

***CONSTRUCTION DE COURBES
DE NIVEAU-DOMMAGES
POUR L'HABITAT QUÉBÉCOIS***

Rapport de recherche No R-728

Mars 2004

CONSTRUCTION DE COURBES DE NIVEAU-DOMMAGES

POUR L'HABITAT QUÉBÉCOIS

Pour le compte de

Environnement Canada

Mandaté par la

Commission Mixte Internationale

Mars 2004

COLLABORATEURS

Pour Environnement Canada

Chargé de projet: *Bernard Doyon*

Pour l'Institut national de la recherche scientifique – Eau, Terre et Environnement

Superviseur et responsable scientifique :

Michel Leclerc, Ph.D., professeur

Collecte partielle des données, compilation des données, réalisation des courbes, rédaction du rapport :

Laurent Bonnifait, M. Sc.

© INRS-ETE

Pour fins de citation :

Bonnifait, L., Leclerc, M., (2004). Construction de courbes niveau-dommages pour l'habitat québécois. Pour le compte d'Environnement Canada. Rapport INRS-ETE #R-728. Mars, 15 pages.

TABLE DE MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES FIGURES	iv
INTRODUCTION	1
1. PRÉSENTATION ET INTÉRÊT DES COURBES	2
1.1 Historique	2
1.2 Importance du type de bâtiment	3
1.3 Cadre d'application	4
2. OBJECTIFS	5
2.1 Objectif général	5
2.2 Objectif spécifique – Élaboration de courbes « québécoises »	6
2.3 Rappel sur les bases de données utilisées	6
3. PRINCIPES DE CONSTRUCTION	8
3.1 Utilisation de la loi de Gompertz	8
3.2 Types de cas traités	8
4. AJUSTEMENT DES PARAMÈTRES DES COURBES	10
4.1 Paramètres d'ajustement	10
4.2 Construction par assemblage de 2 types de courbe	10
4.3 Les courbes de niveau-dommages	11
4.4 Validation des courbes résultantes – Événement de 1998	13
CONCLUSION	14
BIBLIOGRAPHIE	15

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : COURBES POUR LES RÉSIDENCES À REZ-DE-CHAUSSÉE SANS ÉTAGE.	12
FIGURE 2 : COURBES POUR LES RÉSIDENCES À DEUX ÉTAGES.....	13

INTRODUCTION

Dans le cadre de l'étude sur les risques d'inondation du Saint Laurent exigée par la Commission Mixte internationale (CMI), Environnement Canada a demandé à l'INRS-ETE de fournir des courbes de niveaux-dommages pour le bâti résidentiel.

Le présent rapport fait état des principes et des étapes de réalisation de ces courbes.

1. Présentation et intérêt des courbes

Les courbes niveau-dommages sont utilisées depuis les années 70 pour évaluer les dommages potentiels d'une zone urbaine soumise à un risque d'inondation.

Une courbe niveau-dommages représente les dommages subis par un bâtiment en fonction de la hauteur de submersion. Rigoureusement, les dommages causés par une inondation dépendent d'autres facteurs comme la durée de l'inondation ou la vitesse des eaux. Mais ce genre d'information est très difficile à prendre en compte du fait. C'est pourquoi seule la hauteur de submersion, le facteur prépondérant, est considérée.

Une courbe décrit le comportement d'un type de bâtiment en particulier. Sauf cas exceptionnel, les zones à risque sont constituées de plusieurs sortes de bâtiment, aussi il est presque toujours nécessaire lors d'une étude d'utiliser plusieurs courbes, chacune correspondant à une sorte de construction.

La construction d'une courbe peut se faire à partir d'une analyse minutieuse des constructions par un expert en sinistre. Cependant la plupart du temps, elles sont réalisées à partir de bases de données constituées suite à une inondation et comprenant les caractéristiques du bâtiment, le niveau d'eau atteint et les dommages subis. Le principe de construction est abordé plus loin.

Dans le cadre d'une étude de risque portant sur un quartier et disposant d'une hauteur de submersion pour chaque bâtiment, on peut ainsi déduire les dommages subis estimés en moyenne par chacun et obtenir ainsi un montant total des dommages en effectuant la somme.

L'avantage des courbes est de permettre une estimation rapide et peu coûteuse des dommages qui seraient engendrés par une inondation. La précision, approximative si l'on ne considérait qu'une seule résidence, s'avère très acceptable à l'échelle d'un quartier par rapport aux dommages totaux.

C'est par conséquent un outil bien adapté aux études de risque globales portant sur une zone relativement étendue.

1.1 Historique

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

L'émergence et l'application désormais répandue du principe de coûts-bénéfices a mis en 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 précieux qui permet l'évaluation rapide des dommages potentiels d'un secteur à risque.

Parmi les organismes de recherche qui ont exploité cette approche, on peut citer le USACE (US Army Corps of Engineers) avec McCrory *et al.* 1976 et plus récemment disponible sur internet Flood Warning and Response System Susquehanna River (<http://www.nap.usace.army.mil/GIS/fwrs.htm>)

Au niveau canadien, de nombreuses études ont été réalisées principalement en Ontario (Kilborn 1982, McBean 1988). Le ministère des ressources naturelles de l'Ontario a publié plusieurs documents traitant des risques d'inondation et où sont élaborées et utilisées des courbes niveau-dommages (Development of flood depth-damage curves for residential homes in Ontario, 1985, Paragon Engineering Limited *et al.* ; Guide d'évaluation des dommages causés par les inondations, 1990).

Une étude québécoise menée à l'Université de Sherbrooke en 1977 a effectué des projections jusqu'en 2030 à l'aide de courbes niveau-dommages (Report on the evaluation of flood damages in 1976 at different water levels of the Richelieu River and the Baie Missisquoi. Upper Richelieu, Quebec, Canada. With projections for the period 1976-2030).

Plus récemment, une étude menée par une équipe de l'INRS-ETE a construit des courbes à partir des données du Saguenay (Prédiction des dommages résiduels d'inondation en fonction de l'hydraulicité des rivières Chicoutimi et Aux sables et du lac Kénogami). Un article a été publié sur le sujet par la même équipe en 2003 : une méthode prédictive non biaisée et géoréférencée d'estimation des dommages résidentiels d'inondation.

La présence récurrente des courbes niveau-dommages dans la littérature atteste qu'elles sont depuis longtemps reconnues comme un outil rapide et efficace pour les études de risques d'inondation à grande échelle.

1.2 Importance du type de bâtiment

L'endommagement subi par un bâtiment lors d'une inondation ne dépend pas seulement du niveau de submersion mais également de ses propres caractéristiques.

En effet les dommages seront différents selon les dimensions, la structure, les matériaux utilisés pour la construction, le nombre d'étages et la fonction (résidentielle, industrielle, commerciale etc.).

En raison de cette hétérogénéité de comportements face à la submersion, une seule courbe niveau-dommages ne peut décrire les dommages dus à la submersion pour l'ensemble des bâtiments. Il est par conséquent indispensable d'en utiliser plusieurs, chacune étant représentative d'une sorte de bâtiment en particulier. Lors d'une étude de risque, les constructions en présence sont regroupées en catégories homogènes. Une courbe spécifique sera utilisée pour chacune d'entre-elles.

Dans une même région, les dimensions, la structure et les matériaux utilisés sont d'une façon générale des corollaires du nombre d'étages et de la fonction. Aussi, les bâtiments d'une zone à risque sont souvent classés en catégories homogènes selon ces deux derniers critères.

Lorsqu'on ne peut utiliser des courbes déjà existantes et qu'il faut les constituer à partir de bases de données, il est possible que toutes les courbes dont on aurait besoin ne puissent être construites en raison du manque de données sur certaines catégories.

1.3 Cadre d'application

Les courbes de niveau-dommages ont été conçues pour permettre l'estimation rapide des dommages portés par une inondation à une zone urbaine. Ces courbes sont dites « génériques », cela signifie que chacune correspond à un type de bâtiment moyen.

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.

Une utilisation intéressante des courbes est une intégration de celles-ci à un Système d'Informations Géographiques (SIG).

Le calcul de la hauteur de submersion pour chaque bâtiment est calculée à partir d'un modèle numérique d'altitude, d'un plan numérisé du bâti, et d'une côte d'altitude de niveau d'eau correspondant à une inondation simulée.

Les courbes niveau-dommages sont programmées et intégrées au SIG. Pour chaque bâtiment, le SIG calcule une estimation des dommages en utilisant la courbe adéquate selon le type et avec comme variable la hauteur de submersion calculée précédemment.

Le montant total de l'évaluation des dommages pour l'ensemble de la zone est obtenue en faisant la somme de tous les dommages calculés pour chaque construction.

2. Objectifs

2.1 Objectif général

Le projet initial prévoyait l'utilisation de courbes le mieux adaptées à la zone d'étude, objectif relativement difficile à atteindre comme nous allons le voir.

Appréciation des courbes existantes

Comme le paragraphe *Historique* le mentionne, de multiples courbes existent déjà. Cependant une courbe niveau-dommages n'est généralement valide que dans la zone géographique à partir de laquelle elle a été conçue en raison des particularités locales des constructions. L'architecture ainsi que les matériaux de construction diffèrent en effet sensiblement d'un pays à l'autre, parfois même d'une région à l'autre à l'intérieur d'un même pays.

Une courbe niveau-dommages n'est donc transposable à une autre entité géographique que si les constructions sont comparables à celles existant dans la région d'origine.

Toutes les données et les courbes construites à l'extérieur du Québec mentionnées dans l'*Historique* correspondent à un habitat différent du Québec et par conséquent ne sont pas applicables au cas présent.

Les courbes réalisées à partir des données du Saguenay par l'INRS-Eau semblaient quant à elles trop régionales pour être appliquées au secteur d'étude en tant que courbes locales.

D'autre part, les procédés et les choix de construction, les matériaux utilisés et leurs valeurs marchandes varient au cours du temps. Les dommages sont fonctions de ces variables. Une courbe niveau-dommages est donc valable pour une durée limitée. En raison des variations du marché de la construction, on ne peut utiliser les mêmes courbes durant 20 ans, des mises à jour sont impératives pour s'adapter au contexte du moment.

Pour cette raison les données et courbes de Sherbrooke datant de 1977 ne peuvent pas être employées.

Construire des courbes locales limitées au domaine résidentiel

En l'absence de courbes existantes applicables au cadre local, le but initialement fixé était de construire de nouvelles courbes, régionales et propres au secteur étudié.

Il a été décidé de se restreindre au domaine résidentiel. Cette limitation s'explique pour deux raisons. Les dommages résidentiels constituent l'essentiel des coûts engendrés par une inondation. D'autre

part, les résidences sont les bâtiments les plus documentés lors d'un sinistre et donc pour lesquels collecter des données en nombre suffisant s'avère le plus accessible.

Cependant, un des obstacles majeurs à la réalisation de telles courbes reste la quantité souvent insuffisante de données, un problème qui contraint à élargir l'origine des données mais aussi à limiter les catégories de bâtiment traitées.

2.2 Objectif spécifique – Élaboration de courbes « québécoises »

Données locales insuffisantes

La construction de courbes de dommages nécessite d'importantes bases de données dans lesquelles sont répertoriés les dommages et les caractéristiques des bâtiments sinistrés lors d'une inondation passée. Le niveau d'eau, le montant des dommages, la valeur de la résidence et ses caractéristiques (nombre d'étage, sous-sol etc.) sont les informations nécessaires. Ce genre de données est relativement rare et souvent difficilement accessible.

Pour chaque type de bâtiment considéré on doit disposer d'un nombre suffisant de données pour que l'échantillon soit exploitable. Cela peut conduire à ne considérer que les types de bâtiment pour lesquels on dispose de suffisamment de données.

D'autre part, il faut idéalement que la gamme de submersion répertoriée dans la base de données soient la plus large possible afin d'établir le tracé de la courbe avec le moins d'incertitude possible.

Il s'avère que les seules bases de données disponibles dans le secteur d'étude sont trop peu fournies pour envisager la réalisation de courbes. On dispose en effet de 49 données pour la région de Sorel et 40 données provenant de Châteauguay ce qui est insuffisant pour l'objectif fixé.

Élargissement des sources

La seule solution à ce problème est d'exploiter d'autres bases de données provenant d'autres régions du Québec. Les courbes ne peuvent cependant plus dans ce cas être qualifiées de locales.

Les courbes étant représentatives d'un cadre géographique, il a été décidé de réaliser des courbes génériques dites « québécoises », correspondant aux habitations moyennes au Québec, et donc de n'appliquer aucune restriction quant à l'origine des bases de données québécoises.

Les données de l'étude québécoise menée par l'INRS-Eau sur les événements du Saguenay ont ainsi été utilisées pour la présente étude et adjointes aux deux bases locales de Sorel et Châteauguay.

2.3 Rappel sur les bases de données utilisées

(Sorel, Saguenay, lac Saint-Louis)

Au total trois bases de données ont été utilisées pour construire les nouvelles courbes de dommages. Dans la région de Sorel 49 données ont été collectées à l'automne 2003 et illustrent l'inondation de

1998. 40 données proviennent du lac Saint Louis, région de Châteauguay, et sont liées à l'inondation de 1996. Enfin la plus importante a été constituée suite aux événements du Saguenay en 1996, elle contient 130 données.

3. Principes de construction

Pour chaque type de bâtiment, on représente dans un graphique le taux d'endommagement (rapport entre les dommages et la valeur au rôle de la résidence) en fonction de la hauteur de submersion (le niveau 0 correspondant au plancher principal). Il s'agit de déterminer la courbe de régression qui épousera au mieux la répartition des points.

Les types de courbes les plus courants utilisés en régression sont : linéaire, exponentielle, polynomiale, logarithmique. D'autres courbes plus élaborées, combinaison de différents types, peuvent s'avérer mieux adaptées.

L'indice utilisé pour traduire la qualité de la régression est l'erreur quadratique entre les données simulées par la courbe, calculées pour les hauteurs d'eau des points représentés, et les valeurs réelles issues de la base de données.

3.1 Utilisation de la loi de Gompertz

La loi de Gompertz est employée pour représenter un comportement de croissance en économie et en biologie. Elle a la particularité d'avoir une forme en S et d'évoluer entre 0 et 1.

Cette loi a été par la suite utilisée pour des études de risques, entre autre part des compagnies d'assurances. Le dommage peut en effet être exprimé en taux d'endommagement (rapport entre les dommages et la valeur au rôle du bâtiment) variant entre 0, soit aucun dommage, et 1, soit 100% de dommages. De plus la forme en s de la loi de Gompertz décrit relativement bien la progression des dommages en fonction du niveau de submersion.

Nous avons donc utilisé essentiellement cette loi bien adaptée à la problématique et déjà éprouvée.

3.2 Types de cas traités

Comme il a été précisé précédemment, seuls les cas résidentiels ont été traités. Le nombre d'étages, la présence ou non d'un sous-sol, et la finition du sous-sol sont des critères qui conditionnent l'évolution des dommages en fonction de la hauteur de submersion.

L'étude s'est limitée aux cas de 1 et 2 étages. Les maisons à plus de 2 étages étant extrêmement rares, trop peu de données sur de tels bâtiment étaient disponibles pour la construction de courbes. De plus, il a été considéré qu'en raison de l'extrême rareté de ce genre de résidences, ne pas les prendre en compte dans une étude influence peu le résultat final.

Les cas traités pour lesquels des courbes ont été élaborées sont les suivants :

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

Note : le rez-de-chaussée est considéré comme un étage.

4. Ajustement des paramètres des courbes

Taux d'endommagement en fonction de la submersion. En fonction de l'allure de la répartition des points, on choisit la régression la plus adaptée à la forme présentée par les points, linéaire, exponentielle, logarithmique en « s » etc.. Ensuite, il faut fixer les différents coefficients de l'équation désignée afin d'ajuster la courbe au jeu de données de façon optimale.

4.1 Paramètres d'ajustement

La loi de Gompertz, qui a été systématiquement employée pour chaque courbe, possède trois paramètres ajustables, a, b, k. Son expression est la suivante :

$$y = a.e^{-b.e^{-k.x}}$$

L'exponentielle est le deuxième type de régression utilisée. Elle a deux paramètres d'ajustement :

$$y = a.e^{-b.x}$$

La paramétrisation des courbes a été basée sur la minimisation de l'erreur quadratique entre les dommages issues de la base et les dommages simulés pour les mêmes hauteurs de submersion.

4.2 Construction par assemblage de 2 types de courbe

La loi de Gompertz propose un comportement qui correspond globalement à celui des dommages en fonction de la submersion. Cependant, on constate que dans le détail, et principalement pour les faibles submersions, une seule équation basée sur la loi de Gompertz ne traduit pas fidèlement l'évolution des dommages. Il a donc été décidé de scinder la gamme de submersion et de chercher pour chacun des domaines ainsi formés la meilleure régression. 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. Dans un souci de cohérence, les paramètres des équations ont été fixés pour minimiser l'erreur mais également pour que la jonction entre les deux portions de courbes soit continue et sans rupture abrupte.

Cas des résidences à deux étages

Le peu de données disponibles pour ces catégories importantes pour l'étude a conduit à une certaine extrapolation au niveau des courbes.

Tout d'abord, l'allure des courbes jusqu'au deuxième plancher a été basée sur les résultats obtenus pour les résidences à un étage. La proportion de chaque étage et l'allure de la courbe au-delà du deuxième plancher ont été définies à partir des indications d'experts en sinistres interrogés à ce sujet.

4.3 Les courbes de niveau-dommages

Les équations obtenues pour les différentes catégories sont les suivantes, avec T_{xe} le taux d'endommagement et h la hauteur de submersion en mètres par rapport au plancher principal :

Résidences à 1 étage :

<i>Avec sous-sol fini</i>		
Domaines	$h < -0.4$	$h \geq -0.4$
Équations	$T_{xe} = 0.36 \exp(-0.04 \exp(-1.6 h))$	$T_{xe} = \exp(-0.7 \exp(-1.1 h))$
<i>Avec sous-sol non fini</i>		
Domaines	$h < 0$	$h \geq 0$
Équations	$T_{xe} = 0.3 \exp(1.7 h)$	$T_{xe} = \exp(-1.2 \exp(-1.7 h))$
<i>Sans sous-sol</i>		
Domaines	$h < 0$	$h \geq 0$
Équations	$T_{xe} = 0.08 \exp(1.3 h)$	$T_{xe} = \exp(-2.4 \exp(-1.8 h))$

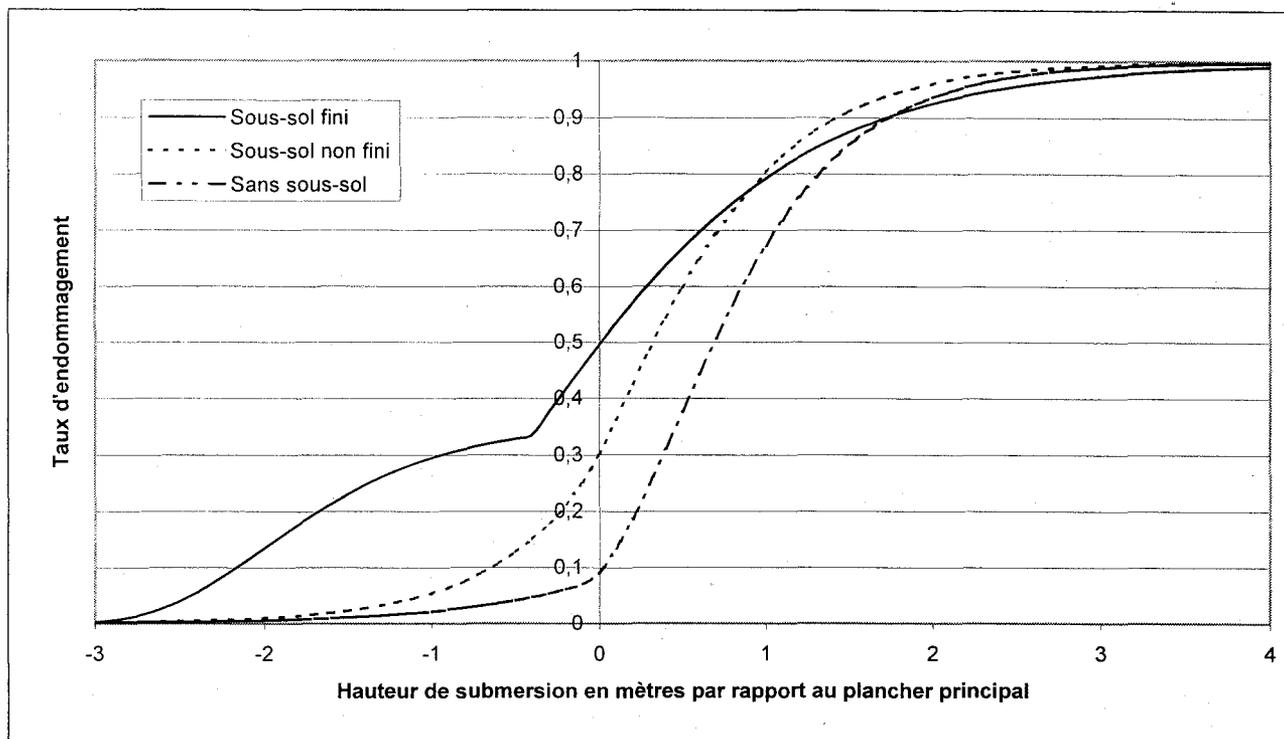


Figure 1 : Courbes pour les résidences à rez-de-chaussée sans étage.

Résidences à deux étages :

<i>Avec sous-sol fini</i>			
Domaines	$h < -0.4$	$-0.4 \leq h < 2.5$	$h \geq 2.5$
Équations	$T_{xe} = 0.27 \exp(-0.04 \exp(-1.6 h))$	$T_{xe} = 0.81 \exp(-0.7 \exp(-1.3 h))$	$T_{xe} = \exp(-0.7 \exp(-2.1 (h-2)))$
<i>Avec sous-sol non fini</i>			
Domaines	$h < -0.1$	$-0.1 \leq h < 2.5$	$h \geq 2.5$
Équations	$T_{xe} = 0.15 \exp(1.4 h)$	$T_{xe} = 0.82 \exp(-1.5 \exp(-1.5 h))$	$T_{xe} = \exp(-0.7 \exp(-2.1 (h-2)))$
<i>Sans sous-sol</i>			
Domaines	$h < 0$	$0 \leq h < 2.5$	$h \geq 2.5$
Équations	$T_{xe} = 0.06 \exp(1.2 h)$	$T_{xe} = 0.82 \exp(-2.5 \exp(-1.9 h))$	$T_{xe} = \exp(-0.8 \exp(-2.4 (h-2)))$

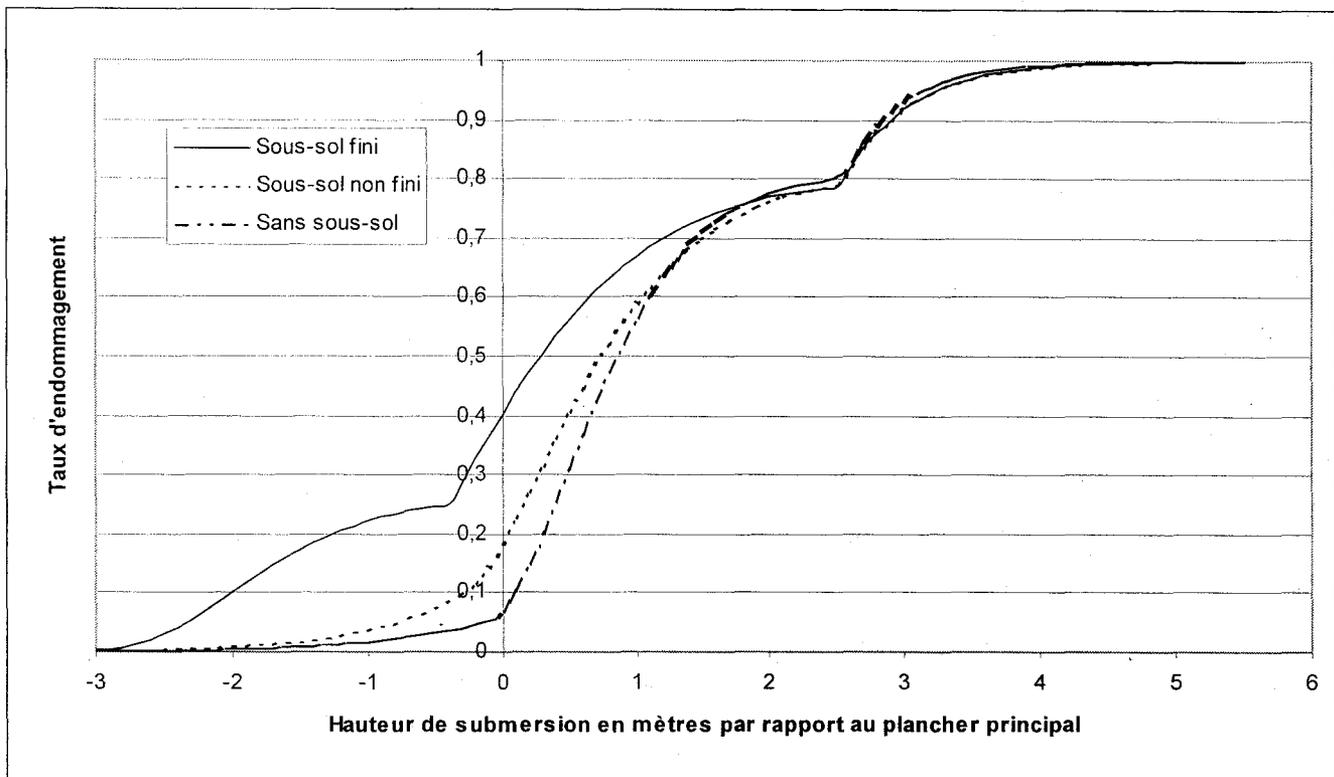


Figure 2 : Courbes pour les résidences à deux étages.

4.4 Validation des courbes résultantes – Événement de 1998

Les trois bases actuellement disponibles ont été exploitées. La seule validation actuellement disponible est celle qui a été faite lors de l'étude pour le Saguenay.

Elle s'est faite avec un échantillon de résidences plus étendu que celui ayant servi à construire les courbes et avec des niveaux d'eau simulés. C'est une sorte de mise en situation réelle basée sur des éléments en partie connus. Le montant total des dommages simulés est comparé au montant réel. Une différence positive de 5 % a été constatée ce qui constitue un bon résultat compte tenu des incertitudes numériques et l'hétérogénéité du parc résidentiel.

Actuellement une recherche de bases de données est en cours. D'une part pour enrichir le jeu de données et ainsi affiner les courbes, mais également pour permettre une validation à partir de divers événements situés dans différentes régions.

CONCLUSION

Les courbes ici présentées ont été réalisées avec toutes les bases disponibles à ce jour. Il serait intéressant d'approfondir l'étude en ayant accès à des bases de données supplémentaires.

BIBLIOGRAPHIE

1. Kilborn Ltd. 1982. Flood plain mapping : Colborne Creek, village of Colborne. Kilborn Ltd, 2200 Lake Shore Blvd West, Toronto, Ont M8V 1A4.
2. Leclerc, M., J. Marion, M. Heniche, T. Ouarda, and 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.
3. Leclerc, M., Y. Secretan, M. Heniche, T. Ouarda, and J. Marion. 2003. Une méthode prédictive non biaisée et géoréférencée d'estimation des dommages résidentiels d'inondation. *Canadian Journal of Civil Engineering* 30: 914-22.
4. McBean, E., J. Gorrie, M. Fortin, J. Ding, R. Moulton, and Univ of Waterloo, Waterloo, Ontario, N2L 3G1 Canada. Dept of Civ. Engrg. 1988a. Flood Depth-Damage Curves by Survey. *Journal of Water Resources Planning and Management [NEW YORK]* 114, no. 6: 613-34.
5. McBean, E. A., J. Gorrie, M. Fortin, J. Ding, R. Moulton, Univ of Waterloo, Waterloo, Ontario, N2L 3G1 Canada. Dept of Civ. Engrg. 1988b Adjustment Factors for Flood Damage Curves. *Journal of Water Resources Planning and Management [NEW YORK]* 114, no. 6: 635-646.
6. McCrory, J. A., L. D. James, D. E. Jones, and USA Army Corps Engineers. Dealing with Variable Flood Hazard. *Journal of the Water Resources Planning and Management division American Society of Civil Engineers [NEW YORK]* Vol. 102(2), pp. 193-208 (16 p.), 1976.
7. Paragon Engineering Limited, Ecologistics Limited, and Edward A McBean & Associates Limited. 1985. Development of flood depth-damage curves for residential homes in Ontario. 217 p.
8. Université de Sherbrooke, Centre de recherche en aménagement régional. Report on the evaluation of flood damages in 1976 at different water levels of the Richelieu River and the Baie Missisquoi. Upper Richelieu, Quebec, Canada. With projections for the period 1976-2030. *Mar 1977, 2v, tab, fig, app, 28 ref, numerical data* International Champlain Richelieu Board.
9. US Army Corps of Engineers. 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>.