

Une aide à la décision pour le choix des interventions en zone inondable

A decision aid methodology for the selection of intervention in floodplain analysis

C. BRETON, C. MARCHE *

Reçu le 27 janvier 2000, accepté le 15 mai 2001**.

SUMMARY

Each year, several rivers in Quebec are responsible for severe flooding and these events generate major socio-economic impacts. The frequency and magnitude of these episodes highlight the existence of a real flood risk. Using global information concerning level and extent of flood risk, authorities would be more likely to make appropriate decisions in the management of flood risk. This article results from a three years project aimed at developing a methodology for the analysis, forecasting and control of flood risk in Quebec. It suggests a concrete approach for the evaluation of the potential impact of floods in order to obtain a better knowledge of local risk in inhabited areas and exploits there results to evaluate the acceptability of the calculated risk and to plan appropriate risk minimisation interventions.

Risk is defined as the product of the mathematical expectation of a specified occurrence with the expected consequences of the event. In floodplain studies, flood risk is the probability of the occurrence at a given flood multiplied by the expected consequences resulting from this event. Different types of consequences may be observed, clearly the easiest to evaluate being direct or material damages and potential loss of life. The risk calculated using the proposed definition is attributable in variable proportions to the frequency of the floods and the amount of damages. A given calculated global risk on a site could be the result of frequent floods, each causing moderate damage or of a single (or more) extreme event, with very low probability of occurrence, but causing severe damage. Risk associated with rare events could be considered as an acceptable risk, a risk we decide to live with, since the resources available to prevent flood damage are often limited and a decision is taken to optimise the allocation of these resources. The flood level corresponding to

École Polytechnique de Montréal, Département des génies civil, géologique et des mines, CP 6079, succursale Centre-ville, Montréal, Québec.

* Correspondance. E-mail : claudemarche@courriel.polymtl.ca

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 14 août 2002.

the limit between acceptable and unacceptable risk must be determined by the population concerned and be based on a good knowledge of the risk situation.

The proposed methodology to evaluate and minimise flood risk for a site localised in a river flood plain involves six steps: (1) the realisation of a hydrologic frequency analysis to determine the amplitude of the floods associated with the flood frequency, (2) the hydraulic simulation of floods to predict water level and velocity in the stream for each scenario, (3) the assessment of direct damage and potential loss of life for each flood simulated, (4) the calculation of risk, (5) the risk analysis considering the limit of acceptable risk and (6) the choice and planning of appropriate intervention to eliminate unacceptable risk.

This approach has been applied to the study of a site along the Châteauguay River, a tributary of the St Lawrence River, a river that experiences flood events every two years or so. Seven flood scenarios (the 2, 3, 10, 20, 100, 1000, and 10000 years flood) are used to evaluate the risk for a site localised in the village of Huntingdon. Hydraulic characteristics, water level and velocity, associated with each flood scenario are determined using the DAMBRK model, a one-dimensional unsteady flow model. The results are incorporated in DOMINO, a geo-referenced software calculating flood impacts. This software allows the user to create a three-dimensional numerical model of the site based on topographic information. The superposition of hydraulic results provides the flow depth at any point within the site. Damage is evaluated by integrating the municipal roll number of Huntingdon, which provide the site location and value of each building, and gives an estimate of the population threatened by each flood event at the site. These results of direct damages are used to calculate the risk related to each flood event simulated on the Huntingdon site. For this application, the unacceptable risk has generally been agreed to be the risk resulting from the 20 years flood, or more frequent floods, for the material damages and to the number of potential losses of life associated with the 100 years flood or more frequent flood. The analysis indicates that an unacceptable risk of 23993 \$ per year for material damages and potential loss of life of 50 persons exist. Different site scale interventions to eliminate this risk have been simulated and proven to be efficient only if complemented with a few local modifications to the more exposed buildings.

This approach may be extended to the study of any river because it takes into consideration local hydrologic and hydraulic conditions. It has the advantage of being based on existing information and to be automated, which limits the time and resources required to obtain the base data and perform the necessary simulations.

Key-words: risk, floods, decision making, damages, flood plains.

RÉSUMÉ

Cet article a été réalisé dans le cadre d'un projet de trois ans visant à développer une méthodologie d'analyse, de prévision et de contrôle des risques d'inondation au Québec. Il présente une approche concrète pour calculer les impacts potentiels et le risque d'inondation et utiliser ces résultats afin d'évaluer la situation du risque local, de décider si les impacts doivent être minimisés et de choisir les moyens d'intervention appropriés. Le risque d'inondation est considéré comme étant le produit de la probabilité d'occurrence des crues et des conséquences occasionnées par ces événements. Les pertes de vies potentielles et les dommages directs sont évalués en simulant les niveaux d'eau de différents scénarios d'inondation à partir d'un modèle d'écoulement unidimensionnel non permanent, et en intégrant ces résultats à un logiciel géoréférencé de calcul des dommages d'inondation. L'analyse des

impacts et du risque calculé permet de dresser un portrait du montant des dommages annuels potentiels sur les sites habités le long du cours d'eau et un portrait de l'évolution des impacts en fonction de l'amplitude des crues. Cette analyse mène à l'identification des sites où existe un risque jugé inacceptable selon des critères préétablis. Pour chaque site où des interventions sont justifiées par le niveau de risque, des scénarios de minimisation des impacts tenant compte des mécanismes d'inondation sont élaborés et ensuite simulés afin d'en mesurer l'efficacité. Un exemple d'application à un site de la rivière Châteauguay illustre la méthode et les gains pouvant découler de son utilisation.

Mots clés : *inondations, risque, dommages, crues, décision.*

1 – INTRODUCTION

1.1 Cadre des travaux

Les crues de plusieurs rivières du Québec causent à chaque année des inondations et génèrent des impacts socio-économiques importants. Pensons par exemple aux conséquences des inondations du Saguenay en 1996, de la crue printanière de la rivière Châteauguay en 1998 ou encore aux débordements annuels de la rivière Chaudière dans la Beauce. La fréquence et l'ampleur des inondations touchant le Québec démontrent bien que la population est exposée à un risque réel d'inondation.

Au Québec, le gouvernement provincial prend régulièrement en charge le dédommagement des particuliers et des entreprises ayant subis des pertes suite à une inondation. Cependant il n'est pas improbable que dans un avenir plus ou moins rapproché, ce fardeau économique ne soit remis aux municipalités. Il devient donc intéressant pour les populations concernées et les autorités locales de connaître le niveau de risque sur leur territoire et les impacts des inondations potentielles pouvant les affecter. En possédant un portrait global de la situation, la population serait plus en mesure de gérer le risque et de prendre les mesures les plus adéquates et les plus rentables afin d'éliminer les pertes de vies potentielles dans les plaines inondables et de limiter les pertes matérielles.

Cet article présente une approche concrète pour effectuer l'évaluation et la minimisation des impacts et du risque d'inondation. Cette approche servira donc d'aide à la décision quant à la nécessité de réduire les impacts potentiels et quant au choix des moyens d'intervention qui seront utilisés à cette fin. Elle donne des éléments d'information utiles aux autorités mais ne vise pas une optimisation économique automatique du processus décisionnel. Un exemple d'application à un site de la rivière Châteauguay illustre la méthode et les gains pouvant découler de son utilisation.

L'estimation des impacts des inondations et l'évaluation du risque en découlant sont des problématiques pour lesquelles la littérature propose déjà différentes approches de calcul utilisant sensiblement les mêmes bases, soient l'analyse de fréquence des crues, la modélisation des écoulements et l'évaluation du coût des dommages annuels potentiels. Nous citons à titre d'exemple les travaux de BOYLE *et al.* (1998), GILARD et GENDREAU (1998).

Les travaux présentés dans cet article ont été réalisés à l'école polytechnique de Montréal dans le cadre d'un projet visant à étudier le risque d'inondation au Québec. Les premiers résultats de cette étude avaient permis de conclure que malgré que le risque hydrologique sur la rivière Châteauguay soit demeuré constant au cours des 60 dernières années (AWADALLAH *et al.*, 1999), le risque global d'inondation avait augmenté sur les cinq sites de la rivière Châteauguay étudiés, ayant plus que doublé de 1960 à 1996 (BOUILLON *et al.*, 1999). Ces résultats invitaient donc à réfléchir aux décisions et aux justifications d'intervention.

1.2 Notion de risque

Le terme de risque étant très largement utilisé dans plusieurs contextes différents, il importe de préciser la définition qui lui est attribuée dans cet article. De façon générale, le risque est le produit de la probabilité d'occurrence d'un événement et des conséquences de ce même événement (CSA, 1991). Dans le cas particulier où cet événement est une inondation, les conséquences prennent diverses formes, les plus évidentes étant les pertes de vies humaines et les dommages matériels directs. Les autres types de dommages, qu'on peut qualifier d'indirects et intangibles, sont difficilement évaluables avec les outils actuellement disponibles.

Le risque associé à une inondation est le produit de la probabilité d'occurrence annuelle de la crue causant cette inondation par les dommages matériels occasionnés par la même inondation.

Le risque (global) d'inondation est la sommation des risques associés à toute la gamme d'inondations possibles. Le risque d'inondation ainsi calculé représente le coût moyen annuel des inondations sur un territoire délimité, évalué sur un très grand nombre d'années.

Les pertes de vies potentielles sont également un risque, mais dans cette approche elles sont traitées distinctement du risque de pertes matérielles, car elles ne sont pas exprimées par le même dénominateur. Le risque de pertes matérielles est exprimé en dollars par année, les pertes de vies potentielles sont exprimées en nombre de personnes.

Le risque tient compte des dommages pouvant être occasionnés par toutes les crues possibles, dont la période de retour varie de 1 an à 10 000 ans et plus. Selon les caractéristiques du territoire étudié, le risque calculé apparaît attribuable en des proportions variables aux crues fréquentes ou aux crues plus rares. Dans le premier cas, les dommages potentiels sont relativement faibles mais sont susceptibles d'être occasionnés fréquemment sur une période de temps relativement courte, par exemple de 1 an à 10 ans. Dans le second cas, les dommages potentiels sont beaucoup plus importants, mais sont pondérés par une probabilité d'occurrence beaucoup plus faible, par exemple celle de la crue de période de retour de 1 000 ans. Dans chacun de ces cas, le risque d'inondation affecte de façon différente la population sur le plan économique, sécuritaire et sur le plan de la qualité de vie.

Les crues plus rares ayant de plus faibles probabilités de survenir sur une période de temps limitée à la durée de vie des infrastructures et des bâtiments, le risque lié à ces crues pourrait être négligé et considéré acceptable. Le risque acceptable peut donc être défini comme étant un risque dont on connaît l'exis-

tence, mais dont on est prêt à assumer les conséquences. Par exemple, lorsqu'un ouvrage hydraulique est dimensionné en fonction de la crue de période de retour de 1 000 ans, le risque associé à toutes les crues d'amplitude supérieure à celle de 1 000 ans est alors jugé acceptable.

Afin de limiter les interventions et les investissements qui seraient requis pour éliminer complètement le risque d'inondation sur un territoire, la population pourrait décider d'établir une limite au-delà de laquelle le risque sera jugé acceptable et de limiter ses interventions à l'élimination du risque considéré inacceptable.

2 – MÉTHODES

L'approche d'évaluation et de minimisation du risque proposée comporte six étapes distinctes, soit : établir la distribution de fréquence des crues, effectuer les simulations hydrauliques des écoulements pour associer des profondeurs et des vitesses d'écoulement à chaque crue, évaluer les impacts des inondations engendrées par ces crues, calculer le risque d'inondation, analyser les impacts et le risque existant et choisir une méthode de minimisation du risque en fonction du niveau de risque, des impacts et des mécanismes d'inondation. La *figure 1* illustre cette approche et indique les intrants nécessaires à son application.

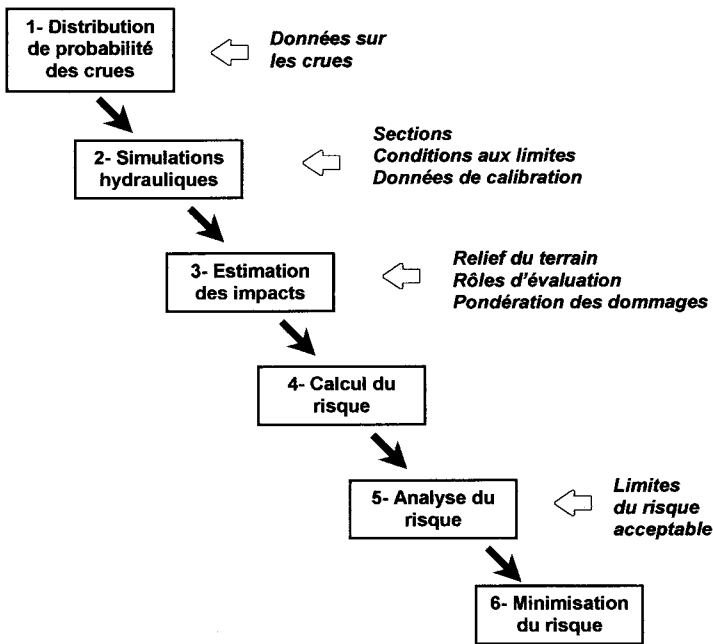


Figure 1 Schéma de l'approche. *Methodology.*

La démarche a pour objectif de suggérer les solutions conduisant à l'élimination de tous les risques jugés inacceptables et non de trouver des moyens économiques ou autres pour les compenser. Les incertitudes associées à toutes les étapes (incertitudes hydrologiques, hydrauliques, sur les impacts économiques, directs, indirects et intangibles, etc.) sont à minimiser mais jouent un rôle mineur dans la prise de décision ; elles pourraient modifier un optimum économique si un tel optimum était le but visé (GAUME, 1997 ; TORTEROT, 1993). Mais elles ne peuvent changer le caractère d'inacceptabilité d'une situation.

2.1 Évaluation des impacts d'inondation

Le calcul de la distribution de fréquence des débits de crues permet d'associer une probabilité aux débits qui seront utilisés pour simuler un certain nombre de scénarios d'inondation. Il est réalisé à l'aide de la loi permettant le meilleur ajustement à la série de débits étudiée. Pour caractériser les crues sur de longs tronçons, le débit est la variable la plus représentative des conditions d'écoulement et d'inondation engendrées. Contrairement aux niveaux locaux, par exemple, elle est d'une grande stabilité spatiale et puisqu'elle est mesurée plusieurs fois par jour en cas d'alerte, son analyse de fréquence est fiable. Travailler avec les débits et leur récurrence rend ainsi la méthode très pratique d'utilisation. Cette opinion résulte du bilan de plusieurs applications réalisées à ce jour (inondations dans la région de Laval-Montréal, inondations le long de la Chicoutimi, etc.).

Les crues sont simulées hydrauliquement afin d'établir, pour chaque scénario, le profil des niveaux et des vitesses d'écoulement le long du cours d'eau. Le modèle DAMBRK (FREAD, 1984), un modèle numérique d'écoulements à surface libre unidimensionnels et non permanents, est utilisé à cette fin. Le modèle DAMBRK, ou encore le modèle FLDWAV dont l'utilisation est prévue dans le futur, permettent le traitement précis des zones inondables (termes d'emmagasinement dans l'équation de conservation de la masse fluide, variation verticale du facteur de résistance à l'écoulement dans chaque section, calculs en régime non-permanent pour la prise en compte du laminage, conditions aux frontières internes dynamiques pour les particularités du cours d'eau comme les seuils, les rapides et les ponts, prise en compte des débordements latéraux, etc.). Sans changer l'esprit de la méthode, un modèle d'écoulement en deux dimensions peut, sur de courtes zones d'inondation, remplacer aisément les modèles unidimensionnels et permettre de meilleures simulations. Dans les zones à forts enjeux, les sections transversales décrivant la rivière sont typiquement distantes de 500 m environ et des sections de calcul peuvent être interpolées et insérées. Lorsque la précision le requiert, dans les zones habitées ou celles de contrôle hydraulique des écoulements, la distance est réduite à 100 m environ. Lors de la création du modèle hydraulique de la rivière, un calage est effectué. Il est basé sur les débits mesurés aux différents ponts et barrages instrumentés et sur les cartes d'inondation qui ont été produites après plusieurs crues importantes. La cartographie des zones inondées en crue de récurrence 20 ans est systématiquement disponible pour le calage préalable. Le modèle hydraulique est considéré calé lorsqu'il permet de retrouver une précision des niveaux locaux de l'ordre de 10 cm.

Les impacts (pertes de vies potentielles, dommages matériels directs) sont évalués automatiquement en incorporant les résultats des simulations hydro-

liques des scénarios de crues au logiciel DOMINO (GAGNON *et al.* 1998 ; SOBEK TECHNOLOGIES INC, 1998), un logiciel géoréférencé de calcul des impacts d'inondations développé à l'école polytechnique de Montréal pour Hydro-Québec. Les impacts sont évalués sur chaque site délimité, pour lesquels le logiciel DOMINO permet de constituer un modèle numérique du terrain naturel à partir de données sur le relief. Les résultats d'un scénario de simulation hydraulique sont intégrés au logiciel afin de constituer un modèle numérique de la surface libre des eaux et un modèle numérique des vitesses. Le calcul de l'intersection entre le modèle du terrain et celui de la surface des eaux permet d'établir les limites d'inondation. L'intégration dans DOMINO des rôles d'évaluation des municipalités concernées permet de compiler et de positionner les bâtiments contenus à l'intérieur des limites du site. Le logiciel identifie les bâtiments se trouvant en zone inondée et détermine les conditions d'inondation locales. Les dommages aux bâtiments, à leur contenu et les pertes de vies potentielles sont évalués à partir de l'évaluation foncière de chaque bâtiment, du nombre d'occupants et des conditions d'inondation prévalant pour chaque entité. Cette étape nécessite l'intégration au logiciel de critères de pondération des impacts des inondations permettant d'associer un pourcentage de pertes de la valeur totale des bâtiments et des pertes de vies potentielles aux profondeurs et aux vitesses d'écoulement (BRETON, 1999). La durée de l'inondation n'est pas prise en compte mais son effet est faible sur le montant des dommages directs. La durée devient importante dans l'évaluation des dommages indirects, que nous n'établissons pas par cette approche. Les facteurs de pondération des dommages utilisés sont tirés de ASCE (1988). Finalement les impacts calculés sur l'ensemble du site sont cumulés et présentés sous forme de rapport pour chaque scénario d'inondation simulé. Un exemple d'extrait de ce rapport est présenté au *tableau 1*.

À l'étape suivante, le risque d'inondation est calculé en faisant la sommation des produits de la probabilité d'occurrence annuelle et des dommages matériels de tous les scénarios d'inondations. Le risque de pertes de vies correspond directement au nombre de pertes de vies potentielles.

Donc, avec cette approche, il est possible d'obtenir un portrait relativement précis des impacts potentiels et du risque d'inondation en différents endroits le long d'un cours d'eau, en ayant recours exclusivement à des données provenant de sources existantes, ce qui présente l'avantage de minimiser le temps et les ressources requises. Les impacts évalués tiennent compte de la profondeur et des vitesses d'écoulement et négligent les autres facteurs tels la présence de débris flottants, les évacuations et la durée de submersion. L'effet de la présence d'un couvert de glace sur le niveau d'inondation a été étudié (BRETON, 1999), et il en est ressorti que son influence sur le niveau de risque était négligeable, sauf dans les cas où il y aurait formation d'embâcles.

2.2 Minimisation des impacts et du risque d'inondation

Les impacts et le risque d'inondation doivent être minimisés dans les cas où ils sont jugés inacceptables. Les limites entre le risque acceptable et non acceptable doivent alors être établies, par les autorités ou la population, pour les différents types d'impacts. Ces limites serviront de critères d'intervention pour intervenir sur le niveau de risque. De manière concrète, cette limite est exprimée en terme d'amplitude ou de période de retour de crues. Donc, les

Tableau 1 Extrait du rapport de calcul des dommages par la crue de 3 ans.

Table 1 Extract of damage report of the 3 year flood.

Municipalité	Matricule	Élévation terrain (m)	Valeur bâtiment (\$ 1998)	Profondeur écoulement (m)	Vitesse écoulement (m/s)	...	Dommages bâtiments (\$ 1998)	Dommages contenu (\$ 1998)
Huntingdon	9999-99-9999	48,44	52 400	0,19	2,02	...	0	5 240
Huntingdon	9999-99-9999	48,38	57 000	0,26	2,03	...	0	5 700
Huntingdon	9999-99-9999	48,58	101 200	0,06	1,72	...	0	10 120
Huntingdon	9999-99-9999	47,72	37 100	0,84	1,65	...	0	3 710
Huntingdon	9999-99-9999	47,98	76 600	0,58	1,62	...	0	7 660
Huntingdon	9999-99-9999	48,05	68 200	0,50	1,56	...	0	6 820
Huntingdon	9999-99-9999	48,06	61 500	0,48	1,53	...	0	6 150
Huntingdon	9999-99-9999	48,35	72 700	0,16	1,53	...	0	7 270
Huntingdon	9999-99-9999	48,20	78 500	0,30	1,57	...	0	7 850
...
Huntingdon	9999-99-9999	47,35	42 000	1,00	1,99	...	52 500	26 250

impacts et le risque découlant d'une crue, dont la période de retour est égale ou inférieure à celle de la limite, sont considérés inacceptables.

La compilation des dommages potentiels évalués pour l'ensemble des crues, tel que représentés à la *figure 5*, peut permettre d'identifier des niveaux critiques de dommages et ainsi guider les décideurs dans le choix de la crue de projet. Devront également être pris en compte les cotes d'inondation pouvant générer des conséquences particulièrement graves, tels l'inondation d'industries, d'institutions ou de voies d'évacuation.

Une fois les limites établies, les risques considérés inacceptables devront être minimisés afin de les réduire au niveau acceptable. Pour chaque site où des interventions sont justifiées, des scénarios de minimisation du risque tenant compte des mécanismes d'inondation sont élaborés et ensuite simulés afin d'en vérifier l'efficacité et d'en évaluer les gains.

3 – RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Cette approche d'évaluation et de minimisation du risque a été appliquée à la rivière Châteauguay, un affluent du fleuve Saint-Laurent situé au sud de Montréal. La suite de cet article présente, à titre d'exemple de la démarche proposée, les résultats obtenus pour un site d'étude couvrant une partie de la ville de Huntingdon, dans la province de Québec.

3.1 Caractéristiques du site d'étude

La rivière Châteauguay, dont le bassin versant est illustré à la *figure 2* (LAPOINTE, 1980), prend sa source dans la région des monts Adirondack, dans l'état de New York, aux États-Unis. Elle coule vers le nord, traverse la frontière du Québec pour se retrouver dans les Basses-Terres-du-Saint-Laurent. La brusque diminution de la pente quelques kilomètres après la frontière favorise la présence de vastes plaines d'inondation. Le bassin de la rivière Châteauguay couvre 2 543 km² dont plus de 43 % sont situés aux États-Unis (DESMEULES et GÉLINAS, 1981).

Les inondations dans le bassin se produisent principalement lors des crues printanières mais aussi, à l'occasion, lors de fortes pluies au début de l'été et en automne. La rivière Châteauguay sort de son lit principalement dans la région située juste en amont de Huntingdon, où se forment alors de grandes plaines inondées. Ces débordements touchent principalement les terres agricoles, mais causent également des perturbations et des dommages aux routes, aux bâtiments de ferme et aux habitations (DESMEULES et GÉLINAS, 1981).

La localisation de la ville de Huntingdon est indiquée à la *figure 2*, et la *figure 3* montre un plan d'ensemble de la région entourant la ville et les limites du site d'étude. Ce site d'étude se trouve en zone urbaine, en plein cœur de la ville. Le tronçon de rivière traversant le site se termine par un barrage.

Les mesures de débits maximums journaliers provenant de deux stations ont été combinées pour établir une distribution de fréquence des crues de la

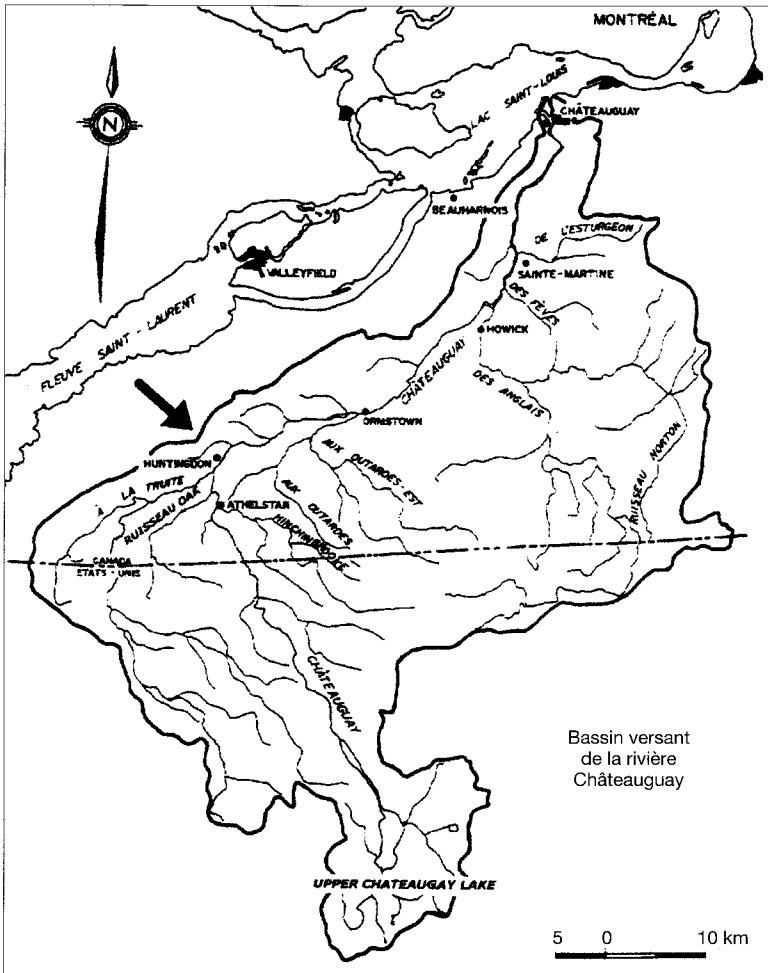


Figure 2 Bassin versant de la rivière Châteauguay (d'après LAPOINTE, 1980).
Chateauguay River watershed.

rivière Châteauguay basée sur 70 ans de données (AWADALLAH *et al.*, 1999). Le passage de la crue millénaire au printemps 1998 a permis de recueillir les données pour la validation des simulations hydrauliques et des plaines inondées. Les scénarios de crues servant à l'évaluation du risque, choisis de façon arbitraire, sont le passage des crues de 1, 2, 3, 10, 20, 100, 1 000 et 10 000 ans.

3.2 Situation actuelle au site d'étude

Les impacts des différents scénarios d'inondation ont été évalués à l'aide du logiciel DOMINO en y incorporant les résultats des simulations hydrauliques de la rivière Châteauguay et le rôle d'évaluation de la ville de Huntingdon. À titre d'exemple, la *figure 4* présente la simulation de l'inondation du site d'étude de Huntingdon par les crues de 3, 20, 100 et 1 000 ans. Un extrait du

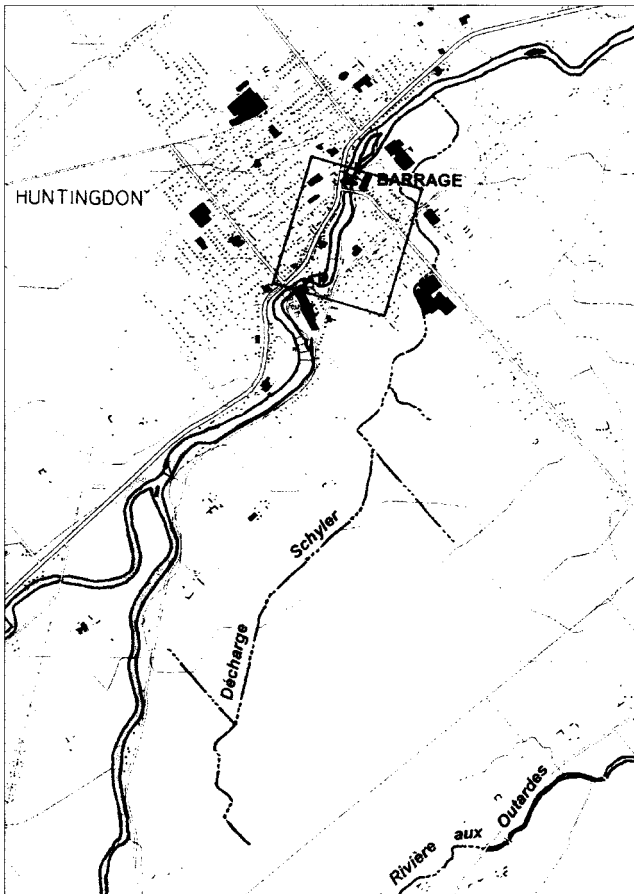


Figure 3 Région de la ville de Huntingdon.
Area surrounding Huntingdon Village.

rapport de calcul des dommages fourni par le logiciel, pour la crue de 3 ans, est présenté au *tableau 1* et les impacts et le calcul du risque d'inondation sur ce site sont présentés au *tableau 2*. La première colonne du *tableau 2* identifie les scénarios de crues par les périodes de retour des événements. Toutes les amplitudes de crues possibles ne pouvant être en pratiques simulées, les dommages calculés pour les crues choisies sont utilisés pour un intervalle de probabilité d'occurrence. Ces intervalles sont décrits à la colonne 2 du tableau. Les colonnes suivantes contiennent la probabilité associée à chacune des crues, les dommages matériels calculés par DOMINO, le risque associé à chaque crue, le risque cumulé et les pertes de vies potentielles. Le risque cumulé est le risque associé aux crues d'amplitude égale ou inférieure à la crue correspondante, et le risque cumulé total est en fait le risque global d'inondation, qui s'élève à 28 999 \$/an dans le cas étudié.

Afin de juger de l'acceptabilité du niveau de risque au site d'étude de Huntingdon, il faut à cette étape introduire les limites du risque acceptable. Ces limites pour l'exemple d'application ont été établies de façon arbitraire. À Hun-

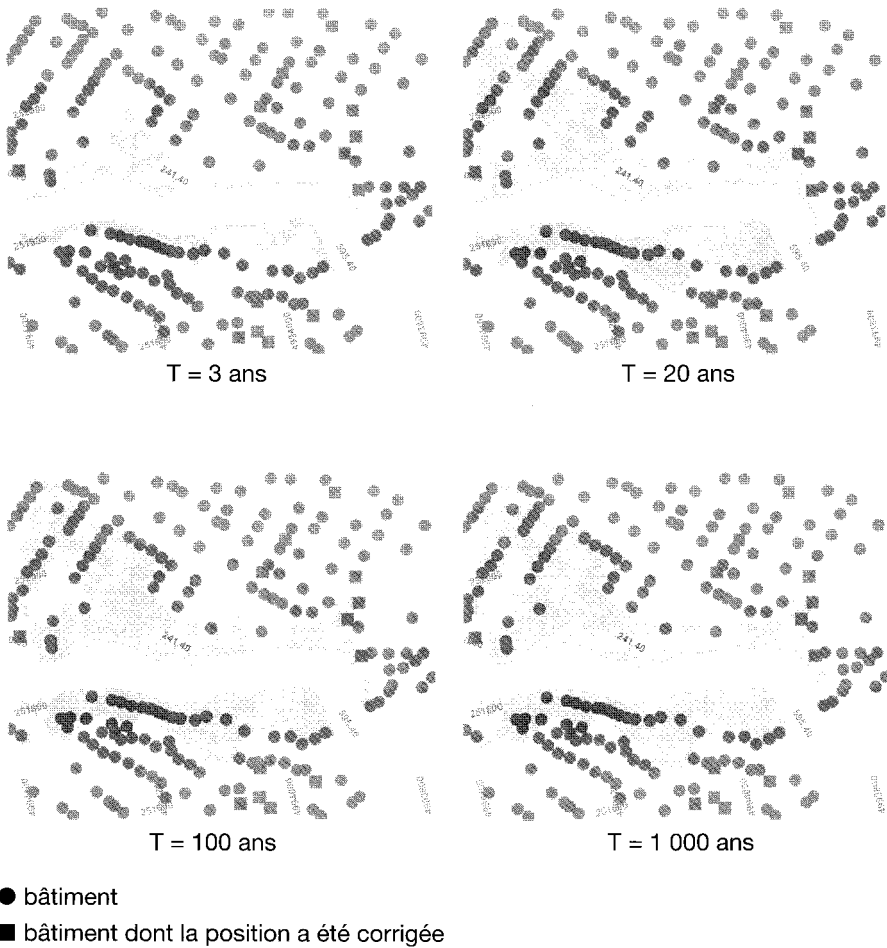


Figure 4 Résultats des simulations des crues de 3, 20, 100 et 1 000 ans.
Results from the simulation of 3, 20, 100, and 1000 year flood.

tingdon, on désire éliminer le risque d'inondation lié aux crues dont la période de retour est de 20 ans ou moins et les pertes de vies potentielles doivent être éliminées dans la plaine inondable pour toutes les crues inférieures à la crue centennale.

Selon les résultats compilés au *tableau 2*, le risque d'inondation inacceptable correspond au risque cumulé de la crue ayant une période de retour de 20 ans, soit un montant de 23 993 dollars/an. Les pertes de vies potentielles inacceptables, associées à la crue centennale, sont au nombre de 50. Selon les critères établis, il est donc nécessaire d'intervenir pour y réduire les impacts potentiels et le risque d'inondation au niveau acceptable.

Tableau 2 Impacts et risque d'inondation au site de Huntingdon.

Table 2 Impacts and flood risk at the Huntingdon study site.

T (ans)	Intervalle couvert par l'événement (ans)	Probabilité d'occurrence annuelle associée à chaque crue	Dommages matériels (\$)	Risque associé à chaque crue (\$/an)	Risque cumulé (\$/an)	Nombre de pertes de vies potentielles
1	1-2	0,5	0	0	0	0
2	2-3	0,17	3710	631	631	0
3	3-10	0,23	14 410	3 314	3 945	0
10	10-20	0,05	177 160	8 858	12 803	17
20	20-100	0,04	279 760	11 190	23 993	33
100	100-1000	0,009	491 567	4 424	28 418	50
1 000	1 000-10 000	0,0009	567 359	511	28 928	57
10 000	10 000 et +	0,0001	703 809	70	28 999	72

3.3 Minimisation des impacts et du risque

Un des principaux avantages de cette approche de minimisation des impacts potentiels et du risque d'inondation provient du fait qu'elle permet d'élaborer des solutions tenant compte du niveau de risque et de sa progression en fonction de l'amplitude des crues. Cette façon d'analyser le risque permet d'intervenir uniquement aux endroits où la situation est jugée inacceptable et de mettre sur pied des solutions optimales. Un maximum d'efficacité et de gains sont ainsi obtenus pour les investissements requis.

À la *figure 5*, les graphiques du risque cumulé en fonction de la période de retour et du risque associé à chaque crue en fonction de la période de retour montrent la progression du risque sur le site d'étude de Huntingdon. Ces graphiques illustrent la progression rapide du risque d'inondation pour les crues de période de retour de 20 ans et moins. Ces résultats indiquent que des travaux pour réduire les impacts de la crue de période de retour de 20 ans permettraient un maximum d'efficacité des interventions. Il y aurait donc moins de bénéfices économiques réalisables pour des investissements visant à intervenir sur des crues de plus forte amplitude. En revanche selon les critères établis, il est nécessaire d'intervenir sur les impacts de la crue centennale pour éliminer les pertes de vie potentielles. Il faut donc imaginer des interventions qui permettront de générer un maximum de bénéfices pour un minimum d'investissement, tout en éliminant le risque jugé inacceptable. Ces solutions doivent être élaborées en tenant compte des mécanismes d'inondation et des caractéristiques du site.

Les résultats des simulations à Huntingdon, représentés sur la *figure 4*, montrent que dès le passage de la crue de période de retour de 3 ans, la rivière commence à sortir de son lit, et que pour la crue de 20 ans déjà 33 bâtiments sont inondés. La topographie de la ville, relativement plane, contribue à cette progression rapide de l'eau sur le territoire habité. Cependant, la progression de la zone d'inondation est moins importante pour les crues de plus forte amplitude. Ce comportement s'explique par le fait que lorsque le niveau de la

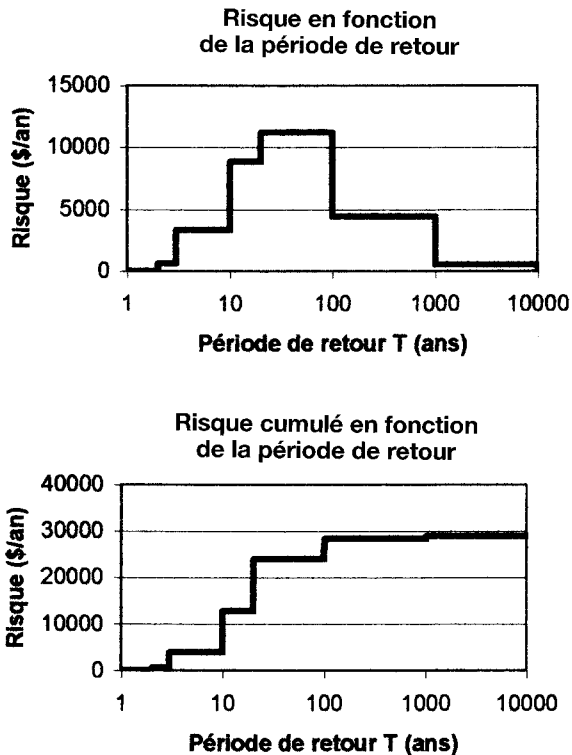


Figure 5 Le risque d'inondation évalué au site de Huntingdon.
Flood risk at the Huntingdon study site.

rivière Châteauguay atteint la cote de 49,4 m en amont de Huntingdon (crue de 20 ans), une portion du débit semble contourner la ville en empruntant la décharge Schyler, ralentissant ainsi la montée du plan d'eau dans le cours d'eau principal. D'ailleurs, au passage de la crue du 30 mars 1998, d'une récurrence de 1 000 ans, il semblerait que les dommages à Huntingdon équivalaient à ceux laissés par certaines crues d'amplitude plus faible survenues durant les dernières années. De plus, lors des crues, les plaines agricoles en amont de Huntingdon sont rapidement inondées, et le lac ainsi formé peut opérer un laminage de la crue avant qu'elle entre dans la ville. Finalement, lors du passage de la crue millénaire observé en mars 1998, il semble que ce lac avait atteint un niveau suffisamment élevé, à environ 3 km en amont de Huntingdon (*figure 3*), pour qu'une partie des eaux de la rivière Châteauguay soient déversées vers la rivière aux Outardes, contournant encore de cette façon la ville de Huntingdon. Ces phénomènes de laminage et de dérivation naturelle des crues expliquent la plus faible progression du risque d'inondation pour les crues dont la période de retour dépasse 20 ans.

Deux types de solutions sont envisageables pour la protection du site de Huntingdon. Le premier viserait à diminuer la cote maximale atteinte par le plan d'eau lors des crues afin de le maintenir à un niveau auquel il ne cause que très peu ou aucun dommage, par exemple la cote atteinte par la crue de 3 ans. Le

second viserait à protéger le site ou certains bâtiments contre la montée des eaux en les isolant. La combinaison de ces deux alternatives est aussi possible.

Parmi les interventions envisageables, il existe la possibilité de modifier la relation débit/niveau au barrage de Huntingdon. Cette solution permettrait de contrôler l'élévation initiale du plan d'eau et sa montée en fonction du débit. Cette intervention nécessiterait des travaux ponctuels, sur le seuil et l'évacuateur.

Une autre solution possible viserait à diminuer le débit du tronçon de rivière traversant le site en déviant les eaux. La dérivation naturelle des eaux par la décharge Schyler commence à s'opérer au passage de la crue de période de retour de 20 ans. Le détournement des eaux vers la décharge Schyler lors du passage des plus faibles crues, dont l'amplitude correspond à des périodes de retour de 3 à 20 ans, permettrait de réduire le débit et donc la cote de la rivière Châteauguay pour ces crues. Il suffirait d'abaisser localement le niveau du terrain où s'effectue le déversement des eaux.

La construction de murs pouvant contenir les crues dans le lit de la rivière en amont du barrage dans la ville de Huntingdon constitue une autre solution envisageable. Le site d'étude s'étend sur 0,6 km, ce qui représente une distance relativement courte à aménager. Le laminage des crues opéré de façon naturelle en amont permet de limiter la hauteur des ouvrages nécessaires pour contenir toutes les crues.

L'efficacité et les gains réalisables, en termes de réduction des impacts et de bénéfices économiques, peuvent être vérifiés par la simulation des trois interventions décrites précédemment. Les simulations hydrauliques des écoulements prévus après mise en œuvre des interventions sont alors refaites en tenant compte des modifications correspondantes apportées au territoire et les impacts relatifs aux nouveaux écoulements sont évalués. Les résultats ainsi obtenus et les économies moyennes annuelle réalisables par les interventions au site d'étude de Huntingdon sont présentés au *tableau 3*.

Tableau 3 Résultats des interventions simulées au site de Huntingdon.

Table 3 Results from simulated damage reduction measures at the Huntingdon study site.

Intervention simulée	Risque d'inondation inacceptable (\$/an) ^a		Économies annuelles (\$ 1998) ^a	Nombre de pertes de vies potentielles ^b	
	Avant	Après		Avant	Après
Dérivation par la décharge	23 993	5 807	18 186	50	8
Modification du seuil	23 993	640	23 353	50	4
Murs de protection	23 993	0	23 993	50	0

^a Associés à la crue de période de retour de 20 ans ; ^b Associés à la crue de période de retour de 100 ans.

Les résultats indiquent que la seule intervention suffisant à éliminer complètement les impacts et le risque d'inondation inacceptables est la construction de murs de protection. Cependant ces travaux pourraient nécessiter des investissements très importants, dépassant largement les gains économiques. Des travaux pour modifier le seuil du barrage pourraient s'avérer beaucoup moins coûteux. L'efficacité de cette intervention pourrait être améliorée en intervenant de façon individuelle sur les bâtiments pour lesquels il existe des impacts résiduels, soit les 640 \$/an en dommages matériels et les quatre pertes de vies potentielles.

4 – CONCLUSION

L'évaluation des impacts potentiels des inondations peut mener à une utilisation optimale des ressources allouées à la minimisation de ces impacts. Cette évaluation permet de dresser un portrait de la situation actuelle du risque d'inondation local et de disposer des informations nécessaires à la prise de décision, par la population et les autorités locales, pour la mise sur pied de mesures de minimisation du risque. Dans certaines situations les effets bénéfiques des aménagements peuvent être pris en compte dans les processus de décision, mais ils ne peuvent changer le caractère inacceptable de certaines situations, par exemple quand il existe un danger pour la vie. En fait, la méthode informe le décideur mais n'automatise pas sa décision économique optimale.

L'approche appliquée à un site de la rivière Châteauguay est transposable sur toute autre rivière, car elle tient compte des conditions hydrologiques et hydrauliques locales. Les outils utilisés permettent également de mesurer les effets des modifications apportées au cours d'eau ou au site et à l'occupation du territoire. Ainsi, ils pourraient, en plus de servir d'outils de gestion des impacts des inondations, servir à la planification à long terme du développement. Pour obtenir un tableau plus complet, il faudrait étudier le bassin versant de façon globale, inclure à la méthode l'évaluation et la prise en compte des dommages indirects et tenir compte de la durée des inondations. Le modèle de simulation numérique utilisé est un modèle d'écoulement non permanent qui peut donc permettre de suivre la croissance et la décroissance de la crue, à condition d'y incorporer l'hydrogramme. Cet hydrogramme pourrait être simulé par un modèle hydrologique qui serait alors couplé au simulateur hydraulique. En incorporant les prévisions météorologiques, on disposerait alors de toutes les données nécessaires à la prévision des inondations et à leur suivi en temps réel. Ces informations pourraient contribuer à l'élaboration de mesures d'urgence et à leur mise en œuvre suivant la progression de l'inondation. Toutefois, pour ce type d'application, le comportement de la population face au risque et les incertitudes sur les prévisions météorologiques devraient être prises en comptes car elles sont susceptibles d'influencer les impacts générés par l'inondation.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient le Fonds pour la formation de chercheurs et d'aide à la recherche (FCAR) du gouvernement du Québec qui finance ce projet. Les auteurs tiennent également à remercier tous les intervenants ayant collaborés à la recherche des données requises pour la réalisation de ces travaux.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERING (ASCE), 1988. Evaluation Procedure for Hydrologic Safety of Dams. *Task Committee on Spillway Design Flood Selection*.
- AWADALLAH A.G., ROUSSELLE J., LECONTE R., 1999. Évolution du risque hydrologique sur la rivière Châteauguay. *Revue canadienne de génie civil*, 26 (4), 510-523.
- BOUILLON M.C., BRISSETTE F.P., MARCHE C., 1999. Le risque d'inondation et son évolution sur la rivière Châteauguay. *Revue canadienne de génie civil*, 26 (2), 186-196.
- BOYLE S.J., TSANIS I.K., KANAROGLOU P.S., 1998. Developing geographic information systems for land use impact assessment in flooding conditions. *J. Water Resour. Plng. and Mgmt*, ASCE, 124 (2), 89-98.
- BRETON C., 1999. Une méthode d'analyse et de minimisation du risque d'inondation appliquée à la rivière Châteauguay. Mémoire de maîtrise, École polytechnique de Montréal, département des génies civil, géologique et des mines.
- CANADIAN STANDARD ASSOCIATION (CSA), 1991. Risk Analysis Requirements and Guidelines, CAN/CSA-Q634-91.
- DESMEULES J., GÉLINAS J.P., 1981. Caractéristiques physiques et démographiques, eaux de surface, bassin versant de la rivière Châteauguay. Édité par le gouvernement du Québec, ministère des Richesses naturelles, Direction générale des eaux, dans la série Programme de connaissances intégrées.
- FREAD D.L., 1984. DAMBRK – The NWS dam-break flood forecasting model. Office of hydrology, National Weather Service, Silver Spring, Maryland, USA.
- GAGNON J., QUACH T.T., MARCHE C., LESSARD G., 1998. Computerised evaluation of flood impact. *10th CSDA/CANCOLD Dam Safety Conference*. Halifax, Canada.
- GAUME, 1997. Estimation du coût des dommages liés aux inondations pour l'évaluation de projets d'aménagement sur la Loire. Séminaire Jacques-Cartier : analyse de décision et du risque en hydrologie, Bobée B., Lang M. (Ed.), INRS-Eau, 27-29 octobre 1997.
- GILARD O., GENDREAU N., 1998. Inondabilité : une méthode de prévention raisonnable du risque d'inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants. *Revue des Sciences de l'Eau*, 3, 429-444.
- LAPOINTE D., 1980. Eaux de surface – Bassin versant de la rivière Châteauguay. Édité par le gouvernement du Québec, ministère des Richesses naturelles, Direction générale des eaux, dans la série Programme de connaissances intégrées.
- SOBEK TECHNOLOGIES INC., 1998. DOMINO, guide de l'utilisateur, version 1.5.
- TORTEROT, 1993. Le coût des dommages dus aux inondations ; estimation et analyse des incertitudes. Thèse de doctorat, École nationale des Ponts et Chaussées.