, D.H.. 1999. "Perceptions of flood risk : A case study of the Red River flood of 1997". Water Res. Research, vol. 35(11), p. 3451-3458.
- COMMISSION SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE SUR LA GESTION DES BARRAGES (CSTBG). 1997. Rapport de la commission. Janvier.
- COMMUNAUTÉ URBAINE DE QUÉBEC. 2000. Carte des zones inondables de Beauport dans le secteur des Trois-Saults et des Îlets, échelle 1:2000. Service d'aménagement du territoire.
- 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.
- CSA (CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION). 1991. Risk Analysis requirements and guidelines. CAN/CSA-Q634-91. Rexdale, Ont.

- 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». Water Resources Bulletin, vol. 23(2), p. 179-188.
- EL-JABI, N., D. RICHARD & 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.
- FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (FEMA). 2000. National Flood Insurance Program, URL: <http://www.fema.gov/nfip/>.
- 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, vol. 3(1998), p. 429-444.
- GIVONE, P. & O. GILARD. 1997. Flood Risk Management : New Concepts and Methods for Objective Negotiation, Dans *Destructive Water: Water-Caused Natural – Their Abatement and Control*, IAHS Publication; 239, George H. Leavesley, Harry F. Lins, Franz Nobilis, Randolph S. Parker, Verne R. Schneider & Frans H. M. van de Ven (Eds), ISBN 1-901502-00-7, pp. 145-158.
- GOLDMAN, D.. 1997. "Estimating Expected Annual Damage for Levee Retrofits". ASCE J. of Water Res. Plan. and Manag., vol. 123(2), p. 89-94.
- GRIGG, N.S. & O.J. HELWEG. 1975. "State-of-the-Art of Estimating Flood Damage in Urban Areas". AWRA Water Res. Bulletin, vol. 11(2), p. 379-390.
- HENICHE, M., Y. SECRETAN, P. BOUDREAU AND M. LECLERC. 1999a. "A new finite element drying-wetting model for rivers and estuaries". Int. J. Advances in Water Resources. Vol. 38(3), p. 163-172 (Janvier)
- HENICHE, M., Y. SECRETAN, P. BOUDREAU ET M. LECLERC. 1999b. MODELEUR/HYDROSIM – Guide d'utilisation. Document HYDROSIM 1.0a06. 90p. p.v., Janvier

- INRS-EAU. 1997. Simulation hydrodynamique et bilan sédimentaire des rivières Chicoutimi et des Ha ! Ha ! suite aux crues exceptionnelles de juillet 1996. Rapport #R487. 198 p.
- LECLERC, M. 2002. Communication personnelle.
- LECLERC, M., B. MORSE, J. FRANCOEUR, M. HENICHE, P. BOUDREAU, Y. SECRETAN. 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.. 2000. Cours d'Hydrodynamique fluviale : L'analyse, la prévention et l'aménagement des risques d'inondation. INRS-EAU, 67 p.
- LECLERC, M.. 2000. Cours d'Hydrodynamique fluviale La législation québécoise et les différentes approches internationales. INRS-EAU, 20 p.
- LECLERC, M, M. HENICHE, Y. SECRETAN ET T. B.M.J. OUARDA. 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., B. DOYON, Y. SECRETAN, M. HENICHE, M. LAPOINTE ET P. BOUDREAU. 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. ET AL.. 1997. Prédiction des dommages résidentiels d'inondation en fonction de l'hydraulicité des rivières Chicoutimi et aux sables et du lac Kénogami. INRS-EAU Rap. No. R511, Présenté à Min. de l'environnement et de la Faune du Québec, Division de l'hydraulique, 108 p.
- OUARDA, T. B.M.J., N. EL-JABI, AND F. ASHKAR. 1995. "Flood Damage Estimation in the Residential Sector". in "Water Ressources and Environmental Hazards" (R. Herrmann, R. C. Sidle, W. Back and A. I. Johnson Edts.). AWRA Technical Publication series. vol. TPS-95-2, p. 73-82.

- OUARDA, T. ET F. ASHKAR. 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.
- OUELLETTE, P., D. LEBLANC, N. EL-JABI AND J. ROUSSELLE. 1985. "Cost-benefit analysis of flood plain zoning". J. Wat. Res. Plan. & Man (ASCE). Vol. 114(3), p. 326-334, paper # 22468, May.
- PDCC : PROGRAMME DE DETERMINATION DES COTES DE CRUE. 2001. <http://www.menv.gouv.qc.ca/communiqués/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.
- ROUSSELLE, S & al.1990. Hydrologie des crues au Canada – Guide de planification et de Conception, Conseil national de recherches Canada., 276 p.
- SASSEVILLE, J-L & Y MARANDA. 2000. Raisonnements de base sur des questions actuelles et futures. Administration publique de l'eau, Tome 1, INRS-Eau, 195 p.;
- SECRETAN, Y., M. LECLERC, S. DUCHESNE ET M. HENICHE. 2001. "Une méthodologie de modélisation numérique de terrain pour la simulation hydrodynamique bidimensionnelle". vol. 14 no. 2, p. 187-212.
- STEDINGER, J.R.. 1997. "Expected Probability and Annual Damage Estimators". ASCE J. of Water Res. Plan. and Manag., vol. 123 no. 2, p. 125-135.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. 1996. Risk-Based Analysis for Flood Damage Reduction Studies, Departement of the Army, Manual No. 1110-2-1619, URL : www.usace.army.mil/inet/functions/cw/rtnusace.htm, 60 p.
- WHITE, W.R.. 1999. Water in Rivers : Flooding, World water Vision, Document de réflexion IAHR, 21 p.

10. ARTICLE

Une nouvelle méthode de cartographie du risque unitaire d'endommagement (CRUE) dû aux inondations pour des habitations unifamiliales

P. Blin¹, M. Leclerc*¹, Y. Secretan¹, Brian Morse²

* Auteur à qui le courrier doit être adressé :

Adresse électronique : michel_leclerc@inrs-eau.quebec.ca

¹ Institut National de la Recherche Scientifique – Eau (INRS-Eau),
Université du Québec,
C.P. 7500, Sainte-Foy,
Québec, Canada G1V 4C7

² Département de Génie civil, Université Laval, Québec

10.1. Résumé

Les intervenants responsables de la gestion des inondations ont besoin d'outils permettant de traiter ce problème de façon simple et précise. Il existe plusieurs méthodes dites de cartographie des risques d'inondation dans le monde ayant pour but de répondre à ces besoins. Actuellement, en considérant simultanément les éléments constitutifs du risque, soit l'aléa et la vulnérabilité, aucune de ces méthodes ne permet d'établir de façon précise et quantifiables en tous points du territoire les risques d'inondation. La méthode de cartographie présentée permet de combler les besoins de ces intervenants en répondant aux critères suivants : facilité d'utilisation, de consultation et d'application des cartes, résultats distribués spatialement, i.e., en tous points du territoire étudié, simplicité de mise à jour si nécessaire, applicabilité à un large éventail de types de résidences .

La méthode présentée dans cette étude procède à un traitement unitaire de la définition du risque. Pour ce faire, les dommages sont d'abord calculés à partir des profondeurs de submersion déduites des niveaux d'eau pour des périodes de retour représentatives. Ensuite, à partir des dommages unitaires (ou taux d'endommagement) correspondant à chaque période de retour, le risque est obtenu par intégration des dommages sur la probabilité des périodes de retour. Le résultat est une carte représentant le risque en pourcentage de destruction moyen annuel, ce qui permet de s'affranchir de la dimension temporelle du risque. Une étude pilote sur un tronçon de la rivière Montmorency (Québec, Canada) a permis de montrer que les cartes sont flexibles et peuvent recevoir tous les traitements additionnels permis par un système d'information géographique tel que le logiciel MODELEUR/HYDROSIM développé à l'INRS-ETE, outil ayant d'ailleurs servi à réaliser cette recherche. La représentation des résultats peut ainsi se faire selon les besoins spécifiques des intervenants. Enfin l'interprétation des cartes de risque en vigueur actuellement au Québec a permis de conclure que celles-ci sous-estiment clairement le risque.

10.2. Introduction

Parmi les nombreuses caractéristiques des inondations, c'est leur grande variabilité spatiale, leur magnitude et la difficulté d'en prévoir les conséquences moyennes à long terme qui rendent la tâche plus difficile pour l'aménagiste impliqué dans la gestion de territoire. 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 phénomènes d'inondation 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, 2001). À notre connaissance, aucune méthode ne permet de cartographier le risque moyen annuel de dommages directs en tenant compte à la fois des probabilités des aléas et de la vulnérabilité du terrain en zone inondable. Le développement d'une nouvelle méthode de cartographie unitaire des dommages directs d'inondations semblait être une voie intéressante pour adresser les différentes préoccupations à l'égard de la prévention de ces événements.

Pour cartographier les conséquences potentielles des inondations, il ne suffit pas de partir des dommages connus pour quelques événements 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 et parfois, la non-stationnarité des paramètres statistiques des crues compliquent singulièrement l'évaluation du dommage moyen annuel infligé aux bâtiments.

Un retour à l'utilisation de la notion de *risque* combinant une évaluation de la *vulnérabilité* (pris 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 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. financière) 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 pourcentage de destruction. 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:

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 large éventail de types de résidences.

Dans le cadre de cette recherche qui se voulait 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 même 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 apporté par cet outil de cartographie unitaire seront exposés et discutés.

10.3. Revue de la bibliographie

10.3.1. 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 se rapporte aux dommages de différents types résultant des aléas, en l'occurrence les inondations (Breton et Marche, 1999). Si la définition de l'aspect 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) :

$$R = \int D(P) * dP \cong \sum D(P) \Delta P_i \quad [1]$$

Où,

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

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

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 probabilité annuelle au dépassement.

On peut illustrer cette équation par le graphique de la Figure 11. Graphiquement, le risque correspond à l'aire sous la courbe.

10.3.2. 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.

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

La méthode de cartographie du risque d'inondation utilisée actuellement au Québec a servi jusqu'en 1996 dans le cadre d'un programme conjoint fédéral-provincial appelé Convention Canada-Québec, et elle a été reprise depuis peu par le Programme de Détermination des Cotes de Crue (PDCC, 2001) opéré exclusivement par le ministère de

l'Environnement du Québec. Cette technique de représentation du risque ne tient pas compte du volet vulnérabilité et seules les limites d'inondation correspondant à des probabilités normées sont indiquées. Ainsi, 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 possibilité 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. Bouillon fait aussi remarquer qu'« il y a également certains éléments qui sont soustrait d'office de convention Canada-Québec. Parmi ceux-ci, il y a certains éléments publics (quais, aides à la navigation, aqueducs, égouts, puits et fosses septiques étanches notamment pour des bâtiments existants). Il est aussi possible, là où des réseaux d'aqueducs et d'égouts existent à une certaine date (parfois plus de dix ans après que les zones inondables n'ait été délimitées) de construire dans les zones de grands courant. Il est même possible de les reconstruire dans des secteurs non desservie par les réseaux publics. Le but poursuivi par la soustraction d'office de ces éléments à la convention Canada-Québec est de permettre aux municipalités de rentabiliser les équipements et infrastructures municipales. » (Bouillon A., 2002, comm. Personnelle).

La base de cette méthode est donc 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 néglige ainsi tout l'aspect vulnérabilité qui est pourtant une des variables de base de la définition du risque. Il s'agit donc à proprement parler d'une méthode de cartographie des aléas et non de risque comme sa désignation l'indique. Par conséquent, elle ne permet pas de quantifier directement le risque quoi qu'elle s'en approche d'assez près. Enfin, les multiples

exclusions et soustractions d'office présentes dans la loi se rapportant à ces cartes limitent grandement la portée de celles-ci.

10.3.2.2. 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). 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.

10.3.2.3. La méthode de cartographie des zones d'assurabilité des USA

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) 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 d'aménagement des plaines inondables pour réduire les risques d'inondations des nouvelles constructions dans des zones cartographiées spécifiquement désignées, 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 de même que d'éliminer ou du moins

limiter les développements en secteurs risqués. Notons que ce programme se limite à toutes les bâtisses dans les SHFA et cela peu importe les améliorations apportées à celles-ci (rehaussement, imperméabilisation, immunisation, etc...). (FEMA, 2000).

La cartographie du risque d'inondation est réalisée par la US. Army Corps of Engineers (USACE) et se limite aux SFHA. Une SHFA 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 SHFA : 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 SHFA en leur donnant une teinte de gris foncé et sert surtout dans les cas plus urgents. La seconde donne les élévations de base d'inondation et les différentes zones d'assurances du risque en plus, évidemment, des limites de la plaine d'inondation comme sur le FHBM. Il est important de mentionner que les SHFA 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 SHFA 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, 2000).

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 la prise de mesures de protection contre les inondations dans les zones de récurrence de 100 ans.

10.3.2.4. La méthode INONDABILITÉ (France)

Des méthodes européennes, la méthode INONDABILITÉ du CEMAGREF (Gilard et Gendreau, 1998) bien que documentée ici par des auteurs français semble déborder du territoire national. Elle utilise une définition et propose une application du concept de risque qui ressemble un peu plus de la méthode développée dans la présente étude. En effet, elle préconise une approche intégrée utilisant les deux éléments de la notion de risque (l'aléa et la vulnérabilité) tel que définie précédemment. Toutefois, la cartographie considère les deux variables séparément et ne les met en rapport que pour évaluer les besoins d'intervention. Pour ce faire, on a choisi une unité de mesure homogène à l'aléa et à la vulnérabilité qui a l'aspect d'une probabilité au dépassement. Ainsi, cette méthode comporte deux aspects qui la distinguent.

Le premier est la procédure tout à fait particulière d'estimation de la vulnérabilité laquelle 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, 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.

Le second aspect consiste à estimer l'aléa dans la même unité de mesure hydrologique (et non pas socio-économique). Il s'agit d'évaluer statistiquement et hydrauliquement 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 procédure détaillée est donnée dans Gilard et Gendreau (1998). La valeur statistique représentée est désignée par la variable *TAL*.

On se trouve donc à avoir pour chaque parcelle, une période de retour équivalent à l'aléa (*TAL*) qui correspond au début d'inondation et une équivalent à l'objectif de protection (vulnérabilité acceptée) (*TOP*). Il est donc très aisé de procéder à la cartographie de ces deux variables et de les comparer. Ainsi, en faisant la différence entre ceux-ci, on obtient une indication très simple du risque qui est illustré sous forme de pastilles de couleurs apposées sur une carte d'occupation du territoire. Ainsi, on se retrouve avec trois situations possibles pour chaque parcelle:

1. $TOP < TAL \Rightarrow$ les objectifs de protection sont inférieurs à l'aléa et sont donc suffisants. La couleur verte est alors donnée à la pastille;
2. $TOP > TAL \Rightarrow$ les objectifs de protection sont supérieurs à l'aléa et sont donc insuffisants. La couleur rouge est alors donnée à la pastille;
3. $TAL > 1000 \text{ ans} \Rightarrow$ la parcelle est hors de la zone maximum inondée. La couleur jaune est alors donnée à la pastille.

Avec cette carte, nous pouvons ainsi dire de façon simpliste que les aménagistes n'ont plus qu'à faire passer les pastilles de la couleur rouge à la couleur verte ou jaune en intervenant soit sur la vulnérabilité, soit sur l'aléa ou encore sur les deux. L'avantage principal de cette méthode est l'indépendance qui est établie 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 plus

ou moins uniformes et par conséquent plus difficiles à interpréter. C'est d'ailleurs un aspect qui est encore en voie de développement (Guilard et Gendreau, 1998).

Au niveau de la cartographie, les résultats sont simples, aisément lisibles et faciles à utiliser. Les cartes demandent une mise à jour régulière pour garder leur valeur. Comme toutes les autres méthodes de cartographie de risque, les résultats sont exprimés de façon discontinue (par parcelles) sur les cartes, ce qui amène une certaine imprécision. En résumé, elle permet de considérer tout les aspects du risque par la négociation de l'aspect vulnérabilité; par contre, cette négociation de la vulnérabilité ne permet pas à la méthode d'être générique d'une région à l'autre et est aussi variable dans le temps selon l'évolution de l'aménagement en plaines inondables. De plus, la valeur donnée à la vulnérabilité peut très bien changer selon les lieux et perd ainsi son aspect homogène si important pour les plans d'aménagement plus globaux.

10.3.2.5. Le besoin d'une cartographie intégrée du risque

À notre connaissance, les méthodes actuellement utilisées dans le monde ne permettent pas une cartographie intégrée du risque au sens strict 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 actuelle ou potentielle. Parmi les méthodes européennes, la méthode INONDABILITÉ permet une certaine catégorisation du risque mais ne donne pas d'en évaluer le coût directement. Quant à la méthode utilisée actuellement au Québec (PDCC, 2000), 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.

10.4. Présentation de la méthode unitaire

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

10.4.1. 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 discrète :

$$R = \sum D_i \Delta P_i \quad [2]$$

Posons l'existence d'une relation simplifiée empirique $f(\mathbf{A}_i)$ 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 :

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

L'équation **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** peut aussi s'exprimer en valeur unitaire :

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

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.

10.4.2. Les pré-requis

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

- 1 Un ou des outils de représentation spatiale de type S.I.G (Système d'Information Géographique) pour la modélisation spatiale des variables du terrain et des écoulements et la cartographie.

- 2 Une carte numérique représentant le *modèle numérique d'élévation* 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* uni- ou bi-dimensionnel validé des écoulements dans le tronçon à l'étude; le degré de discrétisation dépend de la complexité morphologique et de la fiabilité recherchée à l'égard du résultat;
- 4 Une *relation fonctionnelle empirique du taux d'endommagement* lié à la submersion (et d'autres variables de l'écoulement, le cas échéant);
- 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.

10.4.2.1. 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 qui appartient à la classe des SIG qui est équipé de fonctionnalités appropriées à la modélisation de l'altitude et d'autres paramètres du terrain. Il comporte une calculatrice distribuée avec des fonctions de post-traitement, qui est adapté pour calculer le 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. Le MODELEUR permet aussi d'extrapoler latéralement dans la plaine de débordement les lignes d'eau obtenues avec un modèle à une dimension.

10.4.2.2. La modélisation des écoulements

La plupart du temps, une simple modélisation uni-dimensionnelle des écoulements à l'aide de programmes de courbe de remous est suffisante pour établir le lien entre une

crue de récurrence donnée et le niveau d'eau. Pour ce faire, on utilise généralement les programmes HEC-2, HEC-RAS du US Army Corps of Engineers (USACE, 1990). Dans les cas plus complexes, il est préférable d'utiliser des programmes résolvant les équations de type Saint-Venant à une-dimension comme le 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 anosthomosé), ou encore pour prédire les écoulements en présence de nouveaux ouvrages de contrôle des niveaux d'eau, un programme bi-dimensionnel, 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 (1-D) ou les surfaces de niveau (2-D) obtenues doivent être confrontées 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 1-D (lignes d'eau), une procédure d'extrapolation transversale doit être appliquée pour obtenir un champ de submersion. Si la prise en compte des vitesses de courant s'avérait nécessaire, l'emploi d'un modèle 2D serait requis puisque les modèles 1D ne donne qu'une valeur des vitesses intégrées latéralement dans la section d'écoulement.

10.4.2.3. 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 les dernières années (Booy et Lye, 1989 ; Beard, 1997 ; Goldman, 1997 ; Stedinger, 1997). 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). 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).

Suite aux crues du Saguenay en 1996 (CSTGB, 1996), Leclerc *et al* (1997) 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 au-dessus du premier plancher du bâtiment. La Figure 12 illustre la notion de submersion utilisée dans cette étude. 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 au niveau de ce bâtiment. Deux axes de comportement ont été identifiés définissant quatre courbes distinctes: d'une part, les bâtiments ayant une valeur supérieure ou inférieure à 50 000\$CAD et d'autre part, les résidences avec ou sans sous-sol. Les courbes décrivant la vulnérabilité à la submersion sont représentées à la

Figure 13. La présente recherche prend justement appui sur ces relations pour mettre en œuvre la cartographie souhaitée.

10.4.2.4. Statistiques hydrologiques

La description des approches statistiques les plus appropriées pour définir la probabilité au dépassement annuel des crues de référence sortirait des limites 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 DMA ou Débit maximum annuel). Trop souvent cependant, seules les données journalières sont disponibles. 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 corrige donc ce biais en appliquant un *facteur de pointe* moyen calculé à partir des *ratios* 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 vivement à une impulsion pluviométrique d'extension limitée mais de grande intensité.

10.4.3. Méthode de cartographie des risques unitaires (CRU) d'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 14):

- 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 utilisées 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 présentation détaillée de l'approche de modélisation numérique de terrain dans le contextes des risques d'inondation); pour cette étude, c'est le logiciel MODELEUR qui a permis l'intégration des données;

- 3 *Simulations hydrodynamiques* 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 Québec. Les statistiques ont été établies en tenant compte de la délocalisation du site en amont à la station (-6%) en faisant usage expérimentalement de différentes méthodes dont celles du DMA horaire et de séries partielles (Leclerc *et al*, 1999c);
- 4 *Calcul de la hauteur de submersion $H_i(x,y)$* en soustrayant l'altitude provenant du modèle de terrain du niveau d'eau résultant des i simulations hydrodynamiques (Figure 12);
- 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 dépendantes 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 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 remédiation.* Les différentes possibilités d'utilisation seront présentées plus loin.

10.5. Résultats et discussion

10.5.1. 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 15). Il est bordé en amont par le secteur de la rue Bocage et en aval par les limites des municipalités de Beauport et de Boischatel, un peu en amont du rapide des Trois-Saults. 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 15. Ce segment avait déjà fait l'objet de simulations hydrodynamiques (Leclerc *et al*, 1999c; Leclerc *et al*, 1998; Doyon, 2001).

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 puissent à l'occasion affecter le secteur (Leclerc *et al*, 2001), surtout par l'isolement routier du secteur, mais assez peu par les dommages d'inondation à cause de pratiques d'immunisation apparemment assez efficaces

10.5.2. Présentation de cartes de risque unitaire

Les cartes de la Figure 16 et de la Figure 17 ont été obtenues par la méthode présentée. Celles-ci recouvrent spécifiquement le secteur résidentiel des Îlets. Nous nous sommes limités à deux cas de figure seulement : ainsi, la première 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-sols également d'une valeur de plus de 50 000 \$CAD dont le premier plancher serait enfoui à 1,6 m sous le terrain. Les points noirs sur les cartes montrent les centres géodésiques 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 à prime abord que les parties habitées de ce territoire subissent entre 1 et 5% de dommages moyens annuels directs par les crues à l'eau libre en l'absence de sous-sol selon l'hypothèse d'exhaussement adoptée par rapport au terrain. Si les mêmes implantations résidentielles étaient pourvues de sous-sols habitables, plusieurs verraient leur 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.

Quelques exemples d'analyse prenant appui sur ces cartes sont exposés ci-après.

10.5.3. 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 Leclerc *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 des zones inondables telle que prévu dans la réglementation.

La version mise à jour des cartes initiales 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 bi-dimensionnel 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. Le Tableau 3 présente les résultats comparatifs mentionnés pour des résidences évaluées à plus de 50 000 \$ avec et sans sous-sol.

À prime abord, on constate sur les cartes (Figure 8 et Figure 9) 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 de taxation municipale et scolaire se situe habituellement aux alentours de 1,5-2% du rôle d'évaluation, on a ainsi une donnée déterminante à l'appui pour corroborer 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 50 % des coûts de ces dommages (Leclerc *et coll.*, 2001). Par contre si l'on rappelle que les résultats de cette étude ne représentent que les dommages directs et ne prennent pas en considération toutes les autres formes de dommages (coût d'intervention, pertes de taxes dues à la dévaluation des résidences, etc.) qui sont assumés par les divers paliers de gouvernements, il est facile de constater que les coûts totaux de tous les dommages dus aux inondations risquent d'être plus élevés que les résultats obtenus sur les cartes de risques présentées.

Concernant l'implantation entre la limite de la zone de récurrence 20 ans et celle de 100 ans, les dommages subis 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 les taux d'endommagement sont comparés au niveau de la fiscalité municipale et scolaire. 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. 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. Les différences entre les méthodes employées par le MENV (Boucher et Picard, 1994) et celles de la CUQ (Heniche *et al*, 1999c) ont été évoquées précédemment. Parmi les quatre facteurs de différenciation entre les deux approches (voir p. 43), nous croyons que la méthode statistique employée et un fort écart d'appréciation dans la relation niveau-débit à l'aval du modèle hydraulique 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 MENV 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 MENV 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 importantes 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.

Tableau 3 : Comparaison des résultats de risque unitaire de dommages directs (en % de l'évaluation municipale) aux limites d'inondation de récurrence 20 ans et 100 ans des cartes du Ministère de l'Environnement (MENV) et de la CUQ

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

10.6. 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 aléas de crues, notamment leurs probabilités 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 telle que représentés par la hauteur du premier plancher du bâtiment qu'il comporte ou non un sous-sol.

La nouvelle méthode de cartographie du risque unitaire (CRUE) d'inondation développée ici offre une grande amélioration par rapport aux cartes déjà proposées. En effet, les cartes développées à l'aide de cette méthode sont faciles d'utilisation et de compréhension, elles sont précises de par le fait qu'elles donnent des résultats distribués en tous points du territoire étudié, elles sont d'une mise à jour facile tout en étant applicables à un large éventail de modes d'implantation résidentielle. Aussi, elles nous ont permis de constater que les cartes en vigueur en ce moment qui servent de base à la législation, du moins au Canada, offrent peu d'information par rapport à la valeur réelle du risque, voire forment une représentation beaucoup trop simpliste de ceux-ci. Ainsi, nous pouvons conclure qu'il ne faut plus cartographier le risque en fonction d'une période de retour mais plutôt en fonction d'un pourcentage de destruction moyen annuel puisque les « chiffres ronds » utilisés (20 et 100 ans) ne correspondent pas à la réalité.

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 unifamiliale du Québec, la validité des courbes de dommage établie au Saguenay. De plus, explorer les moyens d'intégrer une gamme plus étendue des facteurs de risque, en particulier les risques d'inondation dues aux embâcles, est définitivement une voie de recherche pour le futur. 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.

10.7. Remerciements

CÉRIU, Villes de Beauport, Sainte-Brigitte-de-Laval et Boischatel, Programme conjoint de Protection civile (PCPC), Fonds pour la Formation des Chercheurs et l'Aide à la Recherche (FCAR).

10.8. Bibliographie

- Beard, L.R., (1997). Estimating Flood Frequency and Average Annual Damage, *ASCE J. of Water Res. Plan. and Manag.*, **123**(2): 84-87.
- Booy, C., and L.M. Lye, (1989). A New Look at Flood Risk Determination, *Water Resources Bulletin*, **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.
- 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.
- Commission scientifique et technique sur la Gestion des barrages (CSTBG), (1997). Rapport de la commission. Janvier.
- Communauté urbaine de Québec, (2000). Carte des zones inondables de Beauport dans le secteur des Trois-Saults et des Îlets, échelle 1:2000. Service d'aménagement du territoire.
- Canadian Standards Association (CSA), (1991). Risk Analysis requirements and guidelines. CAN/CSA-Q634-91. Rexdale, Ont.

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, *Water Resources Bulletin*, **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 manuel, Water Modelling Section, Ottawa.

Federal Emergency Management Agency FEMA (2000). National Flood Insurance Program, url: <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. and 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., Y. Secretan, P. Boudreau and M. Leclerc (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., Y. Secretan, P. Boudreau et M. Leclerc (1999b). MODELEUR/HYDROSIM – Guide d'utilisation. Document HYDROSIM 1.0a06. 90p. p.v., Janvier.

- Leclerc, M., B. Morse, J. Francoeur, M. Heniche, P. Boudreau, Y. Secretan, 2001. Analyse de risques d'inondations par embâcles de la rivière Montmorency et identification de solutions techniques innovatrices – Rapport de la phase 1-Pré faisabilité, 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., M. Heniche, Y. Secretan et T. Ouarda, (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., B. Doyon, Y. Secretan, M. Heniche, M. Lapointe et P. Boudreau (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., J. Marion, M. Heniche, T. Ouarda et Y. Secretan (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., N. El-Jabi, and F. Ashkar, (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. et F. Ashkar (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.
- Ouellette, P., D. Leblanc, N. El-Jabi and J. Rousselle (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). <http://www.menv.gouv.qc.ca/communiqués/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., M. Leclerc, S. Duchesne et M. Heniche. 2001. Une méthodologie de modélisation numérique de terrain pour la simulation hydrodynamique bidimensionnelle. vol. 14 no. 2, p. 187-212.

Secretan, Y., Y. Roy, Y. Granger et M. Leclerc (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.

Liste des figures

Figure 11 : Interprétation graphique du risque

Figure 12 : Variables définissant le concept de submersion en zone résidentielle

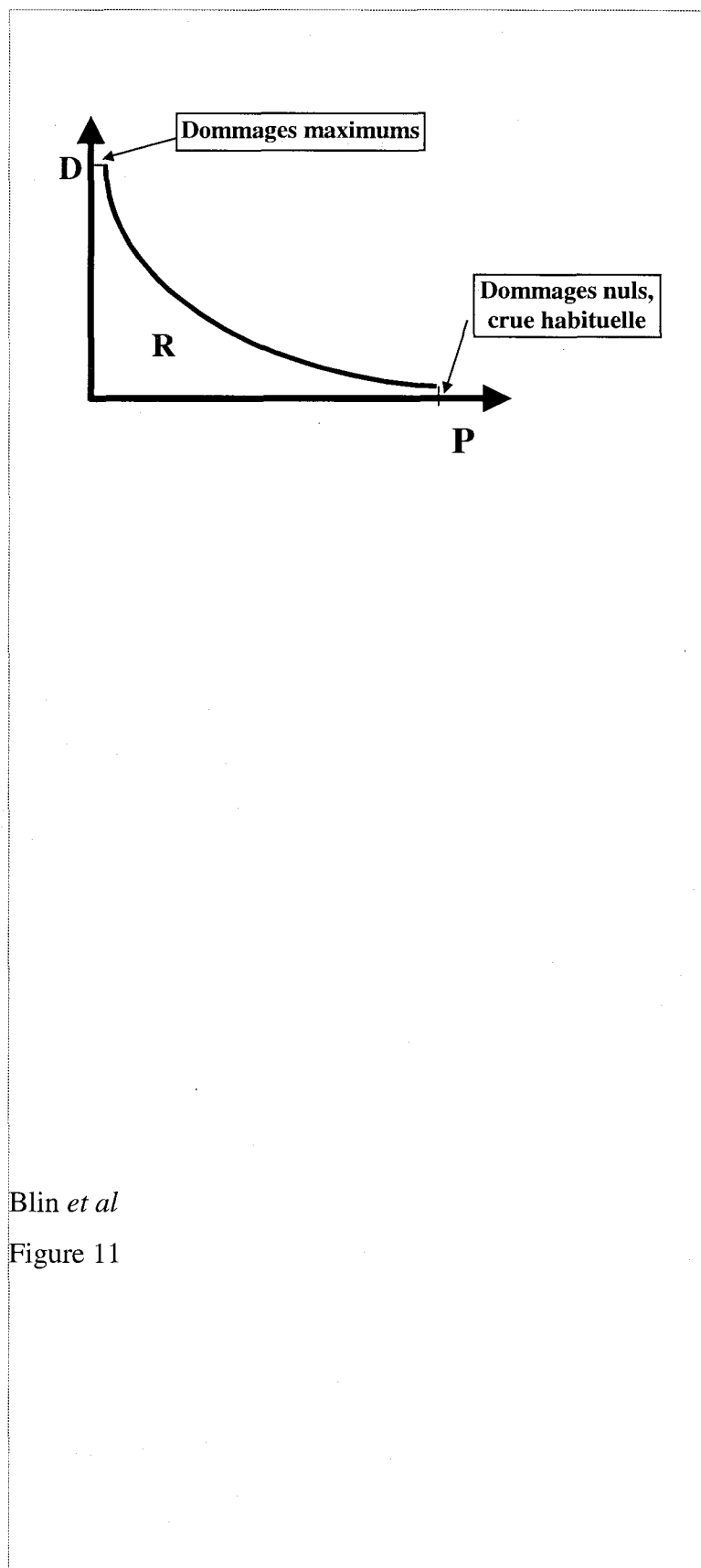
Figure 13 : Relations fonctionnelles entre le taux d'endommagement direct aux résidences en fonction de la hauteur de submersion du premier plancher (D'après Leclerc *et al*, 1997)

Figure 14 : Méthodologie de cartographie du risque unitaire d'inondation résidentielle

Figure 15 : Rivière Montmorency – Localisation du secteur à l'étude

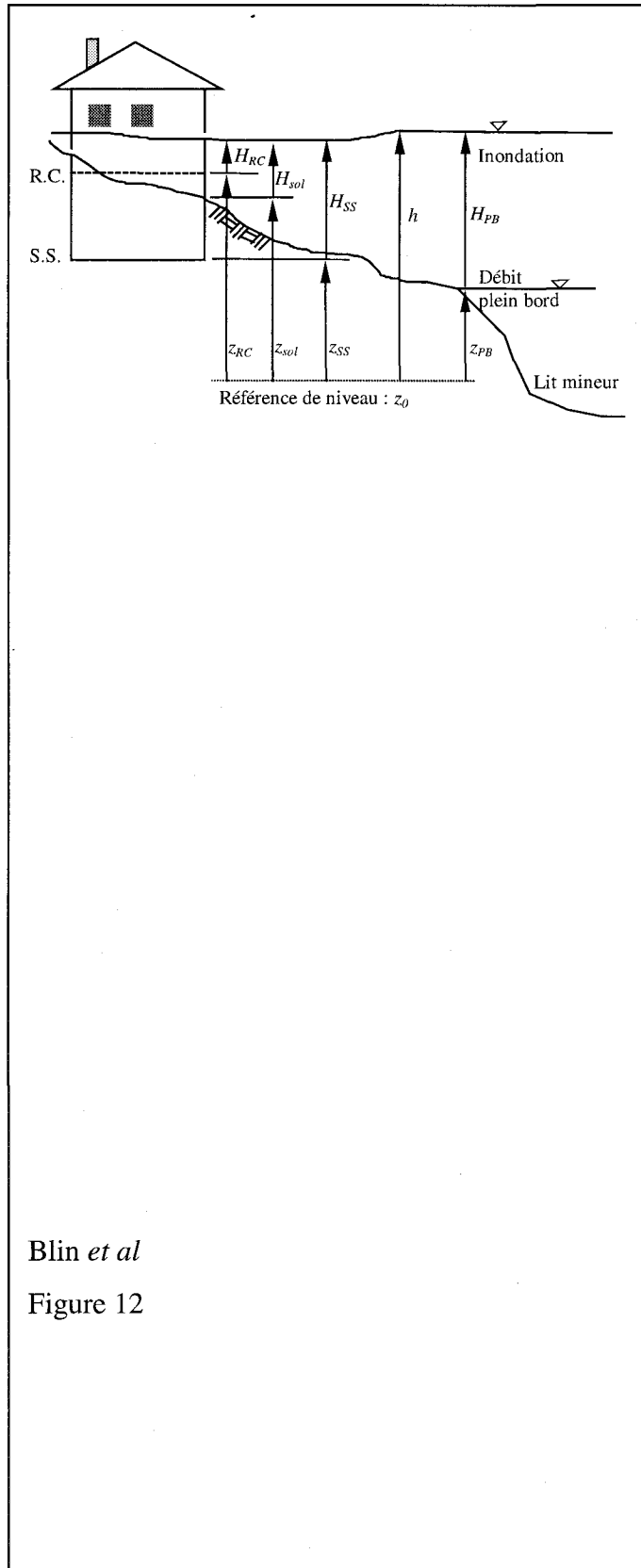
Figure 16 : Carte du risque unitaire d'inondation des résidences de valeur supérieure à 50 000 \$ avec sous-sol - Rivière Montmorency, secteur des Îlets

Figure 17 : Carte du risque unitaire d'inondation des résidences de valeur supérieure à 50 000 \$ sans sous-sol - Rivière Montmorency, secteur des Îlets



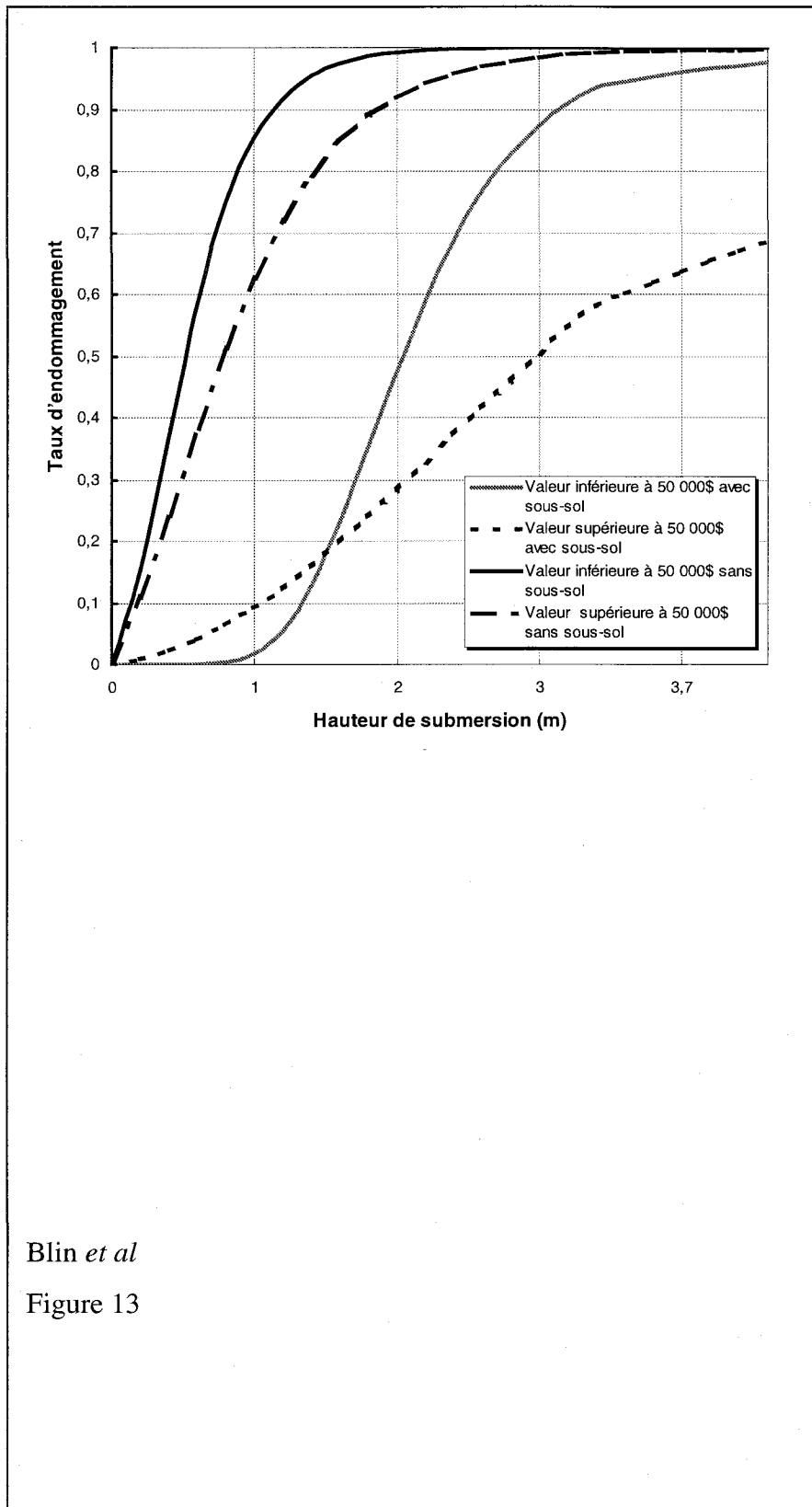
Blin *et al*

Figure 11



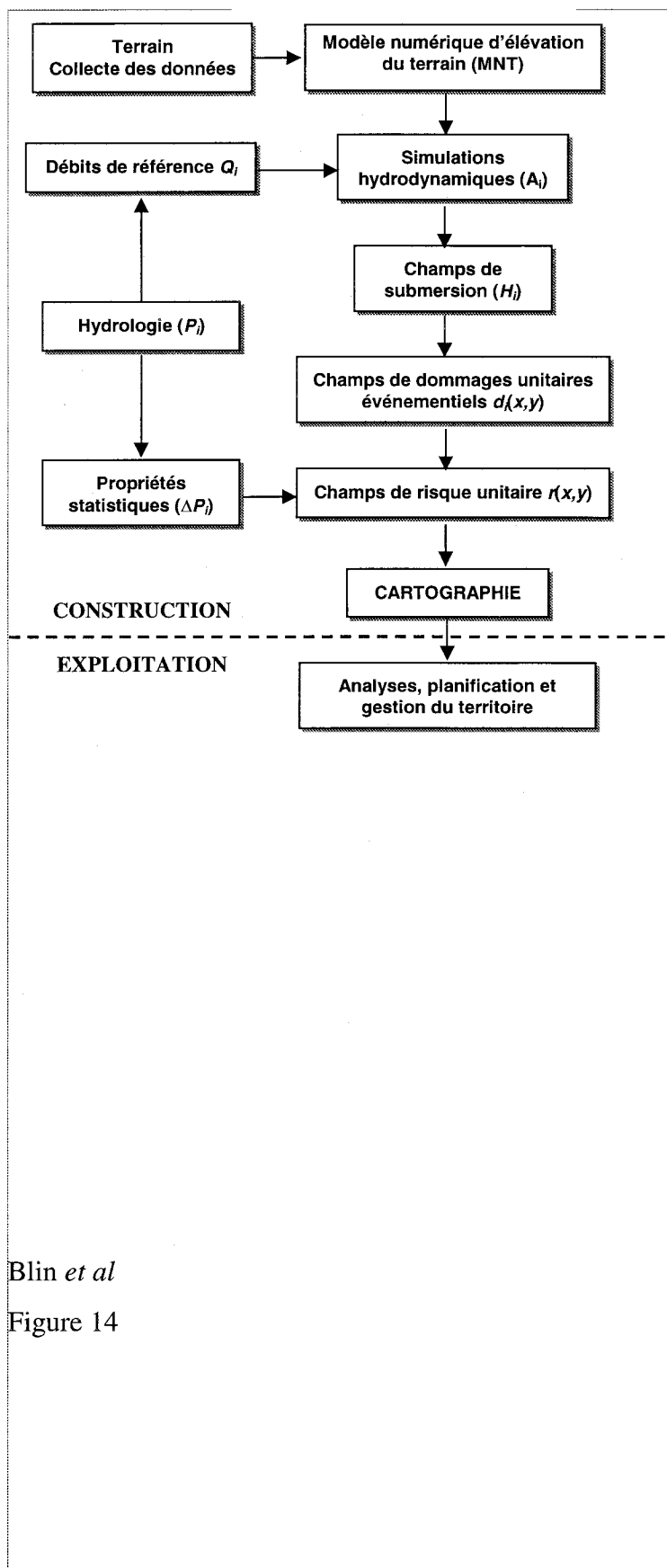
Blin *et al*

Figure 12



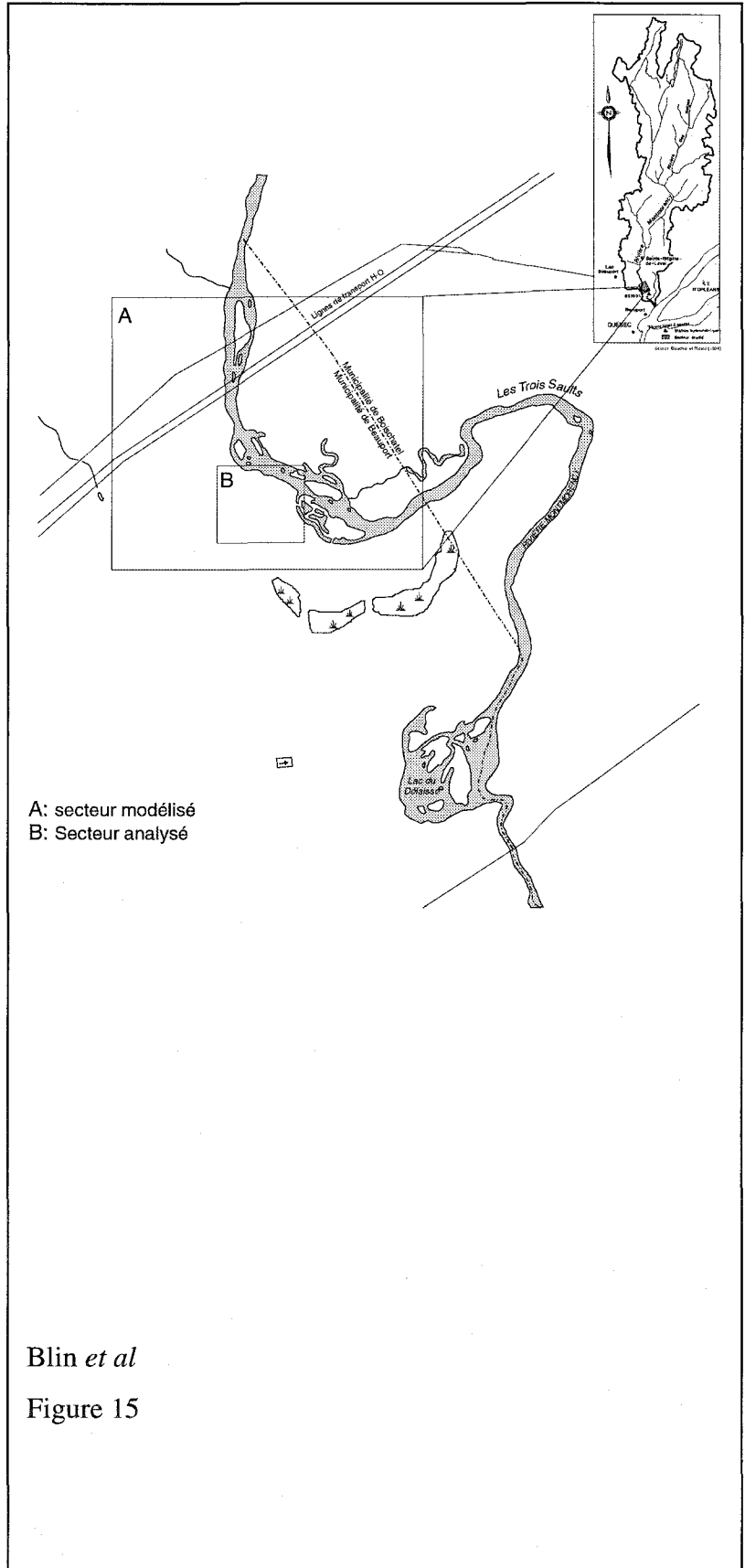
Blin *et al*

Figure 13

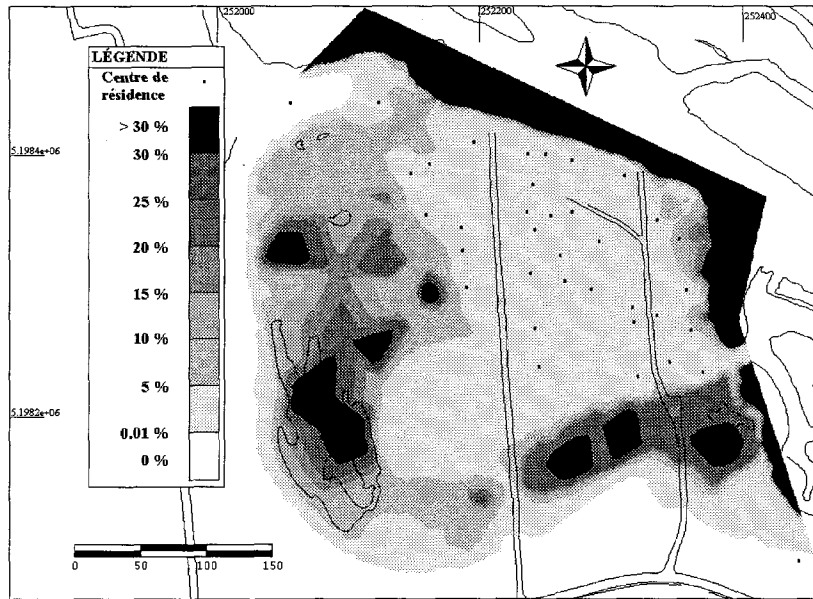


Blin *et al*

Figure 14

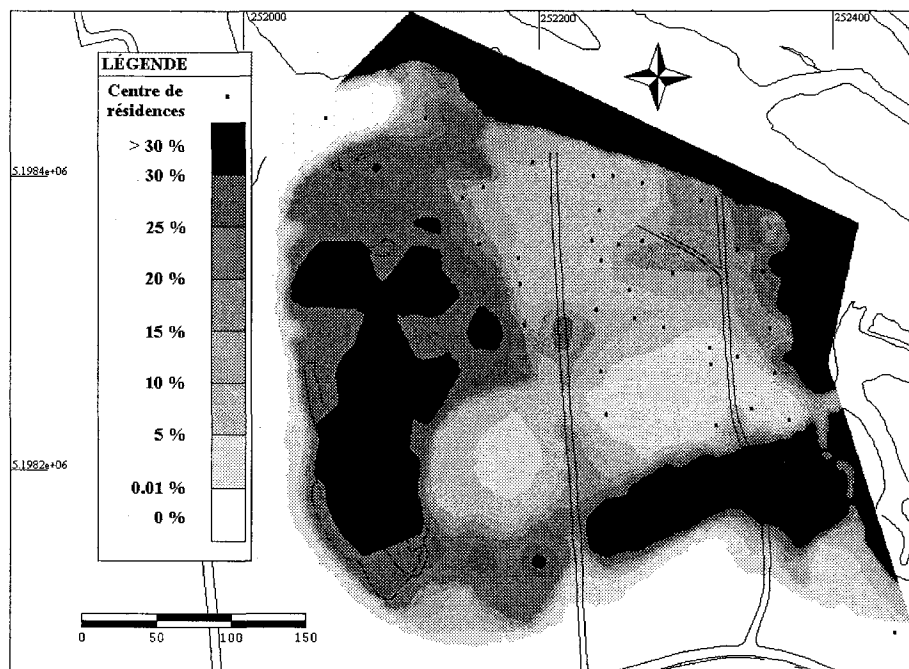


Blin *et al*
Figure 15



Blin *et al*

Figure 16



Blin *et al*

APPENDICE A

Programme de calcul de la distribution des dommages (Loi de Gompertz)

```
#-----
# Fonction: Gompertz
#
# Description: relation unitaire dommage-profondeur de
submersion
#
# Entree: profondeur de submersion, parametres
#
# Sortie: taux endommagement unitaire
#
# Note: pas pour le moment
#
#-----
function scalarfield gompertz (scalar alpha, scalar beta,
scalarfield psub)
    # eliminer les valeurs negatives dans le champ scalaire
de profondeur
    # pour eviter erreurs de calcul:
    with (a in psub)
        if (a < 0) then
            a = 0
        end if
    end with

    # calcul de la loi de gompertz:
    exp_alpha = exp(-alpha)
    exp2_alpha = exp(exp_alpha)
    exp_beta = exp(-beta * psub)
    sa = 1.0 / (exp2_alpha - 1.0)
    sb = exp((1.0 - exp_beta) * exp_alpha) - 1.0
    gompertz = sa * sb
end function
```