

Université du Québec
INRS-ETE

Développement de courbes submersion-dommages pour l'habitat résidentiel québécois

Par
Laurent Bonnifait

Mémoire présenté pour l'obtention
du grade de Maître es sciences (M.Sc.)

Jury d'évaluation

Examineur externe	Van Diem Hoang
Examineur interne	Michel Slivitzky
Directeur de recherche	Michel Leclerc, Ph.D., professeur
Co-directeurs de recherche	Yves Secretan, Ph.D., professeur Monique Bernier, Ph.D., professeur

Avril 2005

© droits réservés de Laurent Bonnifait, 2005

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier ici mon directeur de recherche Michel Leclerc pour son écoute, ses conseils et sa confiance.

Merci également à Paul Boudreau et Yves Secretan pour leur aide, ainsi qu'à Monique Bernier pour son support.

Merci à l'équipe d'Environnement Canada avec laquelle j'ai eu plaisir à travailler, en particulier Bernard Doyon et Jean-Philippe Côté.

Merci à Suzanne Dussault, Johanne Desrosiers et Jean-Daniel Bourgault pour leur générosité.

Enfin, je remercie mes collègues et amis pour leur chaleureuse présence.

RÉSUMÉ

Le phénomène des inondations a toujours constitué une menace pour les agglomérations situées en bordure de rivières. Les dégâts engendrés par les crues sont souvent importants et parfois catastrophiques. En raison du coût considérable des aménagements de protection, les autorités ont besoin d'une estimation des dommages potentiels et du rapport coûts/bénéfices afin d'évaluer la pertinence de ces investissements.

La Commission Mixte Internationale (CMI) est chargée de la gestion des eaux frontalières entre les États-Unis et le Canada. Par l'intermédiaire du groupe d'études sur le Lac Ontario et le Saint-Laurent (LOSL), la CMI a confié l'étude des risques d'inondation du Saint-Laurent à Environnement Canada. Outil d'estimation performant et largement utilisé, les courbes de submersion-dommages ont été adoptées pour cette étude. Une courbe submersion-dommages représente les dommages subis par le bâtiment considéré en fonction de la hauteur de submersion.

La construction des courbes de submersion-dommages individualisées pour l'habitat résidentiel des rives du Saint-Laurent a été confiée à l'INRS-ETE. Seulement trois bases de données exploitables sont disponibles actuellement au Québec. Une de ces bases provient de la région du Saguenay, mais en raison du manque relatif de données, les trois bases ont dû être utilisées. Aussi, l'objectif de réaliser des courbes propres aux rives du Saint-Laurent a été élargi pour viser la construction moins spécifique de courbes submersion-dommages génériques, c'est à dire applicables sur l'ensemble du Québec.

Six catégories de résidences ont été distinguées parmi les bases de données collectées. Pour chacune de ces catégories, une courbe a été construite en utilisant diverses lois d'ajustement paramétrées par régression. De plus, une consultation d'experts en sinistres a fourni des indications précieuses pour le paramétrage des courbes, en particulier pour les fortes hauteurs de submersion.

Une validation réalisée sur un échantillon étendu de la région du Saguenay a donné une surestimation du dommage total de seulement 5 %. Ce résultat préliminaire témoigne de la pertinence des courbes. Cependant, une validation à partir d'un échantillon d'une

région non visée dans la construction des courbes serait souhaitable et de plus, permettrait de vérifier le caractère générique des courbes.

Les courbes réalisées ici sont les premières du genre opérationnelles au Québec. Cette étude peut constituer le point de départ d'un développement pour la province de cet outil particulièrement utile que sont les courbes de submersion-dommages. Cependant, cela ne pourra être réalisé sans un large accès à des données supplémentaires.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ	V
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES FIGURES	XI
LISTE DES TABLEAUX.....	XIII
1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Problématique	1
1.2 Présentation des objectifs.....	6
1.2.1 Contraintes	7
1.2.1.1 L'échéancier.....	7
1.2.1.2 Disponibilité des données	7
1.2.2 Objectif général.....	8
2 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	9
2.1 Les dommages d'inondation	9
2.1.1 Une classification des dommages	9
2.1.2 Les dommages directs tangibles	11
2.1.2.1 Expression des dommages	13
2.1.3 Déterminants des dommages résidentiels à la structure	14
2.1.3.1 Typologie de l'habitat résidentiel	14
2.1.3.2 Les facteurs hydrologiques d'endommagement	16
2.2 Estimation des dommages	20
2.2.1 Revue de méthodes parmi les plus utilisées.....	21
2.2.2 Méthode INRS-ETE/MEF	23
2.2.3 Sources des données	27
2.3 Les courbes submersion-dommages.....	28
2.3.1 Définition.....	29
2.3.2 Modes de construction	30
2.3.3 Limites de validité.....	32
2.3.4 Cadre d'application.....	33

2.3.5	Intégration à un SIG	34
2.4	Revue de courbes existantes	36
3	MÉTHODOLOGIE	39
3.1	Choix méthodologiques	39
3.2	Les données de submersion-dommages	41
3.2.1	Collecte des données	41
3.2.2	Fusion des bases de données	43
3.3	Développement des fonctions de submersion-dommages	44
3.3.1	Principes de construction	44
3.3.1.1	Protocole général	44
3.3.1.2	Indications d'experts	44
3.3.2	Techniques de construction	46
3.3.2.1	La loi de Gompertz	46
3.3.2.2	Distinction de domaines de validité	47
3.3.2.3	Paramétrage	48
3.3.2.4	Outils utilisés	48
3.3.2.5	Calcul d'erreur	48
4	RÉSULTATS	49
4.1	Résidences à un étage	49
4.1.1	Avec sous-sol fini	49
4.1.2	Avec sous-sol non fini	50
4.1.3	Sans sous-sol	51
4.2	Résidences à deux étages	52
4.2.1	Avec sous-sol fini	52
4.2.2	Avec sous-sol non fini	53
4.2.3	Sans sous-sol	55
4.3	Validation des courbes	56
5	DISCUSSIONS	59
5.1	Discussion sur la méthode	59
5.2	Discussion sur les résultats	60
6	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	62

BIBLIOGRAPHIE.....	65
ANNEXE.....	71

LISTE DES FIGURES

<i>Figure 1 : Relation entre le risque, l'aléa et la vulnérabilité.....</i>	<i>1</i>
<i>Figure 2 : Répartition relative de la fonction des bâtiments situés dans la plaine inondable du Saint-Laurent de Cornwall à Trois-Rivières.....</i>	<i>3</i>
<i>Figure 3 : Type des résidences installées dans la plaine inondable du Saint-Laurent de Cornwall à Trois-Rivières.....</i>	<i>4</i>
<i>Figure 4 : Définition de la hauteur de submersion : $H = h - Z_{R.C.}$.....</i>	<i>5</i>
<i>Figure 5 : Définition commune de la hauteur de submersion</i>	<i>18</i>
<i>Figure 6 : Définition de la hauteur de submersion utilisée dans la méthode INRS/MEF.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure 7 : Principe d'utilisation des courbes dans un Système d'Information Géographique (SIG) pour un type de résidence et une crue donnés</i>	<i>35</i>
<i>Figure 8 : Courbe de submersion-dommages pour les résidences à un étage avec sous-sol fini.....</i>	<i>49</i>
<i>Figure 9 : Courbe de submersion-dommages pour les résidences à un étage avec sous-sol non fini.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure 10 : Courbe de submersion-dommages pour les résidences à un étage sans sous-sol</i>	<i>51</i>
<i>Figure 11 : Courbe de submersion-dommages pour les résidences à deux étages avec sous-sol fini.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure 12 : Courbe de submersion-dommages pour les résidences à deux étages avec sous-sol non fini.....</i>	<i>54</i>
<i>Figure 13 : Courbe de submersion-dommages pour les résidences à deux étages sans sous-sol</i>	<i>55</i>

LISTE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Classification des dommages d'inondation</i>	<i>10</i>
<i>Tableau 2 : Récapitulatif des différents échantillons utilisés.....</i>	<i>43</i>
<i>Tableau 3 : Valeurs relatives des étages par rapport à la valeur totale de la résidence pour les différentes catégories traitées.....</i>	<i>45</i>
<i>Tableau 4 : Equations de la courbe pour les résidences à un étage avec sous-sol fini...50</i>	
<i>Tableau 5 : Equations de la courbe pour les résidences à un étage avec sous-sol non fini</i>	<i>51</i>
<i>Tableau 6 : Equations de la courbe pour les résidences à un étage sans sous-sol.....</i>	<i>52</i>
<i>Tableau 7 : Equations de la courbe pour les résidences à deux étages avec sous-sol fini</i>	<i>53</i>
<i>Tableau 8 : Equations de la courbe pour les résidences à deux étages avec sous-sol non fini</i>	<i>54</i>
<i>Tableau 9 : Equations de la courbe pour les résidences à deux étages sans sous-sol</i>	<i>55</i>

1 INTRODUCTION

1.1 Problématique

Le phénomène des inondations est plus que jamais d'actualité et concerne une grande part de la population mondiale. Malgré les aménagements réalisés et les mesures prises, certaines collectivités restent vulnérables et exposées aux conséquences parfois dramatiques de ces événements. Il est donc important de continuer à développer des méthodes et des outils d'analyse pour une meilleure prévention des risques d'inondation.

Avant toute chose, un rappel succinct de la notion de risque s'impose. Il y a risque lorsqu'un aléa (phénomène naturel) menace des enjeux (habitations, bâtiments, aménagements, etc). Le risque dépend d'une part de l'aléa (de son ampleur, de certaines caractéristiques) et d'autre part de la vulnérabilité des enjeux menacés. La vulnérabilité est la prédisposition des enjeux à subir des dommages (qualité des matériaux, surface exposée, structure).

Le risque est considéré comme l'intersection entre l'aléa et la vulnérabilité.

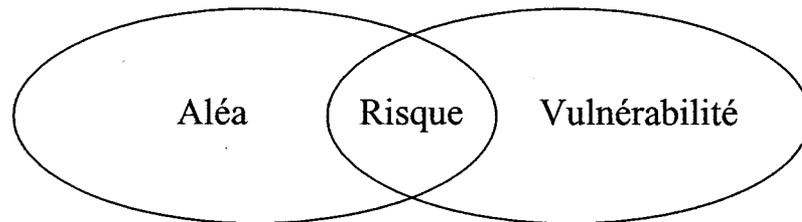


Figure 1 : Relation entre le risque, l'aléa et la vulnérabilité

Le risque existant est souvent entretenu, voire aggravé par une mauvaise gestion de l'hydrologie locale ou régionale, et/ou par un aménagement non adapté. La vulnérabilité est alors augmentée, et par conséquent, le risque également. La question de l'aménagement du territoire est primordiale et a trop souvent été négligée par le passé. Des zones urbaines se sont par exemple développées sur des terrains inondables, conséquence d'une perte de ce qu'on peut appeler la mémoire collective ou bien

l'expérience héritée des événements passés. Depuis peu, il y a une prise de conscience de la réalité de la menace et du fait que les mesures adéquates s'avèrent souvent délicates et coûteuses à mettre en oeuvre.

Les dégâts engendrés par une inondation peuvent se révéler dramatiques et stigmatiser un quartier, une ville, ou même l'ensemble d'une région. Chaque situation étant différente, la meilleure approche consiste à étudier le risque d'inondation dans son ensemble, en considérant ses spécificités propres. Il faut notamment évaluer précisément la situation existante et les conséquences d'un *statu quo* afin d'estimer la pertinence de mesures préventives. Une bonne estimation des dommages potentiels permet de quantifier le problème, de le concrétiser et de mettre en lumière des priorités. Les autorités peuvent dès lors agir efficacement de façon éclairée.

Des documents témoignent de crues considérables du Saint-Laurent avant la régularisation de son débit. Citons par exemple celles de 1838, 1841, 1865, 1896 et 1951. Depuis 1960, le fleuve est en grande partie contrôlé par les barrages des Grands-Lacs et de la rivière des Outaouais, mais reste malgré tout sujet aux crues. Des inondations dommageables ont en effet eu lieu après la régulation, principalement en 1974, en 1976 et en 1998.

La question des crues du Saint-Laurent relève en grande partie de la Commission Mixte Internationale (CMI). Cet organisme américano-canadien est chargé de réglementer l'utilisation des eaux frontalières entre le Canada et les Etats-Unis, autrement dit les Grands-Lacs et le fleuve Saint-Laurent. La CMI doit réguler l'emménagement dans les lacs-réservoirs, ainsi que les débits et les niveaux d'eau. Le cas échéant, elle doit également gérer et concilier les litiges entre les deux pays.

La CMI coordonne et subventionne l'Etude internationale sur le Lac Ontario et le fleuve Saint-Laurent (LOSL), groupe d'experts dont la mission est de mettre à jour les plans de gestion des eaux des Grands-Lacs afin de les adapter aux conditions actuelles d'utilisation d'eau et de trafic fluvial. L'actualisation de ces plans se fait dans une optique globale afin de considérer tous les enjeux, aussi bien socio-économiques qu'environnementaux.

Pour mener à bien ce projet, le groupe LOSL a entrepris une large étude multidisciplinaire sur le Saint-Laurent : géographie, biologie, environnement, santé, risques d'inondation etc. Le volet inondation a été confié à Environnement Canada (Environnement atmosphérique). Leur mandat consiste à estimer les dommages potentiels d'inondation pour différents scénarios de niveau d'eau sur 100 ans, fournis par le groupe LOSL.

Les rives du Saint-Laurent sont principalement occupées par des résidences. Ainsi, de Cornwall à Trois-Rivières, 89% des bâtiments riverains sont de type résidentiel (Figure 2). La grande majorité des habitations exposées étant des résidences principales (Figure 3), une crue majeure du fleuve provoquerait d'énormes dégâts.

En raison du contexte essentiellement résidentiel des rives du fleuve, l'étude des risques d'inondation menée par le Ministère de l'Environnement se limite aux dommages portés aux habitations.

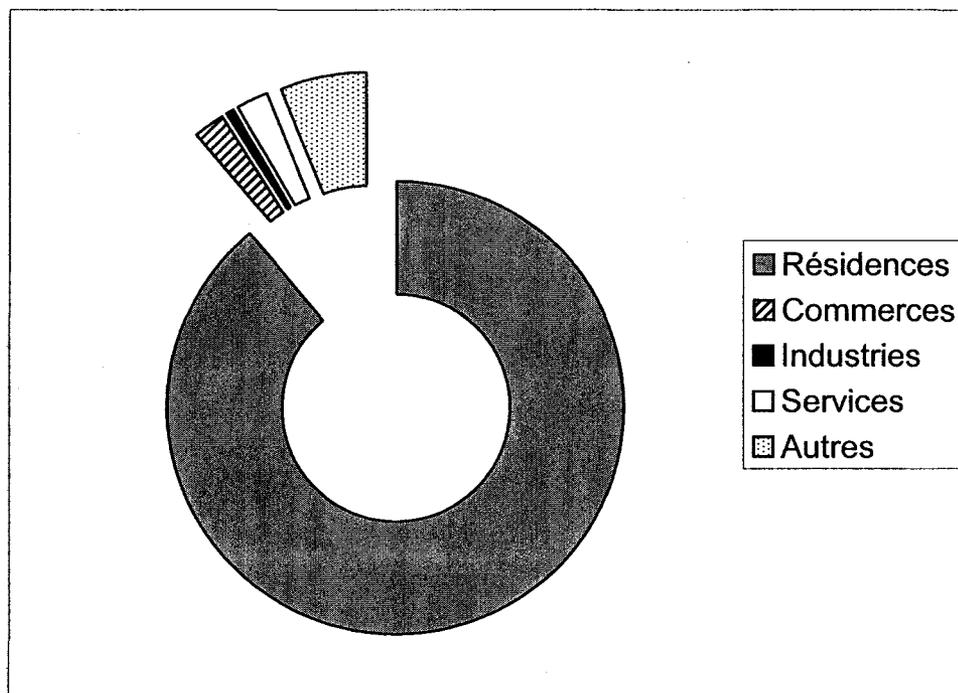


Figure 2 : Répartition relative de la fonction des bâtiments situés dans la plaine inondable du Saint-Laurent de Cornwall à Trois-Rivières

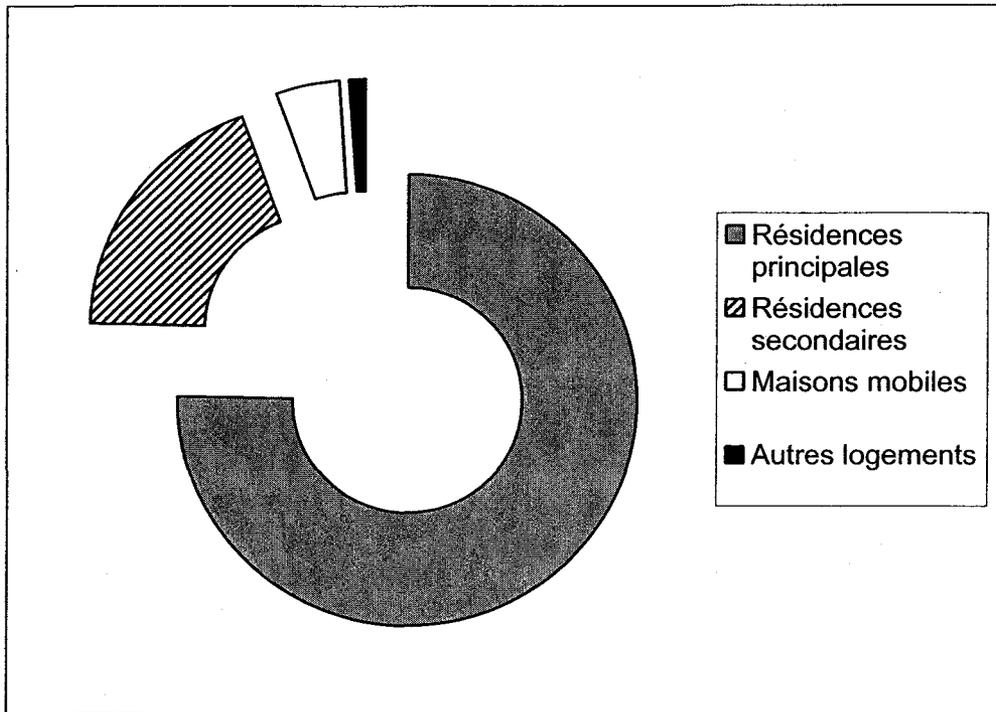


Figure 3 : Type des résidences installées dans la plaine inondable du Saint-Laurent de Cornwall à Trois-Rivières

L'évaluation des dommages résidentiels nécessite un outil d'estimation approprié. L'emploi de courbes de submersion-dommages a été choisi en raison de leur utilisation éprouvée dans ce domaine par de nombreux laboratoires. Pour un type de bâtiment, les courbes traduisent la relation entre les dommages subis et la hauteur de submersion. La hauteur de submersion est une donnée relative au bâtiment inondé. C'est la hauteur d'eau effective dans le bâtiment, mesurée à partir d'un plancher de référence (Figure 4).

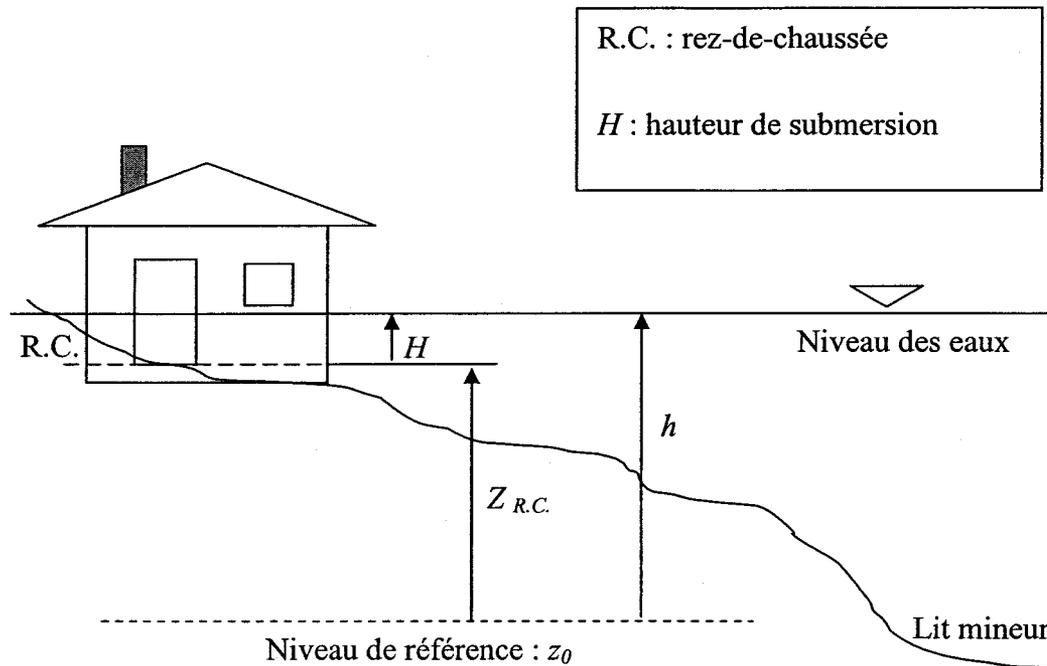


Figure 4 : Définition de la hauteur de submersion : $H = h - Z_{R.C.}$

Ce genre de courbe peut également être construite pour une zone géographique concernée par un risque d'inondation. Cependant la variable dans ce cas n'est plus la hauteur de submersion, ce qui n'aurait aucun sens pour une zone entière, mais la cote du niveau d'eau. On parlera alors dans ce cas de courbe niveau-dommages.

Il est possible de procéder de la façon suivante. Dans un premier temps, à chaque bâtiment de la zone menacée est attribuée une courbe de submersion-dommages. Le niveau de référence de ces courbes est l'altitude du plancher principal (rez-de-chaussée). La hauteur d'eau est donc considérée uniquement par rapport au bâtiment lui-même car c'est le comportement de la résidence confrontée à la submersion qui est étudié. Pour une simulation, connaissant la cote du terrain de chaque résidence, et à partir d'une cote de crue donnée (le niveau d'eau, obtenu par exemple par modélisation), on peut en déduire la submersion subie par chaque résidence. Ensuite, en utilisant les courbes, on obtient une estimation des dommages individuels. La somme des dommages individuels fournit le montant des dommages totaux à l'échelle de la zone. En effectuant le calcul pour toutes

les possibilités de crues, il est alors possible d'établir une courbe niveau-dommages pour la zone étudiée.

L'INRS-ETE a été chargé de construire les fonctions submersion-dommages individuelles en raison de son expertise acquise après les inondations survenues au Saguenay en 1996 (Leclerc *et al.*, 1997; 2003). Les données utilisées se limitaient alors à celles obtenues suite à ces événements. Si l'approche a prouvé sa valeur au Saguenay, un questionnement subsiste quant à la validité de sa paramétrisation dans le contexte du Saint-Laurent.

Ce mémoire présente la construction de nouvelles fonctions submersion-dommages plus génériques selon une méthodologie inspirée de ces travaux antérieurs, mais en mobilisant des ensembles de données élargis aux berges du Saint-Laurent. L'exploitation de ces fonctions en vue de produire des courbes submersion-dommages résidentiels pour les rives du Saint-Laurent demeure le mandat de la Direction de l'Environnement atmosphérique d'Environnement Canada.

Dans un premier temps, et après la définition des objectifs, une revue bibliographique aborde la question des dommages d'inondation et des courbes de submersion-dommages. Suivent la méthodologie, les résultats et une discussion. Enfin, des perspectives et des recommandations sont présentées en conclusion.

1.2 Présentation des objectifs

En l'absence de courbes déjà existantes applicables au contexte québécois, l'objectif initialement fixé était de construire des courbes submersion-dommages de type individuel, adaptées à l'habitat résidentiel des rives du fleuve Saint-Laurent. Certaines contraintes précisées ci-dessous ont conduit à modifier cet objectif et à élargir le cadre initialement prévu de l'étude.

1.2.1 Contraintes

1.2.1.1 L'échéancier

Le mandat de réalisation des courbes confié à l'INRS-ETE en octobre 2003, devait être achevé en février 2004 afin de respecter l'échéancier de la Commission Mixte Internationale (CMI). Cela laissait trop peu de temps pour entreprendre une campagne de terrain intensive. Une courte enquête a malgré tout pu être organisée dans la région de Sorel. Les résultats obtenus ont ensuite été combinés aux données déjà disponibles à l'INRS-ETE.

1.2.1.2 Disponibilité des données

Les jeux de données disponibles au Québec sont relativement peu nombreux. Concernant les rives du Saint-Laurent, une seule base de données existait avant l'étude. Issu des bords du lac Saint-Louis, l'échantillon contient 39 éléments ce qui est trop peu pour réaliser des courbes, d'autant plus que ce nombre doit être réparti entre plusieurs catégories de résidences. Une enquête a été réalisée à l'automne 2003 à Sorel et a pu fournir une quarantaine de données supplémentaires. Le formulaire utilisé à cette occasion est présenté en annexe. Le total de données obtenu restait malgré tout encore insuffisant pour la zone cible, à savoir les rives du fleuve.

Aussi, il a été décidé d'utiliser une base de données extérieure à la zone d'étude et ainsi d'élargir le cadre de l'étude. Si les courbes créées par l'INRS-Eau en 1997 suite aux événements du Saguenay paraissent *a priori* trop régionales, les données employées pour leur construction peuvent en revanche être utilisées dans le cadre élargi de cette étude. Cette base a donc été associée aux données déjà rassemblées. Les courbes produites au final ne sont donc pas strictement représentatives des zones riveraines du fleuve. Elles sont plus générales et peuvent être qualifiées de courbes génériques québécoises en raison de la diversité d'origine des données utilisées.

Le Ministère de la Sécurité Publique (MSP) possède de nombreux dossiers relatifs aux inondations passées. Ceux-ci constituent une source de données extrêmement

intéressante. Mais malheureusement, pour des raisons de confidentialité et de délai, le Ministère de la Sécurité Publique (MSP) n'a pu contribuer à enrichir notre échantillon.

1.2.2 Objectif général

Compte tenu des contraintes précédentes, l'objectif a été défini comme la construction de courbes de submersion-dommages pour l'habitat québécois en général.

2 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans un premier temps, nous nous intéresserons à la caractérisation des dommages puis aux principales méthodes d'estimation des dommages. Les courbes de submersion-dommages seront présentées par la suite avant une revue de certaines courbes existantes.

2.1 Les dommages d'inondation

Les dommages liés à une crue sont très divers. Ils diffèrent par leur nature et/ou leur cause. Une description typologique précise en facilite l'approche et le traitement. Dans la bibliographie, les dommages d'inondation ont été décrits et caractérisés selon plusieurs critères, ce qui a permis la distinction de catégories de dommages.

2.1.1 Une classification des dommages

Breaden (1973) distingue les catégories suivantes : directs, indirects, secondaires, intangibles et d'incertitude. Une version légèrement simplifiée de cette classification est détaillée ci-dessous et donne une illustration des différents types de dommages décrits selon deux axes : chiffrables/non-chiffrables, et selon la proximité ou l'éloignement de l'évènement.

Tableau 1 : Classification des dommages d'inondation

	Dommages directs	Dommages indirects Primaires	Dommages indirects Secondaires
Dommages tangibles (chiffrables)	Dommages dus à l'action physique de la submersion ayant une valeur monétaire directe. <u>Exemple</u> : dommages aux biens publics et privés	Effets indirects des dommages directs tangibles dans la zone inondée. <u>Exemple</u> : nettoyage, perturbation de l'activité dans la zone inondée	Effets indirects des dommages directs tangibles en dehors de la zone inondée. <u>Exemple</u> : perturbation de l'activité en dehors de la zone inondée
Dommages intangibles (non-chiffrables)	Dommages dus à l'action physique de la submersion non mesurables en termes monétaires. <u>Exemple</u> : dommages physiques et mentaux causés aux personnes, dégâts aux oeuvres d'art	Effets indirects des dommages directs intangibles dans la zone inondée. <u>Exemple</u> : stress, inquiétude causés aux personnes dans la zone inondée	Effets indirects des dommages directs intangibles en dehors de la zone inondée. <u>Exemple</u> : stress, inquiétude causés aux personnes en dehors de la zone inondée

(<http://www.enpc.fr/cergrene/HomePages/oms/gdrisques/inondation/impsocio.html>)

Remarques

Dommages intangibles

Les dommages intangibles relèvent du domaine sanitaire ou sociologique et rendent compte de l'impact psychologique ou physique (au sens corporel) de la crue sur des individus ou une population. Quoique bien réels, ce sont des éléments en grande partie subjectifs et non quantifiables, du moins en termes monétaires. Il est par conséquent très délicat d'essayer d'en tenir compte dans une évaluation de dommages.

Ces dommages, bien que non chiffrables, produisent un impact considérable, en particulier sur la population sinistrée et sur l'opinion en général. Ils conditionnent en partie la perception de l'évènement. Cet impact ne doit en aucun cas être négligé. Il est essentiel qu'une analyse de l'impact sociologique soit réalisée, ou à défaut, que ce facteur "sensible" soit pris en compte au niveau décisionnel lorsque les autorités doivent planifier des mesures de prévention.

Dommmages directs tangibles

Les dommages directs tangibles sont les dommages physiques (dommmages portés aux biens matériels) causés par la submersion. Ils sont chiffrables de façon monétaire et représentent, sauf exception, la part la plus importante des coûts engendrés lors d'une crue. Les dommages directs tangibles sont les mieux répertoriés et se prêtent donc bien aux études. D'ailleurs les études de risques traitent quasi-exclusivement de ce type de dommages. La section suivante y est consacrée.

2.1.2 Les dommages directs tangibles

Parmi les divers dommages directs tangibles causés par une inondation, on peut distinguer différents impacts socio-économiques.

- **Impacts à l'habitat**

Les impacts à l'habitat résidentiel, collectif et individuel, sont les plus étudiés à ce jour car ils représentent la part la plus importante du total des dommages lors d'une crue. L'habitat individuel se prête davantage aux études en raison d'un plus grand nombre de cas (taille des échantillons plus importante). Les études distinguent généralement les impacts à la structure de ceux portés aux biens matériels :

- Impacts à la structure

Les dommages causés à la structure sont généralement très coûteux. Ils sont relativement homogènes entre des bâtiments de même type. Cela autorise l'élaboration d'un mode d'estimation applicable à toutes les résidences d'un même type. Le terme structure inclut tout ce qui n'est pas mobilier et équipement.

En raison notamment du poids économique de ces impacts, ils sont souvent bien recensés. Le système d'indemnisation individuelle s'accompagne d'un relevé de la situation résidence par résidence, ce qui constitue une source précieuse de données.

Les sections 2.1.2 et 2.1.3 sont directement inspirées de l'ouvrage suivant : "Le coût du risque" (collectif d'auteur, 1999 : 63).

- Impacts aux biens matériels

Les dommages au contenu (ex. : meubles) sont très variables d'une demeure à l'autre. Ils sont de ce fait plus difficilement généralisables dans la perspective d'un outil d'estimation, et donc rarement considérés dans les études de risque. De plus, en proportion, le coût de ce type de dommages s'avère beaucoup moins important que celui dû aux dommages à la structure.

Afin de les prendre en compte, certaines études utilisent une valeur moyenne de dommages par logement (structure et mobilier confondu) pour une crue donnée (CNR, 1988 ; SOGREAH, 1994).

- **Impacts aux activités agricoles**

Ils comprennent : l'érosion des terres, les pertes de récoltes, les dommages aux équipements, la diminution du cheptel, les pertes de stocks divers etc. Ces dommages complexes relèvent du cas particulier et restent assez peu étudiés malgré quelques tentatives (Laurans *et al.*, 1997). En raison des variabilités régionales, locales et temporelles considérables (évolution saisonnière des cultures), les dommages subis par une ferme ou une exploitation peuvent difficilement être généralisés et faire l'objet de modèles prédictifs d'endommagement.

- **Impacts aux activités industrielles, artisanales et commerciales**

Les dégâts concernent les locaux, les marchandises, le matériel, l'équipement et les stocks entreposés. Même si chaque bâtiment, ou local à fonction professionnelle, possède des caractéristiques propres, une typologie peut malgré tout être envisagée. Une approche de recensement par entités (BCEOM, 1997) donne les meilleurs résultats mais s'avère lourde à mettre en œuvre. Une fonction de dommages doit en effet être développée pour chaque entreprise.

Un recensement par zones homogènes peut également être utilisé (BLC, 1997). Des fonctions de dommages sont exploitées par la suite.

- **Impacts aux équipements**

Les dommages aux équipements publics (de santé, scolaires, culturels, sportifs, sociaux, culturels, de service public) sont relativement bien recensés. Mais là encore se pose le problème d'une généralisation en raison de la rareté des retours d'expérience et de la variabilité des équipements. L'absence de corrélation entre le niveau d'eau et les dommages peut mener à une approche probabiliste, soit un coût moyen associé à un intervalle de confiance (Etude Loire moyenne par l'équipe pluridisciplinaire du plan Loire Grandeur Nature, mentionnée dans "Le coût du risque", Collectif d'auteurs, 1999). Un autre procédé d'estimation utilise une moyenne proportionnelle à l'étendue du sinistre (Rizzoli, 1997). L'inconvénient de cette méthode est qu'elle nécessite un échantillon important de données, condition difficile à satisfaire.

Cette revue des différents impacts de type direct et tangible, souligne que les types de dommages susceptibles de faire l'objet d'une estimation fiable sont peu nombreux. Ce sont les dommages résidentiels qui s'y prêtent le mieux. Il se trouve que c'est également une catégorie de dommages qu'il est essentiel de prévenir en raison de l'importance des coûts engendrés. Ces raisons expliquent pourquoi les dommages résidentiels font l'objet de la plupart des études de dommages d'inondation.

2.1.2.1 Expression des dommages

Généralement, les dommages estimés correspondent aux coûts nécessaires à la réparation ou au remplacement des biens endommagés ou perdus. Ils ne reflètent pas la valeur de la détérioration mais celle de la remise en état et donc le véritable coût engendré par la crue. Les dommages au mobilier et à l'immobilier font souvent l'objet d'évaluations distinctes. Les processus d'indemnisation nécessitent une évaluation des dommages afin de fixer les montants alloués ce qui constitue une source potentielle de données.

Lorsque des fonctions empiriques d'estimation sont utilisées, les dommages à l'habitat sont soit exprimés directement par le coût des dommages (unité monétaire), ou bien par un taux d'endommagement adimensionnel (le coût des dommages rapportés à la valeur du bâtiment). Les fonctions sont donc soit des fonctions de dommages ou bien des fonctions d'endommagement.

Selon Torterotot (1993), l'utilisation du taux d'endommagement donne de meilleurs résultats que l'estimation du coût des dommages en raison d'une meilleure corrélation avec la hauteur de submersion. De plus, ce coefficient a l'avantage d'être plus stable dans le temps et d'être plus facilement applicable. Le taux d'endommagement varie entre 0 (aucun dommage) et 1 (100% de dommages, perte totale).

2.1.3 Déterminants des dommages résidentiels à la structure

L'ampleur des dommages subis par une résidence lors d'une inondation à l'eau libre dépend des paramètres physiques de l'inondation (l'aléa), essentiellement du niveau d'eau qui est souvent exprimé en hauteur de submersion.

Le risque, et par conséquent les dommages, dépendent également de la vulnérabilité (Figure 1). La vulnérabilité d'un bâtiment est sa prédisposition à subir des dommages et dépend de certaines de ses caractéristiques. La plupart des études de risques qui nécessitent une estimation des dommages résidentiels utilisent une typologie de l'habitat afin de mieux définir les critères qui interviennent.

2.1.3.1 Typologie de l'habitat résidentiel

La diversité des résidences explique l'importante variabilité de la vulnérabilité à la submersion. Pour une même hauteur de submersion et des facteurs d'inondation semblables, les dommages peuvent varier fortement d'une résidence à une autre. De façon générale, la vulnérabilité d'une résidence varie selon les critères suivants :

1. Présence ou non d'un sous-sol et type d'utilisation

Une maison avec sous-sol est plus sensible à la submersion qu'une maison qui n'en comporte pas. La valeur de la résidence est répartie sur deux étages, dont un qui est au mieux à demi enterré, et donc plus exposé à la montée des eaux. Ainsi, le sous-sol peut-être inondé sans que le rez-de-chaussée ne soit touché, dans ce cas là, s'il n'y avait pas eu de sous-sol, il n'y aurait pas eu de dommages à déplorer.

De plus, les fondations d'une résidence avec sous-sol sont plus profondes et sont donc plus facilement affectées en cas d'inondation. Cela peut parfois se traduire par des dommages considérables malgré une hauteur de submersion assez modeste.

Le type d'utilisation du sous-sol conditionne également la vulnérabilité. En effet, un sous-sol fini sera plus coûteux à réparer qu'un sous-sol non fini. A ce titre, un propriétaire qui entreprend de rendre habitable son sous-sol augmente la vulnérabilité de sa maison, le sous-sol étant le premier niveau touché lors d'une inondation.

2. Nombre d'étages

Considérons deux résidences sans sous-sol, une avec un seul étage, et une autre avec deux étages. Pour une même hauteur de submersion de 1m au dessus du niveau du rez-de-chaussée, la première sera en proportion plus touchée que la seconde. La présence d'étages est donc un critère de vulnérabilité qui doit être pris en compte.

3. Hauteur du plancher principal par rapport au terrain

Plus une résidence a son plancher principal élevé par rapport au terrain, plus elle est protégée des eaux. L'élévation du plancher principal d'un type de résidence est une donnée souvent régionale, voire nationale, ce qui simplifie les études.

4. Niveau de qualité de construction de la maison

Un bâtiment supporte d'autant mieux la submersion que la qualité des matériaux employés et de la construction est bonne. Par exemple, des solages de moyenne qualité se fissurent plus facilement.

Cette typologie de base permet de classifier l'habitat de la zone étudiée selon les critères de vulnérabilité à la submersion des bâtiments. Pour chaque type de résidence défini ainsi, des fonctions algébriques de dommages peuvent alors être construites empiriquement.

Particularités locales (Doyon et al., 2004)

L'habitat est généralement typique d'une région et parfois d'un pays entier. L'architecture, les matériaux de construction, la surface etc., sont des caractéristiques souvent locales et relativement homogènes sur une région. Ainsi, au Canada, la présence d'un sous-sol est extrêmement courante, sans doute à cause du climat relativement froid et de l'économie des coûts de chauffage que cet espace procure.

Les fonctions de dommages appropriées à une zone géographique ne sont donc *a priori* pas nécessairement valables pour une autre région où l'habitat est de conception différente.

Les caractéristiques locales, doivent, lorsqu'elle ont un effet significatif, être ajoutées aux critères de typologie énoncés plus haut. Pour le Québec, il est ainsi important de considérer la question de la finition du sous-sol.

2.1.3.2 Les facteurs hydrologiques d'endommagement

Facteur principal : le niveau d'eau, ou hauteur de submersion

Le niveau d'eau est le facteur le plus significatif, celui qui possède la meilleure adéquation avec la prédiction des dommages. Il détermine l'ampleur de la submersion et par conséquent la gravité de l'endommagement. De plus, il conditionne l'endommagement causé par les autres facteurs dits "aggravants" qui n'interviennent que s'il y a submersion (ex. : débris, sédimentation).

Le niveau d'eau est également la variable la plus facile à déterminer, soit par simulation ou le plus souvent par simple relevé sur le terrain. Pour cette raison, et en tant que facteur prépondérant, le niveau d'eau est souvent la seule variable d'inondation considérée dans les évaluations de dommages. Dans les études qui utilisent des fonctions individuelles, la variable employée est la hauteur de submersion.

Hauteur de submersion

La hauteur de submersion dépend du niveau d'eau absolu, de l'élévation du terrain ainsi que de l'élévation du bâtiment par rapport au terrain. Elle est exprimée en mètres et a pour niveau de référence la cote du plancher principal de la résidence (le rez-de-chaussée). Cette définition implique qu'une hauteur de submersion négative peut causer des dommages, par exemple dans le cas d'une inondation partielle d'un sous-sol fini (Figure 5).

La hauteur de submersion permet de considérer l'impact d'une crue à l'échelle d'une résidence et d'obtenir une meilleure précision. Pour procéder à une simulation et ainsi estimer les dommages pour une crue donnée, il est cependant nécessaire d'avoir accès à certaines données géomatiques indispensables (modèle numérique d'altitude précis sur la zone d'intérêt, positionnement GPS des résidences).

Les cas de hauteur de submersion supérieure à 2 m sont particulièrement rares, très peu de données rendent compte de dommages engendrés dans ces cas extrêmes. L'estimation des dommages est par conséquent plus incertaine pour de telles hauteurs d'eau.

R.C. : rez-de-chaussée

S.S. : sous-sol

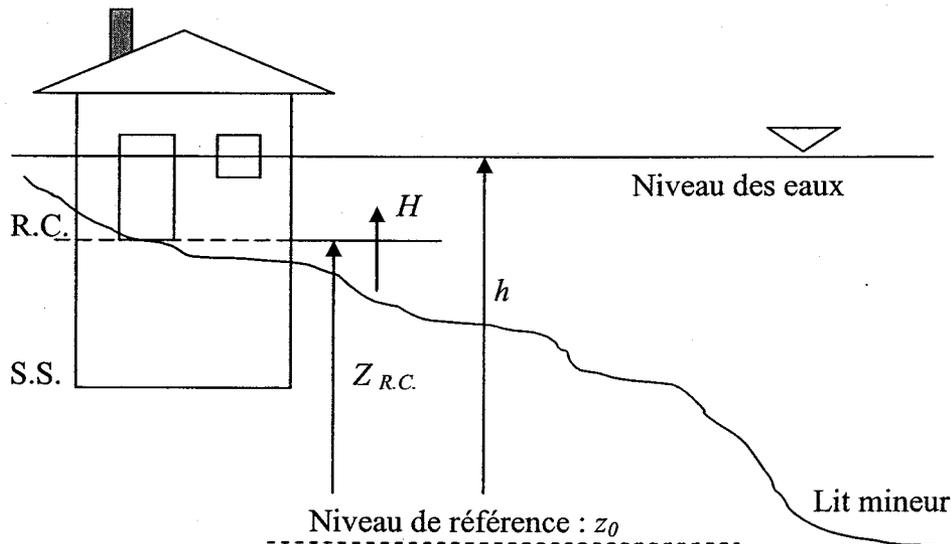
H : hauteur de submersion

h : cote de l'inondation

$Z_{R.C.}$: cote du rez-de-chaussée

$$H = h - Z_{R.C.} \text{ (formule unique)}$$

Cas où $h > Z_{R.C.} : H > 0$



Cas où $h < Z_{R.C.} : H < 0$

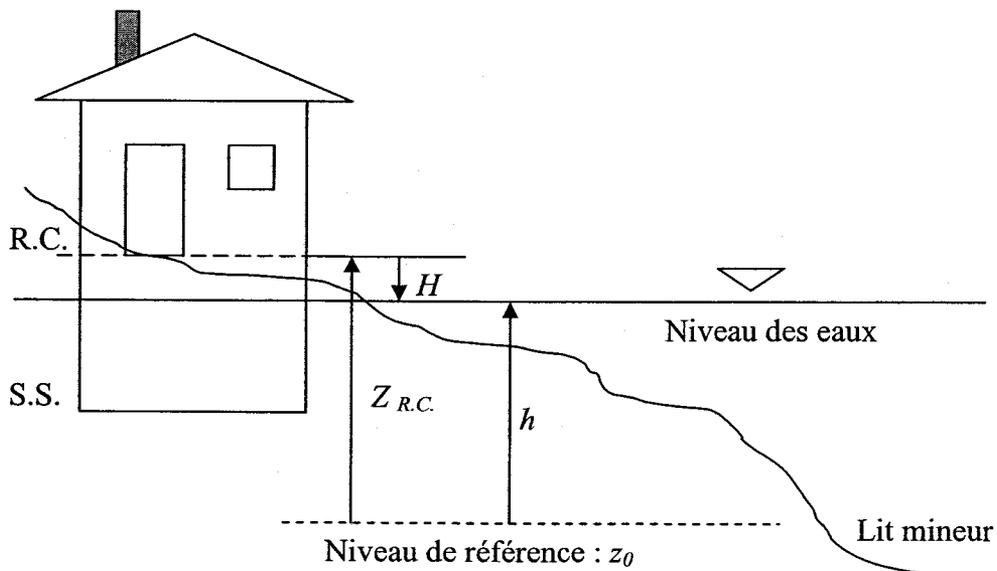


Figure 5 : Définition commune de la hauteur de submersion

Facteurs aggravants

Bien que leurs effets soient loin d'être négligeables, ils sont, sauf exception, moins dommageables que ceux dus à la seule submersion. Ils sont surtout non systématiques, et bien souvent, les dommages d'inondation sont uniquement dus à l'effet de la submersion.

Les facteurs aggravants sont difficiles à déterminer et leurs impacts exacts méconnus. Ils sont parfois mentionnés mais rarement pris en compte, faute de données et de méthode satisfaisante. Cependant, de nouveaux outils de simulation tentent de les modéliser. La prise en compte d'un plus grand nombre de ces facteurs constitue certainement la tendance des études à venir.

i) La vitesse du courant et l'érosion des berges

Plus la vitesse des eaux est importante, plus les forces s'exerçant sur le bâtiment sont élevées et occasionnent une augmentation des dégâts. Un courant fort peut engendrer l'érosion des berges, et, en situation extrême, causer la perte du bâtiment en emportant le terrain sous-jacent.

ii) La durée de submersion

Plus l'inondation se prolonge, plus les dégâts aux matériaux sont graves et la réparation coûteuse. La durée est parfois prise en compte lorsqu'il y a suffisamment de données significatives. Son effet aggravant peut dans ces conditions être étudié. Par défaut, la durée de submersion généralement considérée est de 24 heures. Faute de données précises, ses effets sont bien souvent négligés dans les études de dommages.

iii) La turbidité des eaux, ou la charge en sédiments

Ce paramètre peut aggraver sérieusement les dégâts et induire des coûts de réparation ou de nettoyage supplémentaires. Là encore, les données manquent la plupart du temps. Les dommages ainsi causés, le plus souvent heureusement mineurs, sont donc négligés dans la grande majorité des études.

iv) La glace

Les inondations qui se produisent en hiver sont le plus souvent causées par des embâcles ; le problème de la glace s'ajoute alors à celui de la submersion. L'inondation se fait par de l'eau libre, celle-ci peut ensuite geler et augmenter ainsi les dommages. La glace exerce une force de dilatation occasionnant des bris multiples, dans les fondations ou les cloisons par exemple. La poussée des glaces peut à l'extrême déplacer la résidence hors de ses fondations. Au final, les dégâts peuvent s'avérer bien plus importants que ceux causés seulement à l'eau libre. Malheureusement, à cause de leur variabilité et de la rareté d'informations, ils restent difficiles à considérer dans le cadre d'une étude de risque.

En raison de la difficulté d'évaluer les effets des facteurs aggravants (qui provoquent pour la plupart des dommages relativement modestes), les évaluations de dommages ne prennent généralement en compte que le facteur principal d'endommagement qu'est la hauteur de submersion.

2.2 Estimation des dommages

Les méthodes d'estimation des dommages concernent essentiellement les dommages directs. Les autres types de dommages sont en effet difficiles, voire pour certains, impossibles à évaluer économiquement. Il existe une multitude de méthodes d'évaluation des dommages directs, et les experts choisissent celle qui convient le mieux à leurs travaux. Les plus récents axes de recherche visent à développer des méthodes d'évaluation non biaisées (Booy et Lye, 1989 ; Beard, 1997 ; Goldman, 1997 ; Stedinger, 1997). Elles reposent le plus souvent sur des fonctions de dommages dont les paramètres décrivent l'aléa et la vulnérabilité (Ouellette *et al.*, 1988 ; El-Jabi et Rousselle, 1987 ; Ouarda *et al.*, 1995).

2.2.1 Revue de méthodes parmi les plus utilisées

i) Méthode linéaire agrégée

Dans cette méthode, le coût d'une inondation spécifique est exprimé par le produit de plusieurs facteurs (Grigg et Helweg, 1975).

$$Cd = Kd * U * Ms * H * A \quad [1]$$

Cd : coût des dommages pour une inondation spécifique ;

Kd : dommages par pied de profondeur de submersion et par dollar de la valeur marchande de la structure ;

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

Ms : valeur sur le marché de la structure inondée en dollars par acre développé ;

H : hauteur moyenne de l'eau sur la surface inondée en pieds ;

A : superficie inondée en acres.

ii) Méthode historique

Cette méthode relie par une courbe les dommages recensés de crues passées avec les niveaux d'eau responsables de ces dommages. Le cas échéant, les valeurs historiques doivent être corrigées pour refléter l'évolution du développement urbain ainsi que l'inflation (Blin, 2001).

iii) Méthode niveau-dommages (stage-damage)

La vocation de cette méthode est d'estimer le coût annuel moyen dû aux dommages d'inondation (forme d'expression du risque). Un de ses avantages est de permettre la considération des dommages aux infrastructures, notamment routières. Ceux-ci sont souvent négligés dans les autres études en raison d'une faible importance relative par rapport à l'ensemble des dégâts. Les dommages sont fonctions du niveau d'eau. A partir

de la période de retour des niveaux étudiés, le coût annuel des inondations est alors déduit (Grigg et Halwegg, 1975).

iv) Méthode du US Army Corps of Engineers (USACE, 1996)

Cette méthode élaborée en 1996 propose deux options, l'évaluation des dommages causés au patrimoine actuel, ou bien celle des dommages futurs potentiels. Dans le premier cas, c'est la méthode historique présentée précédemment qui est utilisée.

Les dommages futurs sont considérés par le USACE comme étant ceux qui seraient portés aux activités économiques si aucune intervention n'est effectuée pour réduire les risques d'inondation. La notion d'équité est abordée par cette méthode qui ne considère pas seulement les coûts assumés par les occupants de la plaine inondable, mais aussi ceux pris en charge par le gouvernement, les assurances, et tout autre citoyen touché directement ou indirectement par la crue.

Cette extrapolation des dommages futurs implique de connaître l'évolution hydrologique de la rivière, mais aussi d'essayer de tenir compte des éventuels changements climatiques. Certains facteurs économiques doivent également être estimés comme les dommages indirects primaires (pertes de revenu) et secondaires (interventions pendant la crise). Les dommages indirects primaires peuvent être considérés comme liés directement aux dommages directs, contrairement aux dommages indirects secondaires. La force de cette méthode est de prendre en compte une grande variété de types de dommages. En revanche, sa mise en œuvre exige une connaissance aigüe du contexte et de son possible développement ce qui représente une limite non négligeable à son utilisation.

v) Méthode DOMINO

Le modèle DOMINO (Breton et Marche, 1999) utilise trois paramètres : la valeur immobilière, la valeur des biens matériels et les pertes de vies potentielles (nombre d'habitants). Certaines caractéristiques d'inondation comme la durée sont également prises en compte. Les différents facteurs sont pondérés d'après les normes de l'American Society of Civil Engineering (ASCE, 1988) puis compilés afin d'être ramenés par secteur.

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

Les trois méthodes élaborées par le CDT (El-Jabi *et al.*, 1981) considèrent les paramètres hydrologiques comme directement liés à la fréquence des crues. Une autre de leurs particularités est de prendre en compte le facteur humain pendant la crise, comme le délai d'avertissement par exemple. Les trois méthodes, empirique, par simulation, et par corrélation, demandent chacune une enquête de terrain précise. La fonction de dommages est dans tous les cas représentée par une loi exponentielle de Gompertz. Le dommage global est la moyenne obtenue en divisant le dommage total par le nombre de bâtiments touchés dans la zone d'étude. Le résultat est unitaire (dollars/bâtiment) mais dépend directement de la zone d'étude choisie. Contrairement à la méthode de l'INRS-ETE/MEF (Leclerc *et al.*, 1997 ; 2003), chaque fonction est établie ici non pas selon le type de résidence mais en fonction du type de dommages (directs, indirects primaires, etc.) (El-Jabi *et al.*, 1981).

L'inconvénient majeur de cette méthode est que l'estimation est réalisée par zone ce qui lisse les spécificités. De plus, elle ne peut prendre en considération que deux périodes de retour. Ces caractéristiques engendrent un manque de précision et rendent difficile une application à un plan d'aménagement.

2.2.2 Méthode INRS-ETE/MEF

Cette méthode (Leclerc *et al.*, 1997 ; Leclerc *et al.* 2003) constitue le socle de la présente étude. Elle repose sur la considération d'un dommage résidentiel individualisé et géoréférencé pour chaque résidence. Elle a été développée suite aux crues du Saguenay de 1996. Le Ministère de l'Environnement du Québec avait alors demandé la mise au point d'une méthode de prédiction des dommages physiques aux résidences (excluant le mobilier) à partir du fichier des indemnisations accordées.

Le niveau d'eau absolu est calculé à l'aide du modèle hydrodynamique Modeleur-Hydrosim (Heniche *et al.*, 1999a, b), ou à défaut, par toute autre approche basée sur une relation niveau-débit.

Le niveau de référence de la hauteur de submersion est le plancher le plus bas de la résidence considérée, rez-de-chaussée ou sous-sol selon le cas. La Figure 6 explicite la notion de hauteur de submersion utilisée par cette méthode. Cette définition de la hauteur de submersion est plutôt inhabituelle. Dans la littérature, le niveau de référence est en effet le plus souvent celui du plancher principal (Figure 5).

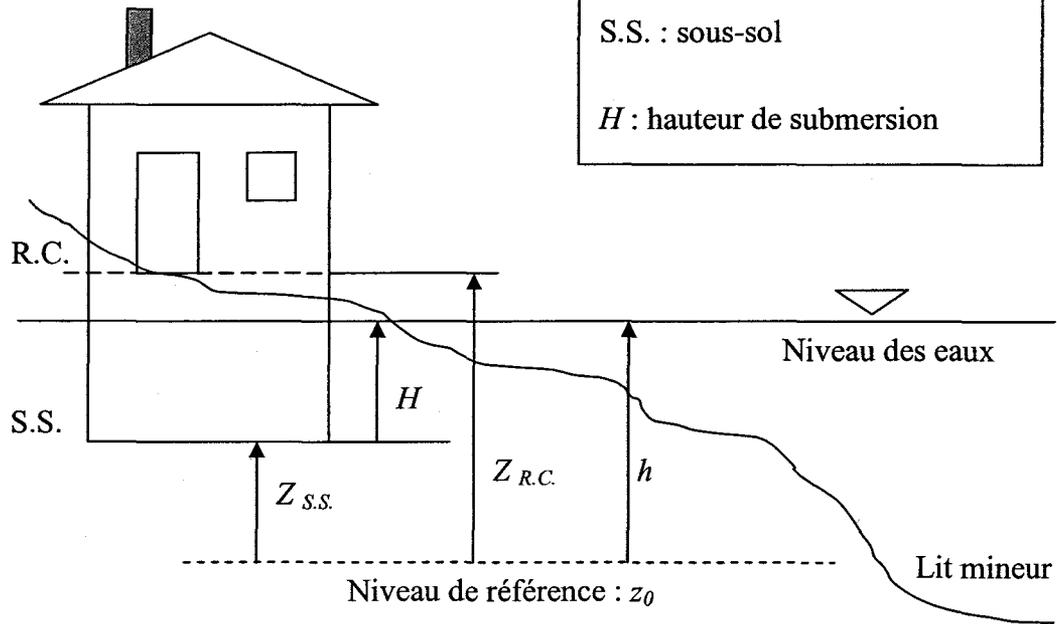
Dans cette méthode, le dommage porté à une résidence est estimé en considérant certaines caractéristiques du bâtiment en plus de la hauteur de submersion.

- Les paramètres intrinsèques à la résidence sont la valeur au rôle d'évaluation municipal (valeur marchande), le nombre d'étage, l'élévation du premier plancher, et le type de construction (Grigg et Helwegg, 1975). L'inconvénient de la valeur au rôle (valeur marchande) est qu'elle peut différer grandement de la valeur réelle (dite de remplacement) dans les situations de risque notoire. (ex. : les résidences de l'Île-Enchanteresse, Sainte-Brigitte de Laval, Québec ; Leclerc *et al.*, 2001). Une résidence située dans une zone menacée peut en effet être dévaluée fortement.

Pour les résidences avec sous-sol :

$$H = h - Z_{S.S.}$$

R.C. : rez-de-chaussée
 S.S. : sous-sol
 H : hauteur de submersion



Pour les résidences sans sous-sol :

$$H = h - Z_{R.C.}$$

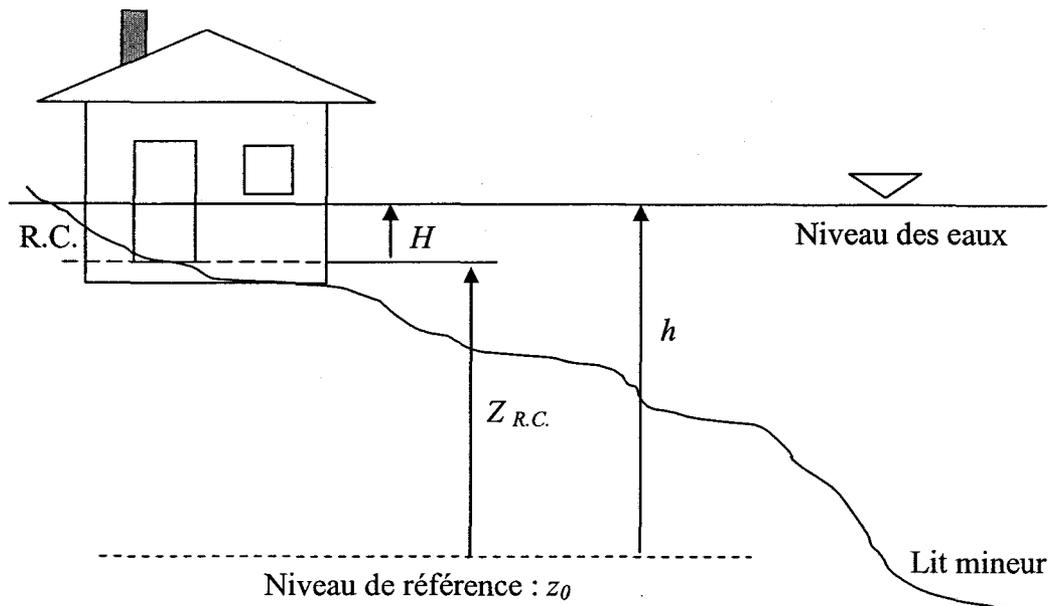


Figure 6 : Définition de la hauteur de submersion utilisée dans la méthode INRS/MEF

- Pour la construction des fonctions, la hauteur de submersion est mesurée pour chaque résidence lorsque c'est possible. Dans le cas contraire, la hauteur de submersion est calculée comme la différence entre l'altitude atteinte localement par la crue (le niveau d'eau) et l'altitude du premier plancher. Le niveau d'eau est établi par simulation avec le logiciel développé à l'INRS, Modeleur, qui exploite le modèle hydrodynamique Hydrosim (Heniche *et al.*, 1999a,b).
- En mode d'exploitation, un modèle de terrain fournit l'altitude du terrain. Lorsque la cote du premier plancher est inconnue, les valeurs de corrections suivantes sont appliquées à la topographie : +0.3 m pour les résidences sans sous-sol, et -1.6m pour les résidences avec sous-sol. Ces valeurs, ajoutées à la cote du terrain donnent une valeur approchée de la cote du premier plancher. Elles sont issues de moyennes effectuées à partir des mesures relevées lors de l'enquête sur le terrain (base de données du Saguenay).
- Le montant des dommages a été déduit par un rétro-calcul à partir de la valeur des indemnisations accordées aux sinistrés, leurs taux étant connus.

Après une enquête de terrain réalisée pour collecter les valeurs au rôle et les hauteurs de submersion atteintes, une analyse statistique a distingué quatre familles de bâtiments :

- Valeur supérieure à 50 000 \$CAD avec sous-sol ;
- Valeur supérieure à 50 000 \$CAD sans sous-sol ;
- Valeur inférieure à 50 000 \$CAD avec sous-sol ;
- Valeur inférieure à 50 000 \$CAD sans sous-sol.

Pour chacune de ces catégories, une loi de Gompertz a été paramétrée pour décrire la relation entre le taux d'endommagement (rapport entre les dommages et la valeur au rôle) et la hauteur de submersion.

Ces courbes, bien que validées sur un échantillon étendu de résidences, sont difficilement généralisables à un autre cas, et ce pour plusieurs raisons. Tout d'abord parce que les données sources sont exclusivement issues de la région du Saguenay, cela pourrait

impliquer une validité limitée à cette région. De plus, la classification faite autour d'une valeur au rôle de 50000 \$ n'est pas nécessairement valable dans une autre région.

Il faut signaler par ailleurs que la définition de la hauteur de submersion considérée ici dans la méthode INRS/MEF (mesure au-dessus du premier plancher) n'est pas celle généralement utilisée. Sans que cela pose un problème d'exactitude des résultats, cette définition produit des courbes moins intuitives que celle qui prend comme niveau de référence le rez-de-chaussée. De ce fait, dans un contexte où la communication est primordiale, les courbes produites héritent d'un certain handicap de lisibilité. Enfin, la question de la finition du sous-sol n'est pas traitée ici alors que c'est un facteur essentiel de vulnérabilité au Québec.

2.2.3 Sources des données

Pour le développement d'outils d'évaluation, les données suivantes sont nécessaires : le type de résidence, le coût des dommages et la hauteur de submersion correspondant à un ou plusieurs sinistres. Pour la validation d'outils d'estimation, il faut disposer en plus de la localisation (coordonnées géographiques précises), afin que la simulation des niveaux d'eau puisse se faire correctement.

Les dommages à l'habitat résidentiel sont les plus recensés et les plus étudiés en raison de l'impact social et médiatique considérable qu'ils occasionnent. Une des conséquences est que le bilan de telles catastrophes s'accompagne la plupart du temps d'une description précise de ces dégâts. C'est donc cette catégorie de dommages qui se prête le mieux à une étude.

Cependant, les informations sur les dommages d'inondation restent difficilement accessibles. Collectées la plupart du temps par les compagnies d'assurances ou par les autorités civiles, leur accès est souvent confidentiel et très réglementé afin de protéger les données privées. Des ententes entre les équipes de recherches et les détenteurs de bases de données doivent souvent être conclues pour permettre l'exploitation des informations.

Il arrive qu'au lieu du coût des dommages subis, la seule information disponible soit les montants des indemnisations accordées, lesquels ne couvrent bien souvent qu'une partie

des pertes subies. Lorsque les règles d'indemnisation sont bien connues, comme c'est souvent le cas pour l'habitat, il est possible d'obtenir le coût du dommage réel par un rétro-calcul (Leclerc *et al.*, 1997).

La hauteur de submersion est une donnée primordiale et indispensable à l'élaboration d'un outil d'estimation de dommages d'inondation. Or, elle n'est pas systématiquement indiquée dans les bases de données. Cela peut ainsi rendre une importante base de données disponible complètement inutilisable à fin d'études. Dans ces cas là, une modélisation hydrodynamique axée sur une topographie précise peut éventuellement permettre de retrouver la hauteur de submersion pour chaque résidence, et ainsi autoriser l'exploitation des données recueillies. Cependant, la marge d'erreur est plus grande dans ce cas à cause des imprécisions inhérentes aux données primaires d'altitudes utilisées (niveau d'eau, topographie, surélévation du plancher principal).

Ainsi, et d'une façon générale, les données de dommages d'inondations sont relativement difficiles à obtenir pour les équipes de recherche.

2.3 Les courbes submersion-dommages

Les courbes submersion-dommages sont utilisées depuis les années 70' pour caractériser les dommages potentiels d'une zone urbaine soumise à un risque d'inondation. Elles constituent un outil précieux pour la prévention des risques, en particulier lorsqu'il est question de décider de mesures de protection ou de constituer un plan d'urbanisme. Les décisions sont alors prises en fonction du rapport coûts/bénéfices.

La vocation des courbes est de permettre une estimation rapide et non biaisée des dommages potentiels engendrés dans un secteur donné par une inondation donnée. La précision, relative quand on ne considère qu'un seul bâtiment, s'avère très acceptable lorsqu'on traite un ensemble de résidences, les surestimations compensant les sous-estimations. En intégrant tous les dommages pour l'ensemble des probabilités d'événement, on obtient la "valeur du risque" à long terme sous la forme d'un coût annuel du risque d'inondation.

2.3.1 Définition

Une courbe submersion-dommages modélise empiriquement à l'aide d'une fonction mathématique, pour un type de bâtiment, une relation entre la hauteur de submersion et les dommages subis. Les dommages sont exprimés en coût monétaire ou bien en taux d'endommagement, rapport entre le montant des dommages et la valeur du bâtiment.

En raison de l'importante hétérogénéité des constructions, une seule courbe submersion-dommages ne peut correspondre à tous les bâtiments. Une typologie permet la distinction de plusieurs catégories de bâtiments aux caractéristiques semblables. Les éléments d'une même catégorie sont alors considérés comme ayant un comportement similaire à la submersion. L'emploi de courbes de submersion-dommages implique en effet l'hypothèse suivante :

Pour une même hauteur de submersion, les dommages (ou taux d'endommagement) portés à des résidences de caractéristiques semblables sont du même ordre.

Une fonction de dommages peut ainsi être construite pour chaque catégorie. La fonction et la courbe résultante sont qualifiées de non biaisées. Cela signifie qu'elles ne sont pas représentatives d'un bâtiment en particulier, mais simplement d'un ensemble de caractéristiques réunies, d'un bâtiment "moyen". Les courbes de submersion-dommages décrivent un comportement type pour une certaine catégorie de bâtiment. Leur vocation est de fournir une bonne estimation non biaisée des dommages pour un ensemble de résidences. Elles constituent de ce fait un outil performant adapté à l'estimation de dommages d'inondation en zones urbaines.

Comme cela a été précisé dans la section 2.1.3.2, les dommages causés par une inondation dépendent aussi de facteurs secondaires, comme la durée de l'inondation ou la vitesse du courant. Ce genre d'information est difficile à recueillir et à prendre en compte, c'est pourquoi seule la hauteur de submersion, le facteur prépondérant, est conservée comme variable explicative des fonctions.

Ainsi que le mentionne la définition de la hauteur de submersion de la partie 2.1.3.2, le plancher principal est pris comme origine de cette variable. Si le niveau d'eau dépasse ce

seuil, la hauteur de submersion est de signe positif. Si le sous-sol est inondé mais que le rez-de-chaussée est épargné, elle est négative. Il est à retenir qu'avec cette définition, une hauteur de submersion négative n'implique pas l'absence d'eau, ni donc l'absence de dommages.

2.3.2 Modes de construction

Il existe deux modes de construction des courbes de submersion-dommages : *a priori* et *a posteriori*.

***a priori* : Méthode théorique**

Cette façon de procéder ne fait appel à aucune donnée de dommages témoignant d'une inondation passée, d'où la mention "*a priori*".

Il s'agit ici de faire appel à un expert en sinistres capable d'imaginer la résidence-type pour chaque catégorie étudiée, et d'évaluer pour chacune l'évolution des dommages en fonction de la hauteur de submersion. C'est un travail extrêmement rigoureux et conséquent qui demande une très bonne expérience dans l'évaluation des dommages d'inondation. Cela implique de connaître les caractéristiques de l'habitat "moyen" mais aussi le coût des matériaux et des réparations standard.

Avantages

Cette méthode peut palier à un manque de données et ainsi permettre de contourner l'impossibilité de construire des courbes *a posteriori*.

L'expertise d'un professionnel est garante d'une bonne prise en compte du comportement "classique" d'une résidence soumise à la submersion.

Inconvénients

Une telle étude effectuée par un professionnel peut se révéler longue et relativement coûteuse. La caractérisation de la situation implique beaucoup d'investigations pour définir avec précision les enjeux et les dommages potentiels. D'autre part, le fait que la

courbe ne soit pas basée sur des dommages réels masque les exceptions, le "bruit" qui témoigne de l'hétérogénéité de l'habitat. Des caractéristiques locales importantes peuvent ainsi être masquées et conduire à des courbes légèrement erronées.

***a posteriori* : Méthode empirique**

Cette méthode consiste à exploiter une ou plusieurs bases de données contenant des informations sur des dommages d'inondation. Pour chaque résidence touchée, on dispose des caractéristiques générales de la résidence, du montant des dommages et de la hauteur d'eau atteinte.

Pour chaque catégorie de bâtiment, on représente dans un graphique les dommages ou le taux d'endommagement en fonction de la hauteur de submersion. La courbe de submersion-dommages est définie comme la courbe de régression optimale pour le nuage de points obtenu.

Avantages

La courbe est construite à partir de cas réels et, de ce fait, prend en compte naturellement les éventuelles particularités locales. Les exceptions autant que les caractéristiques courantes sont considérées correctement à condition que l'échantillon soit suffisamment grand.

La réalisation de telles fonctions ne nécessite pas impérativement la participation d'un expert et se révèle à ce titre moins onéreuse.

Inconvénients

L'accès aux données de base pose souvent problème et peut rendre difficile la construction des fonctions. Les gammes de hauteurs d'eau et de types de résidence étudiés sont parfois insuffisamment représentées pour permettre une régression fiable. La qualité et la richesse des bases de données conditionnent donc la fiabilité des courbes.

2.3.3 Limites de validité

Comme tout outil ou méthode, les fonctions de dommages connaissent certaines limites. Celles associées au manque éventuel de données et concernant uniquement les courbes *a posteriori* ont été abordées au paragraphe précédent. Les limites mentionnées ci-après s'appliquent aux courbes niveau-dommages en général.

Limites de transférabilité spatiale

Une courbe de dommages est construite pour un type particulier d'habitat. Or, certaines caractéristiques de construction, surtout résidentielles, sont souvent typiques d'une région. L'habitat diffère plus ou moins sensiblement d'une région à une autre, au niveau des matériaux utilisés comme au niveau de l'architecture.

Sauf cas particulier, une courbe de dommages n'est pas nécessairement applicable dans un autre pays que celui dans lequel elle a été créée. Cela peut aussi être le cas entre deux régions ou deux provinces d'un même pays dont les habitats diffèrent.

C'est la raison pour laquelle il existe un si grand nombre de courbes. Toute instance qui choisit d'utiliser cet outil ne peut pas, *a priori*, employer des courbes conçues dans un autre contexte. De courbes appropriées doivent être utilisées, et élaborées si besoin.

Limites de transférabilité dans le temps

Les fonctions de dommages ont une durée de validité limitée. En effet, l'évolution du mode de vie et des techniques de construction influent sur la conception de l'habitat et donc sur sa vulnérabilité. Ces changements sont plus ou moins rapides et significatifs, mais ils doivent être considérés avant d'utiliser des courbes pré existantes afin d'en évaluer la validité.

Le cours économique des matériaux subit des variations qui se répercutent sur les dommages en cas d'inondation. Même si ce paramètre reste mineur la plupart du temps, il peut devenir non négligeable dans certains contextes.

Ces variations influencent davantage les fonctions de dommages que les fonctions d'endommagement. La valeur d'endommagement est en effet plus stable dans le temps que les dommages monétaires à cause de sa valeur relative adimensionnelle (Torterotot, 1993). L'utilisation du taux d'endommagement permet donc une meilleure robustesse des courbes dans le temps.

2.3.4 Cadre d'application

Les fonctions ou courbes de dommages sont adaptées à l'estimation des dommages cumulatifs sur l'ensemble d'une zone à risque. Si les courbes utilisées sont génériques, les bâtiments ne sont pas analysés individuellement et la même courbe s'applique à tous les bâtiments d'une même catégorie. Le calcul des dommages totaux sur la zone étudiée se trouve ainsi facilité. La sommation de toutes les évaluations individuelles donne alors une estimation non-biaisée des dommages sur l'ensemble du secteur.

Lorsqu'une typologie d'habitat est établie pour une zone d'étude, et si les données disponibles le permettent, l'estimation rigoureuse des dommages cumulatifs nécessite une courbe pour chacune des catégories en présence.

Dans un contexte d'étude de risques d'inondation d'un secteur résidentiel, l'utilisation des courbes exige les informations suivantes :

Données hydrauliques

- La cote d'altitude des eaux correspondant aux crues étudiées sur l'ensemble de la zone considérée (définie à partir de crues de référence connues ou bien d'un modèle hydrologique).

Pour chaque résidence du secteur étudié

- La cote d'altitude (mesurée directement ou bien fournie par un modèle numérique d'altitude d'après la position de la résidence dans le terrain).
- Le type de résidence (indique quelle courbe doit être utilisée).

- La hauteur du plancher principal par rapport au terrain, idéalement connue pour chaque résidence, mais le plus souvent déduite à partir d'une valeur moyenne standard fixée pour chaque catégorie.

A partir de ces données, la hauteur de submersion est déduite et l'application de la courbe appropriée donne une estimation des dommages pour les crues d'intérêt. L'estimation des dommages totaux sur l'ensemble du secteur est ensuite donnée par la sommation de tous les dommages individuels calculés grâce aux courbes. En intégrant les dommages par rapport à l'ensemble des probabilités de crue, on obtient la valeur du coût annuel du risque.

2.3.5 Intégration à un SIG

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) offrent la possibilité de représenter spatialement une multitude de phénomènes et de données spatialisées, notamment les risques d'inondation. De plus, ces outils permettent des calculs entre différentes couches de données. Ces caractéristiques les rendent particulièrement utiles pour la gestion des risques naturels, en particulier des risques d'inondation pour lesquels la dimension spatiale est primordiale.

Les courbes de submersion-dommages sont caractérisées par des fonctions mathématiques qu'il est possible d'intégrer dans un SIG. Les résidences sont représentées spatialement grâce à leurs coordonnées géographiques. Les informations qui les concernent comme le type, la valeur, la hauteur du plancher, sont contenues dans une base de données associée.

Un modèle numérique de terrain donne l'altitude du terrain de chaque résidence si cette information n'est pas contenue dans la base de données. Une cote de crue est définie pour représenter la crue simulée. Cette donnée peut être éventuellement calculée par un modèle hydrodynamique.

La hauteur de submersion est ensuite calculée pour chaque résidence à partir de l'altitude du terrain et du niveau d'eau de l'inondation simulée. Pour chaque bâtiment, le SIG calcule une estimation des dommages en utilisant la courbe adéquate. Le montant total de

l'évaluation des dommages pour l'ensemble de la zone est obtenu en faisant la somme des dommages calculés pour chaque construction.

La Figure 7 représente un organigramme de principe de calcul d'estimation de dommages par un SIG utilisant des fonctions de dommages.

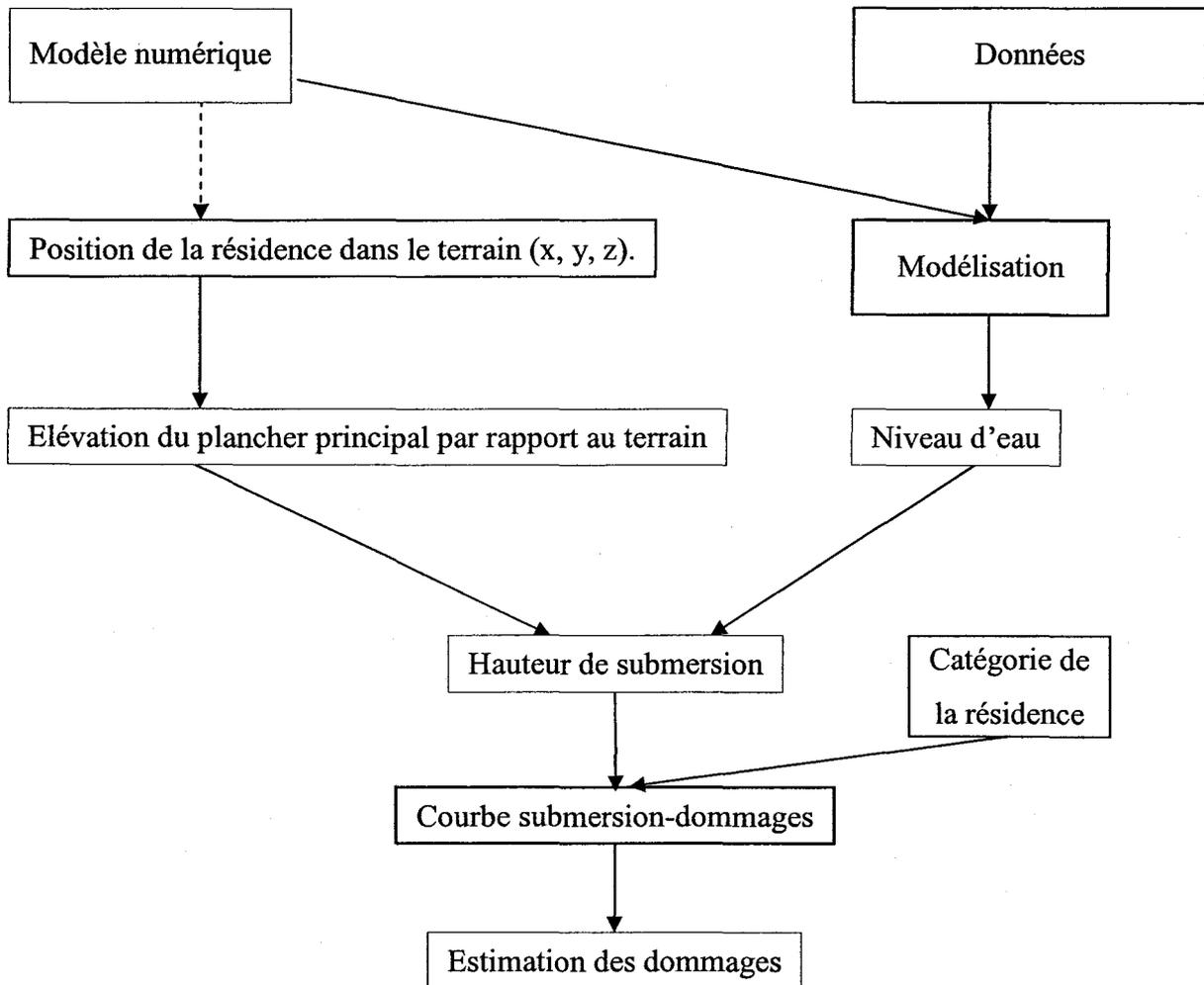


Figure 7 : Principe d'utilisation des courbes dans un Système d'Information Géographique (SIG) pour un type de résidence et une crue donnés

2.4 Revue de courbes existantes

Étudiées et utilisées depuis une trentaine d'années, les courbes de dommages font aujourd'hui partie intégrante des outils d'analyse des risques d'inondation.

L'émergence et l'application désormais répandue du principe du coûts/bénéfices ont mis de l'avant l'importance de caractériser les dommages potentiels afin de fournir à chaque problème d'inondation une réponse adaptée. Les courbes niveau-dommages sont à ce titre un outil efficace qui permet l'évaluation rapide des dommages potentiels d'un secteur à risque. La présence récurrente des courbes niveau-dommages dans les publications atteste de leur pertinence pour les études de risques d'inondation. Afin d'illustrer ce propos, voici une revue de quelques travaux d'origines diverses ayant fait appel à des courbes.

Au niveau international

Les courbes de niveau-dommages ont été utilisées un peu partout dans le monde, que ce soit en Europe, en Chine ou aux États-Unis. Parmi les organismes de recherche qui ont exploité cet outil, on peut citer pour la France le Bureau Central d'Études pour les Équipements d'Outre-Mer (BCEOM, 1997), le Centre de Recherche pour la Gestion des Ressources Naturelles (CERGRENE, 2004) (devenu le Centre d'Enseignement et de Recherche Eau, Ville, Environnement : le CERREVE), la Société Grenobloise d'Études et d'Applications Hydrauliques (SOGREAH, 1994) et pour l'Angleterre le Flood Hazard Research Center, Middlesex University (Penning-Rowsell, 1997). Pour les États-Unis, l'organisme principal est le US Army Corps of Engineers (USACE, 1996 ; 2000).

Au niveau canadien

Des études ont été réalisées principalement en Ontario (Kilborn Ltd., 1982) ; (McBean *et al.*, 1988a, b). Le ministère des Ressources naturelles de l'Ontario a publié plusieurs documents traitant des risques d'inondation où figurent des courbes de dommages, notamment le Guide d'évaluation des dommages causés par les inondations, 1990.

Au niveau québécois

Une étude québécoise menée en 1977 par le Centre de Recherches en Aménagement Régional (CRAR, 1977) de l'Université de Sherbrooke a effectué des projections jusqu'en 2030 à l'aide de courbes de dommages sectorielles. Le rapport porte sur l'évaluation des dommages causés par les inondations en 1976, à divers niveaux d'élévation des eaux de la rivière Richelieu et de la Baie Missisquoi sur le Haut-Richelieu, accompagnée de projections pour les années 1976-2030.

Plus récemment, l'étude menée par une équipe de l'INRS-ETE a construit des courbes submersion-dommages à partir de données liées aux inondations du Saguenay en 1996 (Leclerc *et al.*, 1997, 2003).

Appréciation de ces courbes dans le contexte de cette étude

Comme il en est fait mention dans la section 2.3.3, l'utilisation d'une courbe de dommages applicable via les paramètres individuels des bâtiments ne peut se faire que sous certaines conditions. Il s'avère que les courbes mentionnées au paragraphe précédent sont concernées par ces limites dans le cadre d'une utilisation potentielle au Québec.

Limitation régionale

Une courbe niveau-dommages n'est valide et applicable que si les constructions sont comparables à celles existant dans la région d'origine pour laquelle a été conçue la courbe. Sauf exception et en raison de la diversité de l'habitat, une courbe de dommages n'est pas transposable, d'où la profusion de courbes existantes. Il n'existe pas de courbes universelles, et pour chaque nouvelle étude, il est souvent nécessaire d'en établir de nouvelles.

L'habitat au Québec n'a pas d'équivalent connu à l'étranger. Rien ne permet d'affirmer qu'il est similaire à celui d'autres provinces canadiennes, et encore moins à celui des Etats-Unis. Par conséquent, toutes les données et les courbes originaires de l'extérieur du Québec mentionnées précédemment sont considérées comme inapplicables au contexte québécois.

De même, les courbes réalisées à partir des données du Saguenay, Leclerc *et al.* (1997), apparaissent quant à elles trop spécifiques à l'évènement exceptionnel de 1996 pour être considérées applicables à l'ensemble du Québec.

Limitation dans le temps

Des courbes créées par le passé pour la zone étudiée dans un contexte socio-économique différent ne sont pas forcément applicables aujourd'hui. Le mode de vie et les procédés de construction changent ce qui peut rendre caduques des courbes existantes.

Cette limitation peut concerner les données et les résultats de l'étude menée à Sherbrooke en 1977 (CRAR, 1977). Les données originales de cette étude ont malheureusement été perdues, et malgré leur probable invalidité actuelle, il aurait été intéressant de les étudier.

3 MÉTHODOLOGIE

L'étude présentée ici reprend la méthode de Leclerc *et al.* (1997, 2003) détaillée au paragraphe 2.2.2. Celle-ci considère les dommages résidentiels de façon individualisée pour chaque résidence. Cette approche est bien adaptée à la répartition hétérogène de l'habitat québécois. En revanche, les catégories de résidences établies en fonction de la valeur au rôle n'ont pas été conservées en raison du caractère local de ces valeurs. De plus, la hauteur de submersion a ici été exprimée à partir du rez-de-chaussée.

3.1 Choix méthodologiques

Variables d'intérêt

Il a été décidé de construire des fonctions exprimant le taux d'endommagement (varie entre 0, pour aucun dommage, et 1, pour 100% de dommages) en fonction de la hauteur de submersion en mètres. Dans un souci de lisibilité des courbes, l'origine de la variable hauteur de submersion (le « zéro ») correspond au niveau du plancher principal, soit le rez-de-chaussée.

Limitation aux dommages résidentiels à la structure

Comme c'est souvent le cas pour la plupart des bases de données concernant les inondations, deux des trois bases disponibles pour l'étude témoignent uniquement des dommages résidentiels à la structure. De plus, ceux-ci ont une variabilité moins grande que les dommages portés aux biens matériels, ce qui favorise le développement d'outils d'estimation. Les dommages résidentiels à la structure étant de très loin les plus coûteux et les plus facilement appréciables, il est tout à fait justifié de se limiter à leur évaluation pour la construction de courbes submersion-dommages.

Portée des courbes étendue à l'ensemble du Québec

Construire des courbes de portée régionale implique de n'utiliser que des bases de données provenant de la région étudiée, à savoir dans le cadre original, les rives du Saint-

Laurent. Cela écartait donc de l'étude la base de données du Saguenay. Or le nombre de données locales spécifiques aux rives du Saint-Laurent est insuffisant pour permettre la construction de courbes. L'utilisation des données du Saguenay s'avère par conséquent indispensable pour mener à bien le projet.

Aussi, en raison des provenances diverses des données, l'objectif a donc été modifié pour finalement devenir la réalisation de courbes génériques québécoises (applicables sur l'ensemble du Québec).

Catégories de bâtiments traitées

Autant que possible, pour chaque type de bâtiment menacé, une courbe submersion-dommages doit être construite. Le domaine résidentiel québécois est composé en très grande majorité de résidences à un ou deux étages, avec ou sans sous-sol. La présence d'un sous-sol, très courante mais non systématique, influe sur la vulnérabilité d'une résidence, de même que la qualité du sous-sol (fini ou non). Ces facteurs sont par conséquent à considérer dans cette étude. Les caractéristiques de l'habitat résidentiel québécois qui viennent d'être mentionnés ont ainsi permis de définir les catégories pour lesquelles seraient construites des courbes.

Les objectifs sont donc les suivants :

Construction de courbes de dommages résidentiels à la structure, pour l'habitat québécois, et pour les six catégories suivantes, le rez-de-chaussée étant considéré comme un étage :

1 étage avec sous-sol fini

1 étage avec sous-sol non fini

1 étage sans sous-sol

2 étages avec sous-sol fini

2 étages avec sous-sol non fini

2 étages sans sous-sol

3.2 Les données de submersion-dommages

3.2.1 Collecte des données

La base de données québécoise montée par une équipe de l'Université de Sherbrooke en 1977 et mentionnée à la partie 2.4 n'a pu être retrouvée. Même si l'on peut craindre que ces informations ne correspondent plus au contexte actuel, il aurait été intéressant de le vérifier et de les confronter avec les données d'aujourd'hui.

Au total, trois bases de données ont été utilisées pour construire les nouvelles courbes de dommages.

Echantillon du Saguenay, 1996 (N=130)

Suite aux inondations majeures survenues dans la région du Saguenay en juillet 1996, le ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec a confié à l'INRS-Eau le mandat d'établir une relation entre les dommages résidentiels immobiliers et le niveau d'eau (Leclerc *et al.*, 1997). Une base de données a été constituée dans le cadre de cette étude.

Les données de dommages sont issues des montants de dédommagement établis par les services financiers du Ministère de la Sécurité Publique à Jonquière. Un décret gouvernemental fixait exceptionnellement une indemnisation de 100 % pour des dommages allant jusqu'à \$100 000, et de 75 % pour des dommages supérieurs (Leclerc *et al.*, 1997). Les dommages réels ont ainsi pu être déduits des indemnités accordées grâce à un rétro-calcul.

Les municipalités concernées ont communiqué les valeurs des évaluations municipales des résidences touchées. Les hauteurs de submersion, indispensables pour une telle étude n'étaient disponibles que pour la ville de Laterrière. Les 130 données utilisées dans la présente étude proviennent donc de cette municipalité.

Remarque: en raison de l'importance exceptionnelle de la crue, les hauteurs d'eau sont relativement bien réparties entre les faibles et les hautes, comparativement à d'autres

bases de données. Une certaine lacune peut cependant être constatée dans les faibles hauteurs d'eau pour les résidences avec sous-sol.

Echantillon de Sorel, (N=38)

Le secteur des îles de Sorel est fréquemment inondé (présence d'eau dans les sous-sols environ tous les deux ans). Il compte de nombreuses résidences ou chalets sur pilotis. Souvent, les habitations sont bâties sur un terrain surélevé et avec des sous-sols non aménagés. Les résidents sont habitués aux inondations et sont pour la plupart préparés à y faire face. Très peu finissent leur sous-sol et, le cas échéant, la plupart possèdent des pompes de puisard et des génératrices pour suppléer aux coupures de courant imposées en de telles circonstances.

Une inondation relativement importante s'est produite le 31 mars 1998. Une enquête sur les dommages causés par cette inondation auprès de la population a été effectuée à l'automne 2003. Une carte de la crue de 1998 a permis de localiser les résidences touchées. L'enquête a consisté en un questionnaire soumis aux habitants rencontrés vivant dans les zones touchées. Cela a permis de recenser les dommages causés par l'inondation de 1998 ainsi que les hauteurs de submersion associées. Les valeurs au rôle des résidences ont été fournies par le Ministère de la Sécurité Publique. Le formulaire utilisé lors de l'enquête de terrain est présenté en annexe.

Remarque: les hauteurs de submersion sont relativement faibles et la plupart du temps négatives, le rez-de-chaussée ayant été très rarement touché.

Echantillon de Châteauguay, (N=39)

Une inondation en bordure du lac Saint-Louis s'est produite les 15 et 16 janvier 1996 suite à un embâcle sur la rivière Châteauguay. Riveraine du lac Saint-Louis, la municipalité du même nom a été touchée.

Les données de dommages sont issues d'un rapport d'expertise produit par la firme Dessau-Soprin (1998), conjointement avec l'agence de réclamations Saucier.

Remarque: les hauteurs de submersion sont assez faibles et souvent négatives. Cela indique que les rez-de-chaussée ont été là encore peu touchés.

3.2.2 Fusion des bases de données

Avant de construire des courbes de dommages à partir de plusieurs bases de données régionales et parfois hétérogènes, il faut procéder à la fusion de ces dernières afin de travailler sur un seul échantillon.

En accord avec les choix méthodologiques effectués, l'homogénéisation consiste à extraire et à uniformiser les données suivantes :

- 1- Identification de la catégorie de résidence ;
- 2- Hauteur de submersion exprimée en mètres avec comme origine le plancher principal ;
- 3- Expression des dommages en taux d'endommagement.

Une fois ces opérations effectuées, les bases sont désormais compatibles et peuvent être assemblées et exploitées comme une base unique. Les données sont ensuite réparties selon les catégories de résidences pour définir les différentes fonctions d'endommagement.

Tableau 2 : Récapitulatif des différents échantillons utilisés

	1 étage			2 étages			Total (N)
	Sous-sol fini	Sous-sol non fini	Sans sous-sol	Sous-sol fini	Sous-sol non fini	Sans sous-sol	
Saguenay	81	0	49	0	0	0	130
Sorel	1	23	1	0	13	0	38
Châteauguay	8	0	1	5	2	8	39
Total	90	23	51	5	15	8	207

3.3 Développement des fonctions de submersion-dommages

3.3.1 Principes de construction

3.3.1.1 Protocole général

Après la fusion des différentes bases, les données sont réparties par catégories de résidence. Il existe alors pour chaque catégorie un certain nombre de couples hauteur de submersion / taux d'endommagement. Une courbe de dommages correspond à une régression optimale de ces couples représentés dans un graphique.

Les dommages d'inondation sont un type de données particulier. La fonction qui relie le taux d'endommagement à la hauteur de submersion est généralement monotone, continue, définie positive entre 0 et 1, croissante et ayant une forme en "S" (Dantzig, 1956). C'est une information importante dont il faut tenir compte dans la construction des courbes, en particulier lorsque la répartition des points pose problème.

Certaines catégories comptent très peu de données ce qui rend difficile la construction de courbes (ex. : un étage avec sous-sol non fini). Dans d'autres cas, les hauteurs de submersion disponibles forment une répartition déséquilibrée, les hauteurs importantes étant sporadiquement représentées, voire absentes. Afin de pallier les faiblesses des données, il est possible de s'appuyer sur des indications d'experts en sinistres et d'appliquer certaines règles simples de construction.

3.3.1.2 Indications d'experts

Afin d'obtenir de précieuses indications sur certains points clés des courbes, des professionnels experts en sinistres ont été contactés :

Mme Tardif, Ministère de la Sécurité Publique

M. Bujold, CGI Inc.

M. Bérubé, Groupe Evimbec

Ces intervenants ont fourni des estimations sur le comportement des dommages au voisinage des seuils critiques que sont les planchers et la valeur relative de chaque plancher pour les différentes catégories (Tableau 3). Ces informations ont été très utiles lors du paramétrage des fonctions. En voici les principaux tenants :

- La hauteur de plafond est d'après les experts une constante qui peut être fixée à 8 pieds quel que soit l'étage considéré.
- Pour les résidences à deux étages, la submersion du deuxième étage fait croître rapidement le taux d'endommagement vers 1.
- Confirmation du seuil observé dans les données de submersion pour les résidences avec sous-sol. On constate en effet une augmentation nette du taux d'endommagement pour une submersion de -0.5 m. Dans cette situation, le plancher se trouve exposé à une humidité extrême. Les solives se trouvent directement exposées et sont alors endommagées.

Tableau 3 : Valeurs relatives des étages par rapport à la valeur totale de la résidence pour les différentes catégories traitées

Type	Sous-sol	RDC	2 ^{ème} étage	Total
1 étage avec sous-sol fini	35	65	-	100
1 étage avec sous-sol non fini	10	90	-	100
1 étage sans sous-sol	-	100	-	100
2 étages avec sous-sol fini	25	50	25	100
2 étages avec sous-sol non fini	10	60	30	100
2 étages sans sous-sol	-	30	70	100

Ces informations issues des contacts avec les professionnels en sinistres ont valeur indicative et permettent d'orienter les courbes lorsqu'il y a incertitude. Bien que les données empiriques restent la matière première des courbes de submersion-dommages, ces précisions sont un soutien précieux dans la production de courbes réalistes.

Cas particulier des résidences à deux étages

En raison du nombre insuffisant de données disponibles pour les catégories de résidences à deux étages (Tableau 2), il s'avère hasardeux, voire impossible de construire des courbes uniquement par simple régression.

La solution de palliation soumise aux experts consiste à prendre comme base de départ les équations des catégories à un seul étage. Par exemple, pour les résidences à deux étages avec sous-sol fini, les équations initiales de travail ont été celles élaborées pour les résidences à un étage avec sous-sol fini. Par la suite, les équations ont été ajustées afin que le tracé des courbes respecte les valeurs relatives des différents étages qui sont précisées dans le Tableau 3. Enfin, la gamme de valeurs de submersion a été augmentée pour pouvoir représenter les submersions concernant le deuxième étage. En raison de l'absence de données de submersion extrême, le tracé pour le deuxième étage est extrapolé à partir d'une loi de Gompertz. Cela permet d'assurer une croissance rapide du taux d'endommagement, conformément aux recommandations des experts.

3.3.2 Techniques de construction

3.3.2.1 La loi de Gompertz

Une courbe de dommages repose sur une fonction mathématique empirique appropriée au phénomène et paramétrée par régression. Les types de courbes les plus couramment utilisés pour les régressions sont les suivants : *linéaire, exponentielle, polynomiale, logarithmique*. D'autres courbes plus élaborées, combinant différents types comme la loi de Gompertz, peuvent à l'occasion s'avérer mieux adaptées.

La loi de Gompertz a été initialement employée pour représenter un comportement de croissance en économie (Ayres, 1972 ; Jantsch, 1977) ainsi qu'en biologie. Elle a la particularité d'avoir une forme en "S", d'être croissante, positive et continue ainsi que d'évoluer entre 0 et 1. De plus, la forme en "S" de la loi de Gompertz n'est pas symétrique et s'étire différemment de chaque côté du point d'inflexion ce qui permet de mettre plus de poids par unité de submersion au départ de la courbe. Elle répond ainsi parfaitement aux caractéristiques décrites par Dantzig (1956) concernant les fonctions de dommages

(3.3.1.1). De plus, comme les valeurs de cette fonction sont comprises entre 0 et 1, cette loi est particulièrement adaptée à la représentation du taux d'endommagement. La loi de Gompertz est ainsi utilisée pour des études de risques, entre autres par des compagnies d'assurances.

Cette fonction possède trois paramètres ajustables : a , b , k . Son expression est la suivante :

$$Txe = a.e^{-b}.e^{-k.H} \quad [2]$$

Où Txe est le taux d'endommagement et H la hauteur de submersion par rapport au plancher principal.

En première approche, la loi de Gompertz a été appliquée à chaque catégorie sur l'ensemble des hauteurs de submersion.

3.3.2.2 *Distinction de domaines de validité*

Le comportement de la loi de Gompertz correspond de façon générale à celui des dommages en fonction de la submersion. Cependant, on constate que dans le détail, et principalement pour les faibles submersions, une seule loi de Gompertz ne peut traduire fidèlement l'évolution des dommages. La gamme de submersion a donc été scindée, en deux sous-domaines pour les résidences à un étage, et en trois pour les résidences à deux étages. Une fonction particulière a été paramétrée pour chacun des sous-domaines ainsi formés. Pour certains de ces domaines, c'est une nouvelle équation de Gompertz qui a été employée, dans les autres cas, c'est l'exponentielle qui a présenté de meilleurs résultats.

L'exponentielle est le deuxième type de fonction qui a été utilisé. Elle a deux paramètres d'ajustement, a et b :

$$Txe = a.e^{-b.H} \quad [3]$$

Où Txe est le taux d'endommagement et H la hauteur de submersion par rapport au plancher principal.

3.3.2.3 Paramétrage

Le paramétrage des équations doit respecter plusieurs contraintes :

- Produire une courbe globalement en "S".
- Faire correspondre la courbe au jeu de données de façon optimale en minimisant l'erreur résiduelle.
- Respecter les indications fournies par les experts consultés.
- Assurer la continuité entre les courbes des différents domaines conformément à Dantzig (1956) qui établit la continuité du taux d'endommagement en fonction de la hauteur de submersion.

La méthode utilisée n'a pas nécessité d'imposer des valeurs de pente pour aucune courbe comme cela se pratique parfois (Leclerc *et al.*, 2003). Pour plus de souplesse dans la réalisation des courbes, le paramétrage a été réalisé pas à pas par l'opérateur et non de façon automatique. De cette façon, le respect des contraintes de paramétrage énoncées précédemment, et dont la plupart font appel au jugement du "bon sens", a pu être contrôlé.

3.3.2.4 Outils utilisés

Les logiciels utilisés ont été Matlab™ et Excel™. Matlab a permis d'estimer les paramètres des équations de façon automatique pour une première approche. Les ajustements des équations et le tâtonnement ont été réalisés avec Excel ainsi que les calculs d'erreurs.

3.3.2.5 Calcul d'erreur

Le paramètre d'erreur qui a été utilisé pour le paramétrage des courbes et pour la validation correspond à la différence entre les dommages simulés et les dommages réels ramenée en pourcentage du total des dommages réels.

4 RÉSULTATS

4.1 Résidences à un étage

4.1.1 Avec sous-sol fini

L'essentiel des données pour cette catégorie provient du Saguenay. Les experts contactés nous ont permis d'ajuster l'allure de la courbe et le positionnement du point d'inflexion. Il existe une grande dispersion des données, en particulier au niveau du plancher principal. Le bruit est très important, en raison de la variabilité de la vulnérabilité des résidences. A hauteur de submersion égale, les dommages peuvent différer de façon importante malgré un comportement théoriquement relativement similaire. Cela illustre la difficulté d'établir des courbes de submersion-dommages représentatives, et aussi le fait que ces dernières ne sont performantes qu'en moyenne, à l'échelle d'un ensemble et non individuellement, pour une résidence seule. Dans les cas où malgré un faible niveau d'eau les dommages sont très importants, c'est l'altération majeure des fondations qui entraîne des frais considérables.

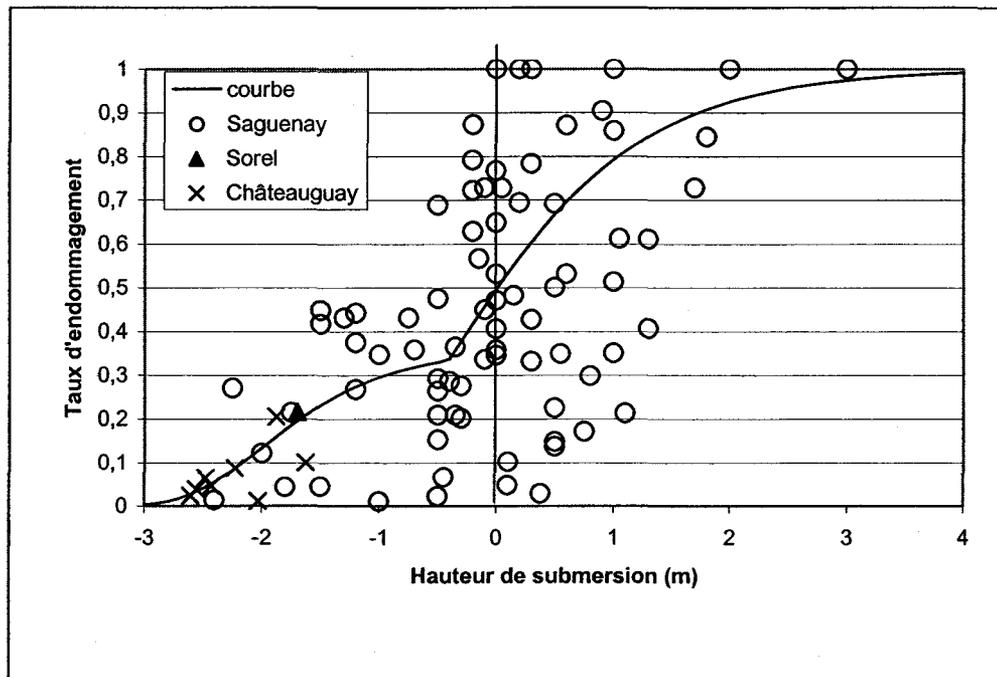


Figure 8 : Courbe de submersion-dommages pour les résidences à un étage avec sous-sol fini

Tableau 4 : Equations de la courbe pour les résidences à un étage avec sous-sol fini

Domaine	$H < -0.4$	$H \geq -0.4$
Équation	$Txe = 0.36 \exp(-0.04 \exp(-1.6 H))$	$Txe = \exp(-0.7 \exp(-1.1 H))$

Erreur : + 13 %

Cette surestimation de 13 % provient de la dispersion des données mais témoigne néanmoins de la bonne estimation fournie par la courbe élaborée.

4.1.2 Avec sous-sol non fini

L'intégralité des données de cette catégorie provient des îles de Sorel. L'inondation de 1998, bien que de grande portée spatiale, n'a engendré que de faibles hauteurs de submersion H à cause de l'orographie régulière dans cette région. Pour les hauteurs supérieures, une loi de Gompertz en continuité avec l'exponentielle des faibles hauteurs a été utilisée. Comme pour la catégorie avec sous-sol fini, certaines résidences ont vu leurs fondations très endommagées pour des hauteurs relativement modestes (-1,2 m ; -0.7 m ; -0.3 m).

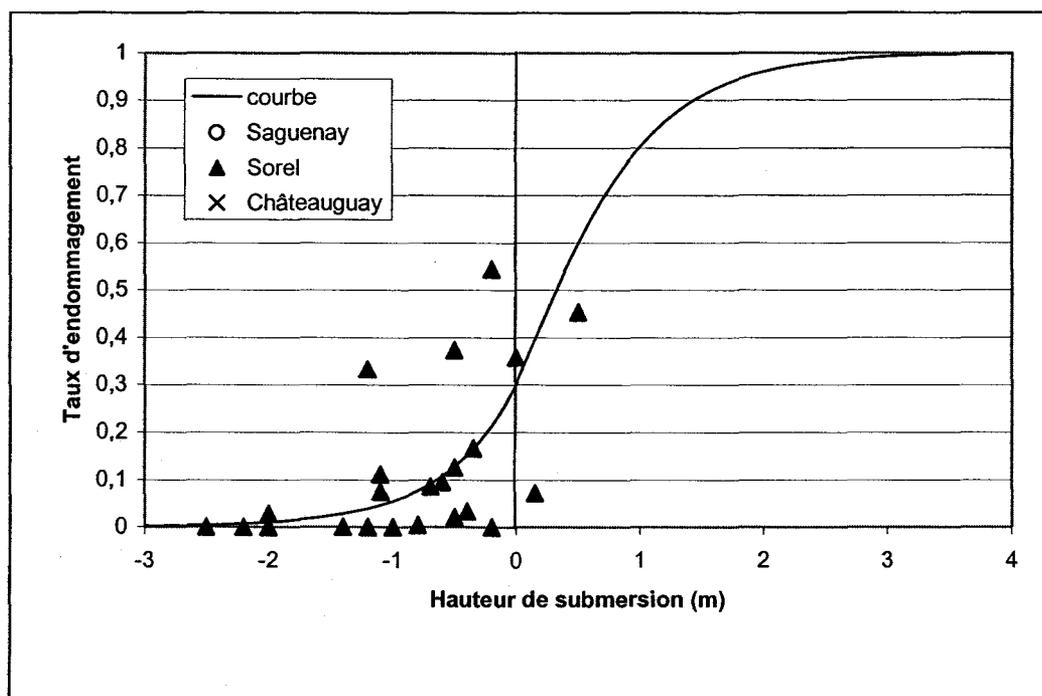


Figure 9 : Courbe de submersion-dommages pour les résidences à un étage avec sous-sol non fini

Tableau 5 : Equations de la courbe pour les résidences à un étage avec sous-sol non fini

Domaine	$H < 0$	$H \geq 0$
Équation	$Txe = 0.3 \exp(1.7 H)$	$Txe = \exp(- 1.2 \exp(-1.7 H))$

Erreur : - 3.6 %

Ce bon résultat s'explique par des données assez homogènes. On peut malgré tout regretter la taille de l'échantillon un peu faible, en particulier pour les fortes hauteurs d'eau.

4.1.3 Sans sous-sol

Pour cette catégorie, la grande majorité des données correspondent à des submersions au-dessus du plancher principal et sont originaires du Saguenay. Une loi de Gompertz a été employée pour les hauteurs positives. Une exponentielle en continuité avec la loi de Gompertz décrit le comportement de l'endommagement pour les hauteurs négatives.

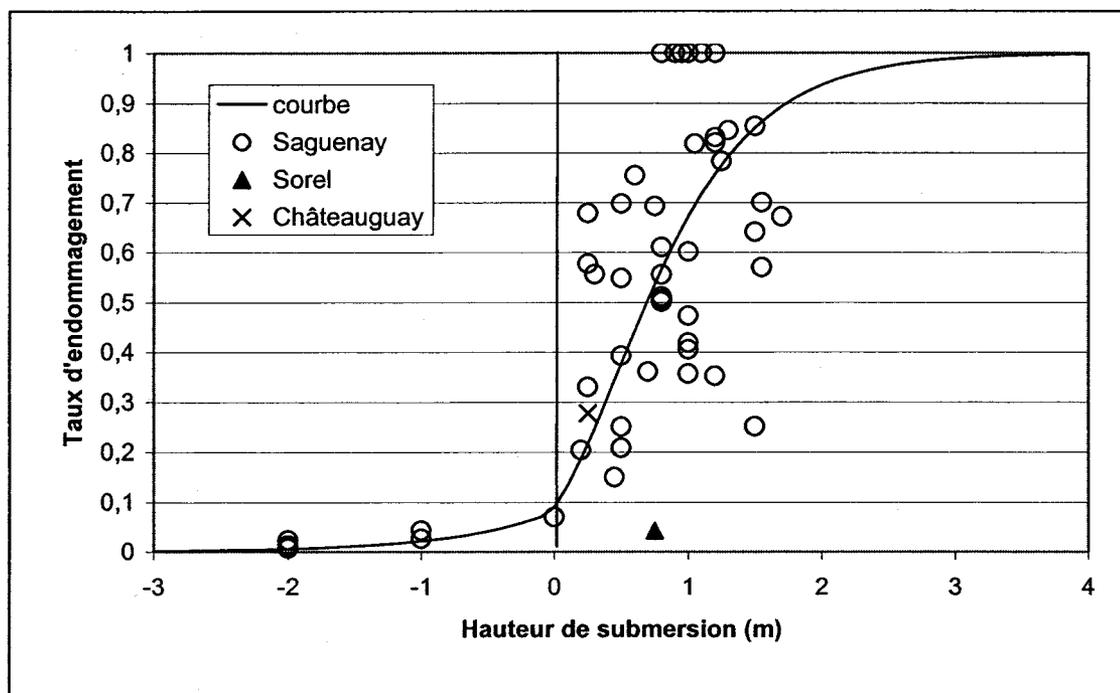


Figure 10 : Courbe de submersion-dommages pour les résidences à un étage sans sous-sol

Tableau 6 : Equations de la courbe pour les résidences à un étage sans sous-sol

Domaine	$H < 0$	$H \geq 0$
Équation	$Txe = 0.08 \exp(1.3 h)$	$Txe = \exp(-2.4 \exp(-1.8 h))$

Erreur : + 2.9 %.

Là encore, le nuage de points est assez équilibré sans forte dispersion. Le tracé de la courbe est dans ce cas assez explicite.

4.2 Résidences à deux étages

Le traitement a été imposé à l'étude malgré le peu de données disponibles. Le seul recours est la construction des courbes par extrapolation selon des règles essentiellement dictées par les indications d'experts (3.3.1.2).

Il existe relativement peu de résidences à deux étages au Québec. Cela implique qu'une telle extrapolation est permise compte tenu de la faible part que représentent les dommages portés à cette catégorie par rapport au total des dommages lors d'une inondation.

Comme il a été précisé dans la partie 3.3.1.2, l'allure des courbes jusqu'au deuxième plancher a été inspirée par les résultats obtenus pour les résidences à un étage. La valeur proportionnelle de chaque étage et l'allure de la courbe au-delà du deuxième plancher ont été définies à partir des indications des experts interrogés.

4.2.1 Avec sous-sol fini

Très peu de données ($N=5$) sont disponibles pour cette catégorie. Il est par conséquent difficile de considérer comme représentatif leur répartition compte tenu de la variabilité considérable de ce genre de données. La courbe a été conçue sur le modèle de celle conçue pour les résidences à un étage avec sous-sol fini, sans tenir compte des données. Les indications des experts ont ensuite permis l'adaptation de ce modèle de départ à une résidence à deux étages.

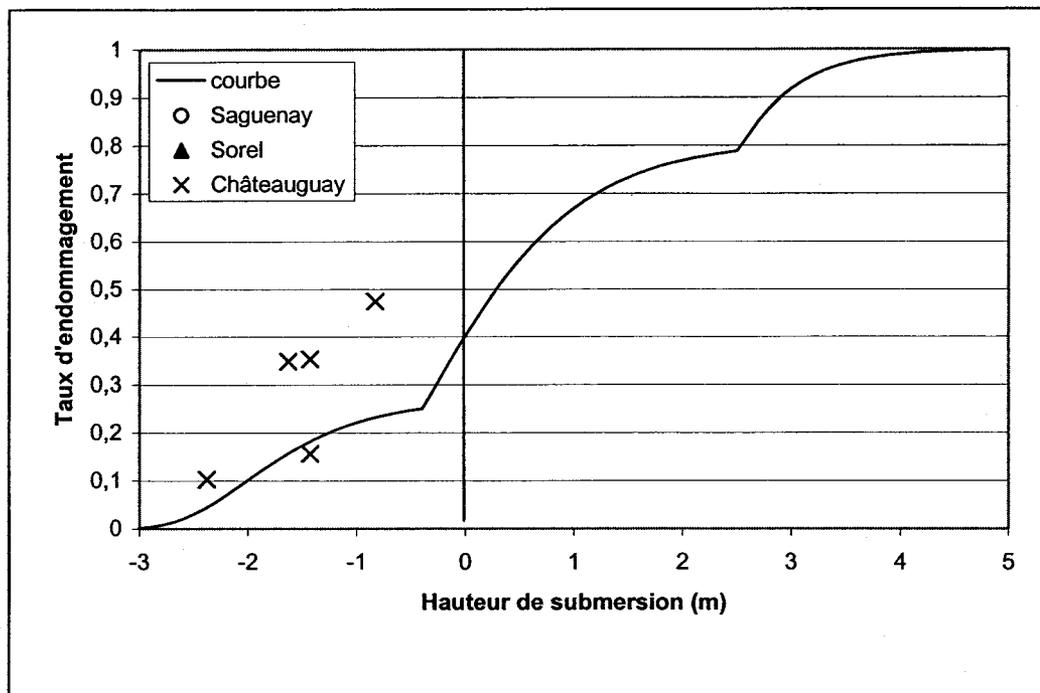


Figure 11 : Courbe de submersion-dommages pour les résidences à deux étages avec sous-sol fini

Tableau 7 : Equations de la courbe pour les résidences à deux étages avec sous-sol fini

Domaine	$H < -0.4$	$-0.4 \leq H < 2.5$	$H \geq 2.5$
Équation	$Txe = 0.27 \exp(-0.04 \exp(-1.6 H))$	$Txe = 0.81 \exp(-0.7 \exp(-1.3 H))$	$Txe = \exp(-0.7 \exp(-2.1 (H-2)))$

Erreur : - 55.6 %

Cette forte erreur s'explique par le fait que les données disponibles pour cette catégorie n'ont pas été utilisées pour la construction de la courbe. De plus, trois d'entre-elles présentent un fort taux d'endommagement causé par une faible submersion.

4.2.2 Avec sous-sol non fini

Les données de cette catégorie sont pour la plupart originaires des îles de Sorel. Elles concernent des hauteurs de submersion négatives. Pour ce sous-domaine, la fonction a été paramétrée uniquement à partir des données. Pour les hauteurs positives et en raison de l'absence de données, seules les indications d'experts ont été considérées.

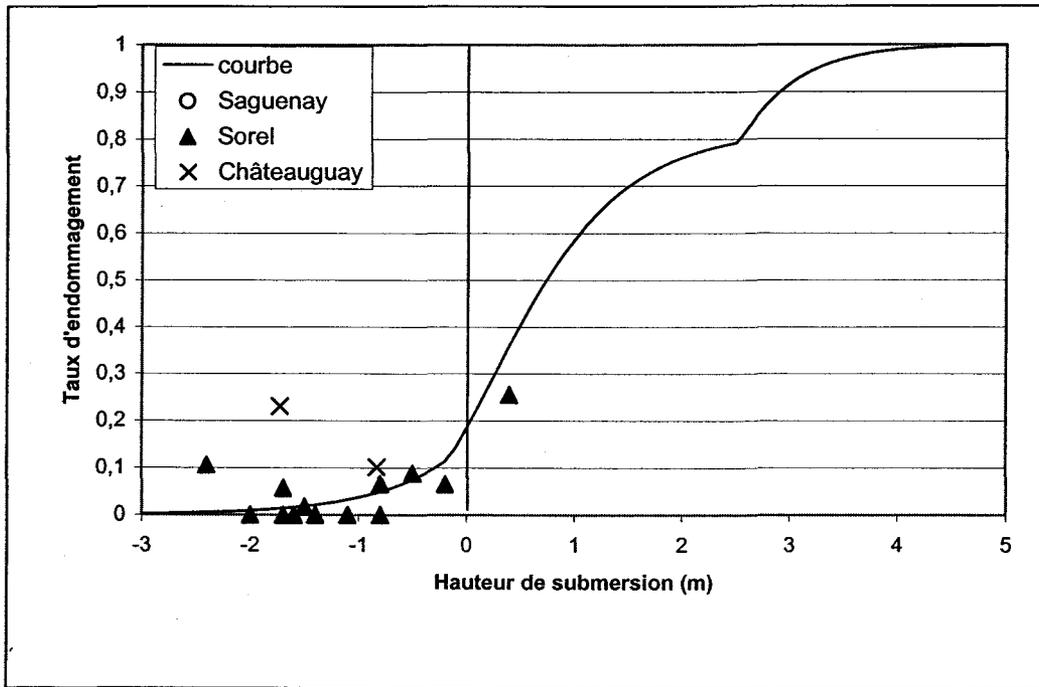


Figure 12 : Courbe de submersion-dommages pour les résidences à deux étages avec sous-sol non fini

Tableau 8 : Equations de la courbe pour les résidences à deux étages avec sous-sol non fini

Domaine	$H < -0.1$	$-0.1 \leq H < 2.5$	$H \geq 2.5$
Équation	$Txe = 0.15 \exp(1.4 H)$	$Txe = 0.82 \exp(-1.5 \exp(-1.5 H))$	$Txe = \exp(-0.7 \exp(-2.1 (H-2)))$

Erreur : - 26.3 %

Ce résultat est dû à une donnée exceptionnellement élevée issue de Châteauguay. La résidence correspondante a une forte valeur marchande. La sous-estimation importante que cela engendre n'est pas compensée. Un plus grand échantillon, en particulier pour les fortes submersions aurait pu en fournir l'occasion. Ce résultat témoigne une nouvelle fois de l'importance de l'échantillon. Dans le cas présent, la tendance majoritaire a naturellement été privilégiée aux dépens d'une exception.

4.2.3 Sans sous-sol

Les données disponibles pour cette catégorie permettent de cerner grossièrement l'allure de la courbe pour le rez-de-chaussée. Les indications d'experts ont ici également pallié le manque de données.

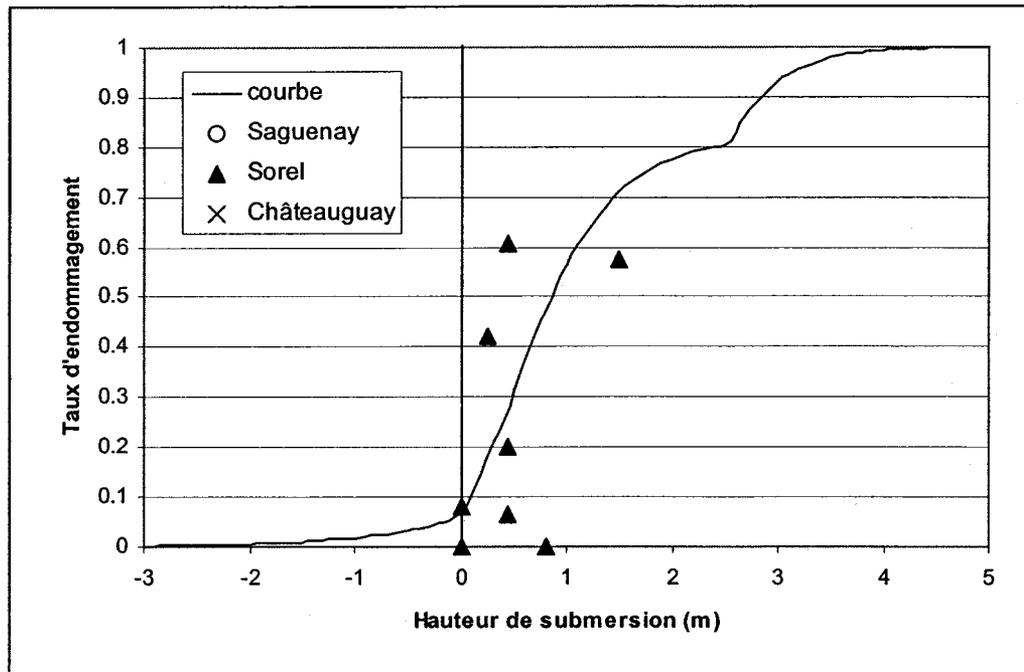


Figure 13 : Courbe de submersion-dommages pour les résidences à deux étages sans sous-sol

Tableau 9 : Equations de la courbe pour les résidences à deux étages sans sous-sol

Domaine	$H < 0$	$0 \leq H < 2.5$	$H \geq 2.5$
Équation	$Txe = 0.06 \exp(1.2 H)$	$Txe = 0.82 \exp(-2.5 \exp(-1.9 H))$	$Txe = \exp(-0.8 \exp(-2.4 (H-2)))$

Erreur : - 4.72 %

Les données disponibles fournissent un nuage de points équilibré pour des submersions correspondant à des dommages significatifs. De cette façon, les données se disposent de part et d'autre de la courbe ce qui donne au final une faible erreur.

4.3 Validation des courbes

Idéalement, la validation d'un outil s'effectue avec une base de données totalement indépendante de celle ayant servi à son élaboration. Dans le cas présent, le manque de données contraint à procéder différemment puisque les trois jeux de données actuellement disponibles ont été exploités. La seule validation possible est celle utilisée lors de l'étude pour le Saguenay par Leclerc *et al.* (1997, 2003). Celle-ci utilise un jeu de données élargi (N=188) incluant celui ayant servi à la paramétrisation des courbes. Cet échantillon compte nombre de résidences pour lesquels les niveaux de submersion ne sont pas connus. Pour l'ensemble de cette base de validation, les niveaux d'eau sont déduits de simulations réalisées à l'INRS grâce au logiciel Modeleur et au module Hydrosim. C'est donc la procédure d'évaluation des dommages à partir de variables indépendantes estimées (plutôt que mesurées) qui fait l'objet de validation. En effet, les hauteurs de submersion sont calculées grâce aux élévations moyennes de plancher principal par rapport au terrain. Celles-ci sont connues en moyenne pour les différentes catégories de résidence : +0.3 m pour les résidences sans sous-sol, et -1.6m pour les résidences avec sous-sol (2.2.2).

L'idée de cette validation était de prouver la valeur d'une approche où la valeur de la submersion ne serait obtenue que par des moyens théoriques faisant appel à la géomatique (position géoréférencée des résidences, modèle numérique d'élévation, paramètre moyen de surélévation du plancher principal par rapport au terrain, niveau d'eau et submersion simulés en 2D) et aux courbes de dommages établies quant à elles avec des mesures individuelles (submersion, élévation du plancher principal).

Dans le cas présent, toutes les caractéristiques des bâtiments ont été reprises telles quelles, les dommages ont quant à eux été estimés avec les nouvelles courbes. Il s'agissait donc ici de prouver la validité de celles-ci, la valeur de l'approche géoréférencée ayant déjà été démontrée en 1997 (Leclerc *et al.*, 2003).

Le total des dommages réels observés à l'époque s'élève à 7.5 M\$. La simulation de Leclerc *et al.* en 1997 avait estimé les dommages à 7 M\$, soit une sous-estimation

d'environ 6.8 %. Le modèle appliqué ici estime quant à lui une valeur de 7.8 M\$, soit une surestimation d'environ 5 %. Cela peut être considéré comme un bon résultat compte tenu des incertitudes numériques et de l'hétérogénéité du parc résidentiel. En effet, il faut rappeler que les bases exploitées pour la construction des courbes proviennent en partie des rives du fleuve Saint-Laurent. Cela signifie que malgré un échantillon aux sources diverses, la validation sur une base du Saguenay donne un meilleur résultat que les courbes produites par Leclerc *et al.*, pourtant conçues uniquement à partir de données du Saguenay. Cette amélioration de la précision s'explique essentiellement par la prise en compte de l'utilisation du sous-sol et aussi par la distinction de sous-domaines pour les hauteurs de submersions. De plus, il est toujours préférable de surestimer le risque que de le sous-estimer, il est à noter que les nouvelles courbes ont cet avantage.

Il serait toutefois très souhaitable qu'une validation soit réalisée avec une base de données totalement indépendante. Faute d'une telle base disponible au moment de nos travaux, la validation discutée précédemment constitue le meilleur compromis à ce jour.

5 DISCUSSIONS

5.1 Discussion sur la méthode

Initialement, cette étude avait pour ambition de produire des courbes de submersion-dommages destinées exclusivement aux rives du Saint-Laurent. Le manque de disponibilité de données a conduit à revoir cet objectif. Ce sont finalement des courbes génériques québécoises qui ont été réalisées. La modification de l'objectif initial donne l'occasion d'effectuer une réalisation intéressante puisque à ce jour il n'existe pas de courbes submersion-dommages génériques à cette échelle. Les courbes initialement prévues auraient été par nature vouées exclusivement à une utilisation sur les rives du fleuve. Les courbes réalisées sont moins spécifiques et ont l'avantage d'être applicables partout au Québec. Ce caractère plus générique s'avère intéressant puisque la province est régulièrement touchée par des inondations sur l'ensemble de son territoire.

La méthode utilisée ici est inspirée directement des travaux de Leclerc *et al.* (1997, 2003), et considère les dommages de façon individualisée, résidence par résidence. Cela permet un meilleur pouvoir prédictif en prenant en compte les caractéristiques principales de chaque habitation, notamment leur position dans le terrain. *A contrario*, les évaluations par secteur considèrent un quartier comme une entité propre. La distinction de chaque résidence exige sans doute une plus grande somme d'informations et davantage d'investigations, mais le résultat non biaisé qui en résulte est plus représentatif de la réalité, notamment quand on considère l'ensemble des crues probables, la grande majorité ne pouvant être documentée autrement que par modélisation.

La particularité de la présente étude est la réalisation de courbes de submersion-dommages à la fois à partir de données réelles mais aussi d'indications d'experts en sinistres. Ce mode de construction "mixte", reposant à la fois sur les données et sur l'expérience d'experts, permet de pallier à un manque de données éventuel. De plus, la participation d'experts dans le processus ajoute un certain crédit non négligeable aux courbes finales.

En raison de la variabilité très importante des données de dommages, il est possible que sur certaines portions de courbes le tracé final ne soit pas tout à fait représentatif de la réalité, en particulier pour les fortes hauteurs de submersion. Les inondations ne produisent qu'exceptionnellement de fortes hauteurs de submersion, par conséquent les données qui en témoignent sont rares. Ce manque concerne aussi les bases de validation qui de ce fait peuvent ne pas mettre en évidence d'éventuelles lacunes des courbes.

Mais du fait même de la rareté de dommages dus à de fortes hauteurs de submersion, un défaut dans les courbes pour ces hauteurs aura un impact relativement mineur sur le résultat d'une étude. Ainsi, une tolérance plus grande peut-être accordée aux portions de courbes correspondant aux fortes hauteurs de submersion.

La méthode employée repose de façon primordiale sur les données de dommages. La qualité des courbes dépend directement de la qualité des données, notamment de l'hétérogénéité des hauteurs de submersion. L'apport des experts offre un soutien qui permet de limiter les problèmes causés par des échantillons mal adaptés.

5.2 Discussion sur les résultats

Les courbes développées ici sont établies de façon à minimiser l'erreur par rapport aux dommages réels. La validation qui a été effectuée par la suite témoigne de la pertinence des courbes avec une surestimation de seulement 5 %. Il faut à nouveau préciser que cette validation a été faite sur un échantillon partiellement indépendant des données utilisées pour la construction des courbes. Une autre validation, cette fois sur un échantillon totalement indépendant permettrait de vérifier la qualité des courbes. Cela n'est malheureusement pas envisageable dans l'immédiat puisqu'une telle base n'est pas disponible actuellement.

Les courbes de cette étude ont été réalisées et validées avec les moyens disponibles à ce jour. Si certains défauts sont concevables en raison de la dispersion et parfois du manque de données, la validation réalisée permet malgré tout de vérifier qu'ils sont vraisemblablement mineurs.

En raison des origines diverses des données utilisées, les courbes construites sont qualifiées de génériques et donc valables *a priori* partout au Québec. Il faut cependant souligner que seulement trois bases ont été exploitées et par conséquent que l'ensemble de l'habitat du Québec ne peut y être représenté dans toute sa relative diversité. De plus, la base de validation est issue du Saguenay, et non d'une autre région que celles dont sont originaires les données utilisées. Dans ces conditions, le caractère générique des courbes n'est pas parfaitement démontré. Il est malgré tout peu probable que des différences majeures d'habitat existent d'une région à une autre. Les courbes peuvent donc être utilisées sur l'ensemble du Québec même si une augmentation du nombre de données ainsi qu'une validation indépendante demeurent souhaitables.

Enfin, il est intéressant de mentionner que les courbes présentées dans ce mémoire ont reçu un accueil préliminaire favorable et encourageant par des intervenants du Ministère de la Sécurité Publique.

6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Les inondations causent encore régulièrement des dégâts considérables. La gestion des risques d'inondation se fait désormais selon une approche qui s'appuie sur une bonne connaissance du phénomène et dans une optique préventive de développement durable. L'objectif est souvent d'évaluer la pertinence d'aménagements avant d'en décider la réalisation. Il peut également s'agir de modifier un plan d'aménagement et/ou d'occupation du sol, ou un plan de gestion des débits et niveaux d'eau (ex. : la CMI). Ces stratégies sont souvent très coûteuses, aussi, il est très utile de connaître les dommages potentiels encourus afin de s'assurer que le rapport coûts/bénéfices justifie l'investissement.

Il s'avère donc indispensable de disposer d'outils d'estimation de dommages. L'utilisation des courbes submersion-dommages est très répandue. La version individualisée de cette méthode prend en considération chaque bâtiment. Cela impose une plus grande exigence au niveau de la collecte de données. En revanche, cette méthode offre une meilleure représentation des dommages et donc un meilleur pouvoir prédictif pour l'ensemble des crues probables.

Les courbes réalisées dans le cadre de cette étude sont les premières courbes submersion-dommages individualisées et génériques construites pour le Québec. Elles concernent six catégories de résidences. Le Québec possède de nombreuses rivières et les inondations y sont courantes, particulièrement au printemps au moment de la fonte des neiges. Connaître les dommages potentiels serait précieux pour les municipalités concernées par ce problème.

La validation réalisée a donné un résultat préliminaire satisfaisant. Même si une autre validation totalement indépendante est souhaitable, ces courbes peuvent être considérées applicables dans l'ensemble du Québec en raison de la relative homogénéité architecturale de l'habitat québécois.

Il serait souhaitable que ce travail constitue la première phase de l'élaboration d'outils d'estimation de dommages d'inondation propres au Québec, performants et non limités au

milieu résidentiel. En effet, bien que les dommages résidentiels constituent généralement la plus grande part des dommages, il serait intéressant que cette étude soit consolidée puis étendue aux domaines industriels, commerciaux et autres. Une fois validés, ces outils permettraient de proposer aux collectivités une estimation des risques encourus, et en prolongement, des solutions de protection. Une diminution du risque d'inondation à l'échelle de la province serait alors envisageable.

Cependant, avant d'en arriver éventuellement à ce stade de développement, il est important de consolider les courbes déjà réalisées. Les recommandations qui suivent sont proposées dans cette optique.

Recommandations

Accès à de nouvelles bases de données

Des contacts préliminaires avec le Ministère de la Sécurité Publique laissent entrevoir la possibilité d'un accès aux nombreuses données dont il dispose en raison de leurs relations directes avec les victimes d'inondations. Une clause de confidentialité et des problèmes logistiques compliquent la disponibilité de ces données nominales dans le cadre d'études. Cependant, des démarches sont entreprises et devraient permettre à l'avenir une coopération fructueuse entre le Ministère et les instituts de recherche sur cette question. Les intervenants du ministère rencontrés se disent en effet favorables à un développement approfondi des courbes de dommages réalisées pour le Québec.

Diversifier les types de dommages traités

En l'absence de nouvelles bases de données extrêmement complètes, il restera impossible de construire des courbes de submersion-dommages pour d'autres domaines que l'habitat résidentiel à la structure. Les dommages mobiliers ou aux réseaux publics constituent pourtant des dégâts majeurs qui justifieraient largement un outil d'estimation. À défaut, ils ont souvent traités au cas par cas. Une possible solution serait d'effectuer une large étude sur les courbes utilisées actuellement à l'extérieur du Québec, *a priori* ou *a posteriori*, afin de tenter d'établir des relations simples entre les types de dommages. Par

exemple, certaines études calculent les dommages aux biens mobiliers par rapport aux dommages immobiliers par le biais d'un simple coefficient multiplicatif. Des convergences pourraient éventuellement être mises en évidence entre ces méthodes et ainsi permettre d'augmenter le nombre de catégories de dommages traitées. Les évaluations de dommages s'en trouveraient plus complètes et gagneraient en efficacité.

Consultation formelle d'experts

Quelques experts en sinistres ont été contactés pour cette étude et nous ont apporté de façon informelle une aide précieuse. Il serait intéressant de réaliser une consultation officielle d'experts, à l'aide d'un formulaire d'enquête par exemple. Des questions précises sur les seuils clés des courbes ou d'autres points précis leur seraient soumises, de même que les courbes déjà établies afin qu'ils puissent les commenter. La qualité des courbes serait ainsi évaluée par des professionnels et leurs remarques permettraient certainement des améliorations non négligeables.

Les inondations par embâcles

Les dommages estimés ici sont liés à la submersion pure et les situations considérées sont toutes associées à des crues à l'eau libre. Pourtant, au Québec, plus de 60% des dommages par submersion se produisent lors d'embâcles/débâcles avec la possibilité de dommages accrus par la poussée des glaces. De plus, les coûts d'intervention en hiver et d'indemnisation sont supérieurs à ceux reliés à des événements estivaux. La prise en compte de cette catégorie de dommages causés par l'effet combiné de la submersion, du courant et de la glace, nécessiterait sans doute une majoration des taux d'endommagement pour une hauteur de submersion donnée. Le Québec étant très exposé à ce genre de phénomène, la considération de ce type de risque nous apparaît comme un objectif souhaitable pour les futures études.

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.
- Ayres, R. U., 1972. Prévision technologique et planification à long terme. *Hommes et Techniques*, Paris: 215 p.
- BCEOM, 1997. Étude en vue de réduire les dégâts liés aux crues de la rivière du Dolaizon. District du Puy-en-Velay et DDE de Haute-Loire. *Le coût du risque... L'impact socio-économique des inondations* par Collectif d'auteurs, 1999. Presses de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées. 232 p.
- Beard, L. R., 1997. Estimating flood frequency and average annual damage. *Journal of Water Resources Planning and Management* **123**, no. 2: 84-88.
- BLC, 1997. Agence de l'Eau Loire-Bretagne. "Evaluation des dommages aux activités à travers l'approche assurantielle". *Le coût du risque... L'impact socio économique des inondations* par Collectif d'auteurs, 1999. Presses de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées. 232 p.
- Blin, P., 2001. Développement d'une nouvelle méthode de cartographie du risque unitaire d'inondation (crue) pour des résidences. Mémoire de maîtrise en Sciences de l'Eau. Université du Québec - INRS-Eau.
- Booy, C., and L. M. Lye, 1989. A new look at Flood Risk Determination. *Water Resources Bulletin* **25**, no. 5: 933-943.
- Breaden, J. P., 1973. The generation of flood damage time sequences, research report No 32. Water Resources Institute, University of Kentucky, 150 p.
- Breton, C., et C. Marche, 1999. "Une aide à la décision pour le choix des interventions en zone inondable." Ecole polytechnique de Montréal, Département de génie civil, géologique et des mines, 30 p.
- CNR, 1998. Etudes des crises hydrologiques du bassin versant de la Maine. EPALA et DIREN Centre, 52 p.

Collectif d'auteurs, 1999. Le coût du risque... L'impact socio économique des inondations. Presses de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées. 232 p.

CRAR, Centre de Recherche en Aménagement Régional, Université de Sherbrooke, 1977. "Évaluation des dommages causés par les inondations de 1976, à divers niveaux d'élévation des eaux de la rivière Richelieu et de la Baie Missisquoi. Haut-Richelieu, Québec, Canada, accompagnée de projections pour les années 1976-2030".

Dantzig, D. V., 1956. Economic decision problems for flood prevention. *Econometrica* **24**, no. 3: 276-287.

Dessau-Soprin, 1998. Ville de Châteauguay, inondations de janvier 1996. Rapport d'expertise dossier 2257-100+HY-02, novembre, 100 p.

Doyon, B., J.-P. Côté et L. Bonnifait, 2004. Crues du fleuve Saint-Laurent : construction de courbes d'endommagement par submersion applicables aux résidences installées dans la plaine inondable, Environnement Canada - Service météorologique du Canada - Hydrologie. Rapport technique RT-132. 50 p.

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.

El-Jabi, N., and J. Rousselle, 1987. A flood damage model for flood plain studies. *Water Resources Bulletin* **23**, no. 2: 179-188.

CERGRENE, ENPC (Ecole Nationale des Ponts et Chaussées), 2004. La nature des impacts et des dommages des inondations. Page web, [acceded 24 June 2004]. Disponible à :

<http://www.enpc.fr/cergrene/HomePages/oms/gdrisques/inondation/impsocio.html>

Goldman, D., 1997. Estimating expected annual damage for levee retrofits. *ASCE J. of Water Res. Plan. and Mannag.* **123**, no. 2: 89-94.

Grigg, N. S. and O. J. Helweg, 1975. State of the art of estimating flood damage in urban areas. *AWRA Water Res. Bulletin*, **11**, no. 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**, no. 3: 163-172.
- Heniche, M., Y. Secretan, P. Boudreau et M. Leclerc, 1999b. MODELEUR/HYDROSIM - Guide d'utilisation - Document Hydrosim 1.0a06."
- Jantsch, E., 1977. Technological forecasting in perspective. *OCDE*: 401 p.
- Kilborn Ltd, 1982. "Flood plain mapping : Colborne Creek, Village of Colborne." Report by Kilborn Ltd, Toronto, Canada.
- Laurans, Y., I Dubien et L. Barbut, 1997. "L'évaluation économique des dommages à l'agriculture (AScA)." Le coût du risque... L'impact socio économique des inondations par Collectif d'auteurs, 1999.
- 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 et aux Sables et du lac Kénogami." R-511. INRS-Eau.
- Leclerc, M., B. Morse, J. Francoeur, M. Heniche, P. Boudreau et Y. Secretan, 2001. Analyse de risque d'inondation par embâcle de la rivière Montmorency et identification de solutions techniques innovatrices - Rapport de la phase I - Pré-faisabilité. Rapport INRS-Eau R577A et Université Laval (Génie Civil) GCT-2002-03a. 118 p.
- Leclerc, M., Y. Secretan, M. Heniche, T. Ouarda et J. Marion, 2003. Une méthode prédictive non biaisée et géoréférencée d'estimation des dommages résidentiels d'inondation. *Journal Canadien de Génie Civil* **30**: 914-922.
- McBean, E., J. Gorrie, M. Fortin, J. Ding, R. Moulton, and University of Waterloo, Ontario, Canada. Dept of Civ. Engrg, 1988a. Flood Depth-Damage Curves by interview survey. *Journal of Water Resources Planning and Management*. **114**, no. 6: 613-634.
- McBean, E. A., J. Gorrie, M. Fortin, J. Ding, R. Moulton and University of Waterloo, Ontario, Canada. Dept of Civ. Engrg, 1988b. Adjustment factors for flood damage

- curves. *Journal of Water Resources Planning and Management*. **114**, no. 6: 635-646.
- Ministère des Richesses naturelles de l'Ontario, 1990. Guide d'évaluation des dommages causés par les inondations. ISBN : 0-7729-6955-8. 60 p.
- Ouarda, T. B.M.J., El-Jabi, N. and F. Ashkar, 1995. Flood damage estimation in the residential sector. American Water Resources Association, International Symposium on Water Resources and Environmental Hazards, Honolulu, USA, 25-28 June. Proceedings: 73-82.
- Ouellette, P., D. Leblanc, N. El-Jabi and J. Rousselle, 1988. Cost-benefit analysis of flood-plain zoning. COST-BENEFIT ANALYSIS OF FLOOD-PLAIN ZONING. *Journal of Water Resources Planning and Management*. **114**, no. 3: 326-334.
- Penning-Rowsell, E. C., 1997. Evaluating the socio-economic impacts of flooding. The situation in England and Wales. Flood Hazard Research Center, Middlesex University. Le coût du risque... L'impact socio économique des inondations par Collectif d'auteurs, 1999. Presses de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées. 232 p.
- Rizzoli, J.-L., 1997. IIBRBS. L'évaluation de l'impact des ouvrages existants et futurs sur les dommages liés aux crues de la Seine et de la Marne en région Ile-de-France. Le coût du risque... L'impact socio économique des inondations par Collectif d'auteurs, 1999.
- SOGREAH, 1994. Aménagement de l'Isère dans la vallée du Grésivaudan. Étude d'impact économique. Association départementale Isère-Drac-Romanche. 48 pages et annexes.
- Stedinger, J. R., 1997. Expected probability and annual damage estimators. *ASCE J. of Water Res. Plan. and Manag.* **123**, no. 2: 125-135.
- Torterotot, J.-P., 1993. Coût des dommages dus aux inondations : Estimation et analyse des coûts. Paris, Noisy le Grand, ENPC-DR, 1993, 284 p.. (Th. Doct. Sc. et Techn. Environnement, Paris, ENPC, 1993).

US Army Corps of Engineers (USACE), 2000. "Flood Warning and Response System Susquehanna River." Web page, [accessed 24 February 2004]. Available at <http://www.nap.usace.army.mil/GIS/fwrs.htm>.

US Army Corps of Engineers (USACE), 1996. "Risk-based analysis for flood damage reduction studies." Department of the Army, manual No 1110-2-1619, 60 p.

ANNEXE

Formulaire utilisé lors de l'enquête réalisée par Environnement Canada auprès de la population des îles de Sorel à l'automne 2003.

Informations sur le type de résidence

Date de construction de la résidence ? _____

Services municipaux (égout, aqueduc) ou Puits artésiens et fosse sceptique ? _____

- 1 étage sans sous-sol
- 1 étage avec sous-sol
- 2 étages sans sous-sol
- 2 étages avec sous-sol
- Autres : maisons à paliers (split level), maisons mobiles, chalets sur pilotis, etc. Type ? _____

Si votre maison a un sous-sol, est-il fini ? _____

Valeur de la résidence :

Valeur au rôle d'évaluation municipale (bâtiment) :

- Valeur au rôle d'évaluation actuel : _____
- Valeur au rôle d'évaluation précédent (le plus près de 1998) _____

Informations sur le niveau d'eau atteint

À quelle date votre maison a-t-elle été inondée (eau dans la résidence) ? _____

Durée de l'inondation (Présence d'eau dans la résidence) ? _____

Quelle hauteur maximale l'eau a-t-elle atteinte ? _____

À titre d'information, avez-vous déjà été victime d'autres inondations par le passé ? _____

Informations sur les dommages matériels

À combien de \$ chiffrez-vous les dommages causés à la structure de votre résidence lors de cette inondation ? (Valeur de remplacement en \$ de 1998, estimé d'expert ? d'assureur ?). _____

À combien de \$ chiffrez-vous les dommages causés au contenu de votre résidence lors de cette inondation ? (On parle de la valeur de remplacement en \$ de 1998). _____

Avez-vous fait une réclamation au ministère de la Sécurité publique du Québec ? _____

Si oui, avez-vous été dédommagé et combien vous a-t-il versé ? _____

Informations à prendre directement par l'interviewer :

- **Différentes mesures : dénivelée entre 1^{er} plancher vs sol au pourtour de la maison, hauteur entre 1^{ère} ouverture vs sol;**
- Si nécessaire, demander au propriétaire s'il est possible de prendre une photo de la configuration des lieux (topo, ...).

En gras : informations « obligatoires »

Sans gras : informations complémentaires facultatives

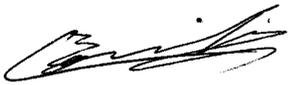
**REPROGRAPHIE DE LA REMISE FINALE
DU MÉMOIRE OU DE LA THÈSE**

Lors de la remise finale de mon mémoire ou de ma thèse, les photocopies ont été effectuées par :

l'étudiant(e) :

*Les photocopies effectuées par l'étudiant(e)
seront sous sa responsabilité.*

BONNIFAIT Laurent
Nom


Signature

Nom du directeur de recherche: *Michel Leclerc*

Nom du co-directeur de recherche: *Yves Secretan & Monique Bernier*

Boursier ou non-boursier: