

---

# Propagation d'onde de rupture de barrages et de crue

## Applications de modélisation numérique 2D

**Thierry Faure\*** — **Tung Quach\*\*** — **Jean Joannette\*\***  
**Marie-Hélène Briand\*\*\*** — **Éric McNeil\*\*\***

\* *Centre d'hydraulique Canadien*  
*Conseil national de recherches, Chemin de Montréal*  
*Ottawa, Canada, K1A 0R6*  
*Thierry.Faure@nrc.ca*

\*\* *Hydro-Québec*  
*Barrages et ouvrages civils, 75 René-Lévesque ouest*  
*Montréal, Québec, Canada, H2Z 1A4*  
*{Quach-Thanh Tung, Joannette.jean@hydro.qc.ca}*

\*\*\* *RSW inc.*  
*800 boul. René Lévesque Ouest*  
*Montréal, Québec, Canada, H3B 1Z1*  
*{mariehelene.briand, eric.mcneil@rswinc.com}*

---

*RÉSUMÉ. On décrit l'utilisation du logiciel Telemac-2D pour deux études de simulations distinctes. L'une est la propagation en rivière de l'onde de rupture d'un barrage, causant des débordements intenses vers un fleuve de très grande profondeur. L'autre est la propagation d'une crue extrême dans un réseau de rivières contrôlé par des barrages, évacuateurs de crues et remblais de terre. Dans les deux cas, le logiciel Télémac-2D permet de simuler à l'intérieur du modèle les conditions de rupture des ouvrages et les érosions.*

*ABSTRACT. This article describes the use of the Telemac-2D software in two distinct river applications. First for the propagation of a dam-break wave, with large bank overflow, towards a very deep estuary. The second application is for the propagation of a long extreme flood among a network of rivers controlled by dams, flood gates and earth embankments. In both applications, the model allowed internal breaks of structures and bank erosion.*

*MOTS-CLÉS : rupture de barrage, érosion, débordement, crue, modèle numérique.*

*KEYWORD: dam break, erosion, overflow, flood, numerical model.*

---

## **1. Introduction**

Dans le cadre de son programme de Sécurité des barrages, la société d'état Hydro-Québec, chargée de produire, transporter, et de distribuer l'électricité du Québec, doit effectuer des études de rupture pour l'ensemble de ses barrages. Ces études sont requises pour la préparation de plans d'urgence mis en place en collaboration avec les autorités locales.

Ces plans doivent être préparés à partir des résultats de simulation de rupture des barrages en conditions hydrologiques normales et du comportement du réseau hydrique en cas de crues, et en particulier la crue maximale probable (CMP).

Dans la plupart des cas, les rivières du Québec sont bien encaissées et un modèle numérique unidimensionnel est justifié. L'approche 1D devient plus approximative lorsque des débordements latéraux intenses se produisent vers d'autres vallées, ou lorsque l'onde de rupture se propage dans des zones plates et habitées. Dans ces cas, les résultats doivent refléter la nature bi-dimensionnelle des écoulements et un modèle 2-D est requis pour identifier précisément les zones inondables. Dans les cas où la rivière se sépare en plusieurs chenaux (canal de dérivation, écoulement autour de plusieurs îles importantes) un modèle 2-D est également plus approprié.

Le Centre d'Hydraulique Canadien (CHC), en collaboration avec Hydro-Québec et la firme RSW Inc., a utilisé Telemac-2D pour effectuer des simulations de rupture et de propagation de crues sur certaines rivières. Cet article décrit deux applications du modèle sur le territoire du Québec : d'une part, l'estuaire de la rivière Manicouagan, situé sur la côte nord du Saint-Laurent, et, d'autre part, le confluent entre la rivière des Outaouais et le fleuve Saint-Laurent dans la région de Montréal.

## **2. Etudes de rupture de barrages : approche de modélisation**

### **2.1. *Choix des outils de calcul***

Le logiciel Telemac-2D, développé par le Laboratoire national d'hydraulique et environnement de l'Electricité de France à Chatou, a été retenu pour procéder aux simulations hydrodynamiques. La robustesse et la flexibilité de ce logiciel ont été déterminantes dans ce choix.

Le logiciel a fait l'objet de nombreux tests de validation dans différents cas d'écoulements complexes [Cooper, 1996]. Le logiciel a notamment été appliqué et ses résultats ont été comparés aux observations sur le site pour deux cas pratiques : simulation de crue dans la rivière Culm en Angleterre [Bates *et al.*, 1995] et simulation de la rupture du barrage de Malpasset en France [Hervouet et Rougé, 1996]. Une excellente adéquation entre les résultats de simulations et les observations disponibles a été démontrée dans les deux cas.

Les utilisateurs de Telemac-2D peuvent bénéficier d'une souplesse importante compte tenu de la possibilité de programmer le code, en langage Fortran. Ainsi, le processus de simulation peut être bien contrôlé. Cet avantage a pleinement été exploité et s'est avéré pratiquement indispensable dans les études présentées dans cet article ; notamment pour le contrôle de la formation de brèches dans les ouvrages situés à l'intérieur du domaine de calcul, et pour le traitement des conditions aux frontières. Ces points s'avèrent généralement complexes dans le cadre des études de crues extrêmes.

## **2.2. Discrétisation numérique du domaine d'étude**

Le logiciel Telemac-2D simule les conditions d'écoulement à partir d'un maillage irrégulier d'éléments triangulaires. Dans le cadre des applications pratiques qui font l'objet du présent article, ce type de maillage permet de représenter adéquatement la présence de différentes structures dans le domaine de calcul. Plusieurs avantages lui sont généralement attribués, notamment la possibilité de décrire précisément les limites du domaine d'étude qui est caractérisé par une géométrie complexe, de densifier localement le maillage, etc. Ainsi, le maillage a pu être élaboré de façon à localiser précisément les zones potentielles de rupture et de déversement des débits transitant par les ouvrages d'évacuation des aménagements situés dans le domaine de calcul. Dans le même ordre d'idées, le maillage a pu être densifié et adapté le long des routes qui peuvent influencer significativement les débordements latéraux en conditions d'inondation, de même que dans les zones correspondant à des voies de contournement potentielles.

## **2.3. Simulations numériques**

Les deux cas d'étude de rupture de barrages considérés requièrent de prendre en compte :

- les apports hydrologiques qui caractérisent respectivement les différents scénarios de crues extrêmes considérés ;
- le déversement de débit par les ouvrages d'évacuation des barrages situés à l'intérieur du domaine d'étude ;
- le phénomène de formation de brèche des ouvrages de retenue situés à l'intérieur du domaine de calcul.

La spécification des apports hydrologiques pour chacun des scénarios de crues considérés s'effectue par le biais du traitement des conditions aux frontières. De façon générale, le flux massique transitant par la ou les frontières amont du modèle en fonction du temps est spécifié. La spécification de la condition à la limite aval du modèle s'articule autour du niveau de la surface d'eau. Elle fait l'objet d'une description spécifique pour chacun des deux cas d'application.

L'introduction du code Fortran lors des simulations a pour but de représenter fidèlement l'utilisation réelle des ouvrages d'évacuation durant les crues intenses, ainsi que l'initiation et le développement des brèches dans les barrages ou leurs appuis. Les évacuateurs de crues ont été représentés par un doublet puits-source. La capacité d'évacuation normale, en tenant compte des niveaux d'eau amont et aval, a été considérée.

Le phénomène de formation de brèches a été pris en considération avec l'ajout, dans le code Telemac-2D, de la modification de la bathymétrie. La cote des nœuds au droit des brèches était abaissée de manière à créer une ouverture dans les remblais ou dans les évacuateurs lorsque le niveau d'eau amont dépassait la cote de rupture considérée. On contrôlait aussi la durée de formation des brèches. L'hydrodynamique était alors calculée par le logiciel qui propageait autant l'onde de la crue amont que l'onde interne créée par la rupture de l'évacuateur ou par l'érosion de la brèche développée dans les appuis de l'ouvrage. Dans les cas impliquant la rupture partielle d'un évacuateur, le débit déversé était ajusté conséquemment.

### 3. Applications

#### 3.1. *Embouchure de la rivière Manicouagan*

##### 3.1.1. *Description du domaine d'étude*

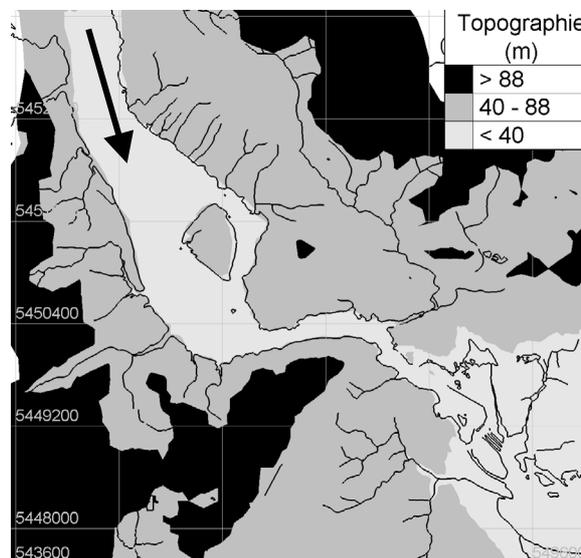
La rivière Manicouagan a été aménagée pour la production hydroélectrique avec 5 barrages principaux répartis sur une distance de 200 km. La rupture du barrage le plus en amont (figure 1) entraînerait la rupture des barrages situés en aval et produirait, à l'embouchure, un débit de pointe de 675 000 m<sup>3</sup>/s, équivalent à 15 fois celui de la rupture du barrage de Malpasset. Cette onde de rupture se propagerait alors vers une zone habitée importante avant d'atteindre le fleuve Saint-Laurent.



**Figure 1.** *Barrage amont*

En amont de l'embouchure, les berges de la rivière sont raides (pente de l'ordre de 40 degrés) avec des dénivelés de plus de 65 m entre le thalweg de la rivière et le sommet des collines avoisinantes. La vallée à cet endroit est également en forme de « S » (figure 2) avec un rétrécissement important.

L'estuaire de la rivière Manicouagan est peu profond, de l'ordre de quelques mètres, mais il débouche brusquement dans le Saint-Laurent, une ancienne vallée glaciaire de 50 km de largeur, dont les profondeurs atteignent 300 m. Les marées d'équinoxe sont de l'ordre de 4,2 m. Le modèle numérique devait inclure non seulement la rivière et les zones de débordement, mais aussi une grande partie du Saint-Laurent afin d'y déterminer la remontée des niveaux à la suite de la rupture du barrage.

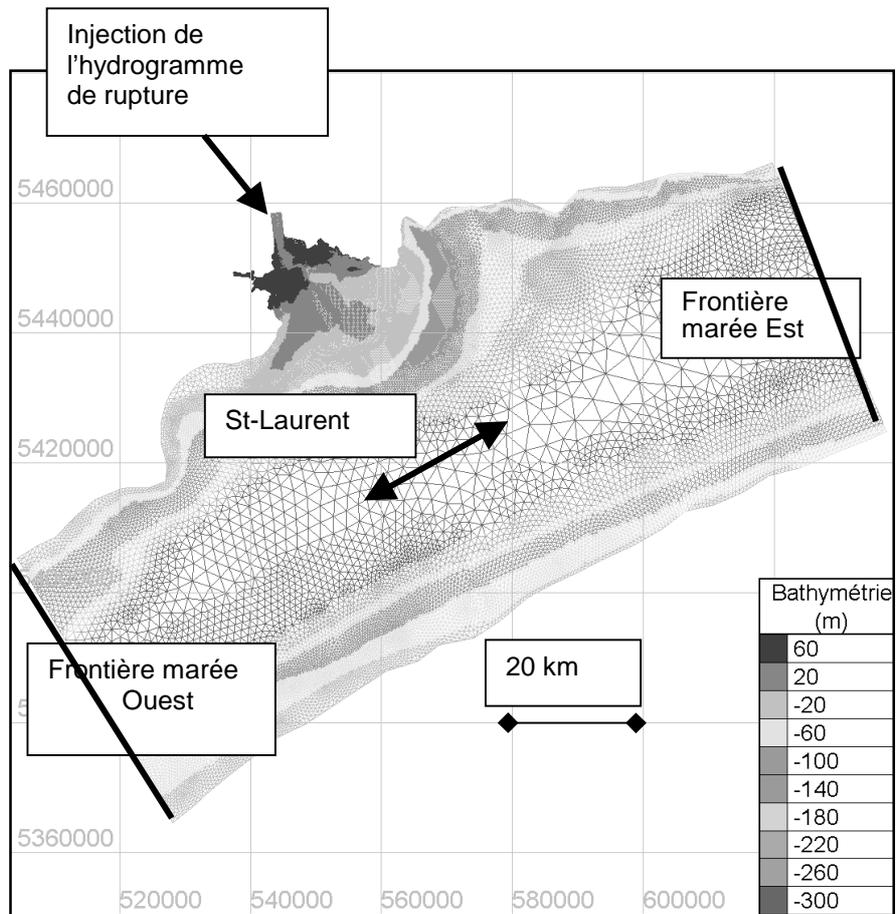


**Figure 2.** Rivière Manicouagan à l'amont de son estuaire

### 3.1.2. Modélisation numérique

La simulation de propagation de l'onde de rupture associée à cet événement a été initialement effectuée par la firme RSW le long des 200 km depuis le barrage le plus en amont à l'aide du modèle unidimensionnel FLDWAV. Toute la région de l'embouchure de la rivière Manicouagan a ensuite été modélisée avec Telemac-2D, en utilisant les résultats du modèle FLDWAV pour définir les conditions de débit à la frontière amont du modèle 2-D de l'estuaire de la Manicouagan. La marée a été imposée aux deux frontières du Saint-Laurent, situées à 60 km en amont et en aval de la rivière Manicouagan, loin de la zone d'étude située au centre du modèle.

La donnée la plus importante d'un modèle de calcul des inondations est, en plus de la bathymétrie de la rivière, la topographie assez précise pour permettre une représentation adéquate des régions inondées. Souvent une route est surélevée par rapport au terrain avoisinant et peut donc canaliser l'écoulement, et un ruisseau paraissant *a priori* négligeable peut permettre de détourner l'eau vers un autre quartier. Il faut donc que, d'une part, les triangles du maillage décrivent la direction de ces obstacles et, d'autre part, que leur topographie soit connue avec précision.



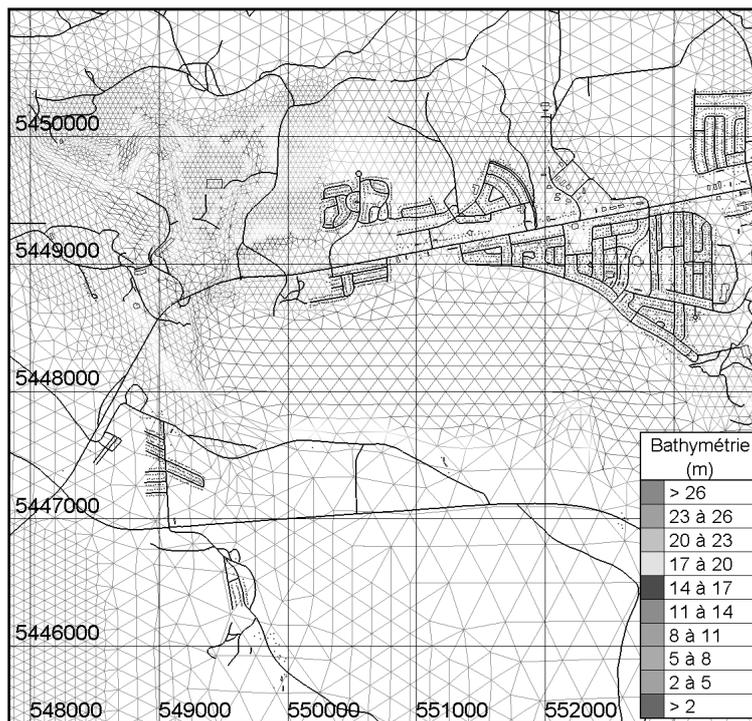
**Figure 3.** Maillage de l'estuaire

Le modèle numérique a été préparé pour représenter différentes conditions qui ne sont pas nécessairement compatibles :

- injection d'un hydrogramme de rupture à l'entrée amont du modèle dont le débit de pointe est  $675\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ ,

- propagation de l'onde de rupture à l'entrée amont du modèle dans une vallée étroite de topographie très accidentée en forme de « S »,
- écoulements parfois perpendiculaires à la pente des berges,
- propagation des écoulements de débordement à travers les collines dans des zones habitées et le long de cours d'eau secondaires,
- ruptures et érosions de plusieurs ouvrages hydrauliques, simultanées ou successives, au passage de l'onde de rupture (barrages en béton, remblais, prise d'eau, évacuateurs),
- génération de marées aux frontières aval du modèle à l'est et l'ouest du Saint-Laurent dans de très grandes profondeurs d'eau,
- nécessité d'obtenir des résultats fiables non lissés.

Le maillage global de la région est indiqué à la figure 3. Il comprend plus de 36 000 nœuds. Le détail autour des zones d'inondation est indiqué à la figure 4, ainsi que les routes principales et les maisons. Afin de minimiser le nombre de nœuds, certaines mailles ont été allongées dans un rapport allant jusqu'à 1:3.



**Figure 4.** Exemple de détail du maillage

La taille des mailles, le pas de temps et le schéma numérique ont joué un grand rôle dans le succès des simulations. Le maillage initial du Saint-Laurent, avec ses grandes profondeurs, fonctionnait très bien avec des pas de temps de l'ordre de plusieurs dizaines de secondes, mais ceux-ci étaient incompatibles avec la propagation d'une onde de rupture produisant des vitesses d'écoulement de 25 m/s. Le modèle devenait instable sur les rives en pente du fleuve à cause du nombre de Courant trop élevé. Un compromis a donc été trouvé entre la taille des mailles du Saint-Laurent, le pas de temps nécessaire, et la durée des calculs.

Le schéma numérique utilisé est le schéma FCT (Flux Corrected Transport) choisi pour sa stabilité dans le cas de pente forte des berges et pour la conservation de la masse.

Lors du passage de l'onde de rupture provenant de l'amont, les structures hydrauliques (barrages, déversoirs, évacuateurs) construites sur la rivière Manicouagan commencent à se rompre selon des critères établis à l'avance (niveau d'eau provoquant l'initiation de la brèche, temps de développement et dimensions de la brèche). Ces critères de rupture ont été pris en considération dans le modèle en les programmant dans le code fortran de Telemac-2D. Le modèle numérique calculait alors automatiquement l'hydrodynamique des écoulements dans les brèches ainsi formées. Pour obtenir des mesures de débits cohérentes à travers ces ouvertures, il fallait maintenir au minimum 4 points du maillage au fond de la brèche. La figure 5 montre une vue 3D du maillage représentant le fond de la rivière avant et après la formation de certaines brèches.

### 3.1.3. Résultats

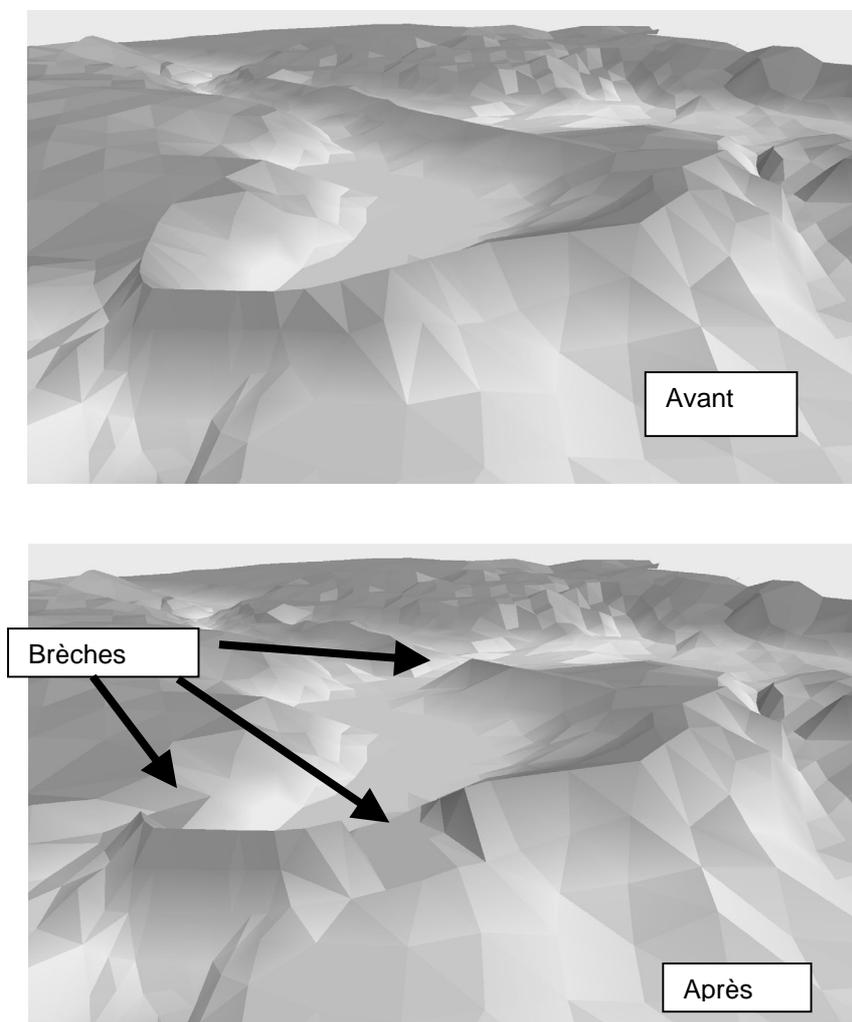
La remontée du niveau d'eau à l'amont du modèle 2D correspondait très bien à celle estimée par le modèle 1D. Cette comparaison, qui n'est bien sûr applicable que dans la zone amont avant tout débordement, indique que dans les deux modèles les coefficients de frottement étaient correctement choisis.

Le coefficient de frottement des plaines inondables influence la remontée des niveaux d'eau, et il est difficile de l'étalonner car la rupture « prototype » n'existe pas. Cependant le modèle Telemac-2D a été étalonné par EDF-LNHE dans le cas de la rupture de Malpasset, et ces résultats ont été utilisés pour estimer le coefficient de frottement des plaines inondables et des collines avoisinantes de la rivière Manicouagan, en l'ajustant pour tenir compte des conditions locales.

Les résultats obtenus sur les berges de l'estuaire de la Manicouagan font apparaître clairement les voies de débordement le long des vallées et ruisseaux menant vers les différents quartiers inondés. Il est ainsi possible d'identifier la progression des inondations et le temps dont on disposerait pour évacuer la population en cas d'urgence.

Les résultats du modèle indiquent que, lors du passage de l'onde de rupture à la sortie de l'estuaire de la Manicouagan, où la profondeur d'eau demeure normalement

faible (quelques mètres) et la rivière est étroite, l'écoulement est torrentiel. A la sortie de l'embouchure, les profondeurs augmentent rapidement jusqu'à 300 m et l'écoulement s'étale en panache dans le Saint-Laurent, provoquant la formation d'un ressaut hydraulique avant de redevenir en régime fluvial. Ce ressaut calculé par le modèle isole les phénomènes hydrodynamiques de l'estuaire (écoulement dû aux forts débits de rupture amont) de ceux du fleuve Saint-Laurent (hydrodynamique dominée par la marée qui ne parvient ainsi pas à remonter dans l'estuaire de la Manicouagan).

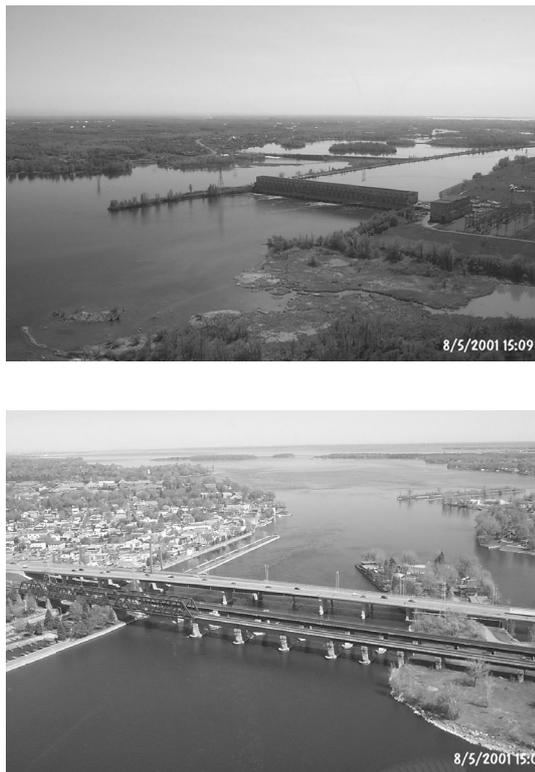


**Figure 5.** Formation de brèches dans la bathymétrie du modèle Telemac

Ces simulations ont été réalisées malgré les limites d'application d'un modèle 2-D horizontal dans le cas d'écoulement stratifié, comme celui du Saint-Laurent. En effet, les phénomènes de différence de densité entre l'eau de la Manicouagan (qui serait très boueuse mais non salée) et l'eau salée du Saint-Laurent n'ont pas pu être simulés car ils créent une stratification horizontale. De même, à la sortie de l'estuaire de la Manicouagan, les courants très importants de la rivière vont se prolonger vers le Saint-Laurent dans la couche supérieure, tandis que les couches profondes (qui descendent jusqu'à 300 m de fond) ne seront pas affectées, créant ainsi un profil de vitesse sur la verticale que le modèle 2-D ne pouvait pas évaluer. On estime toutefois que même si les vitesses de surface ne sont pas représentées correctement par le modèle, les niveaux d'eau simulés dans le Saint-Laurent devraient être représentatifs de la réalité.

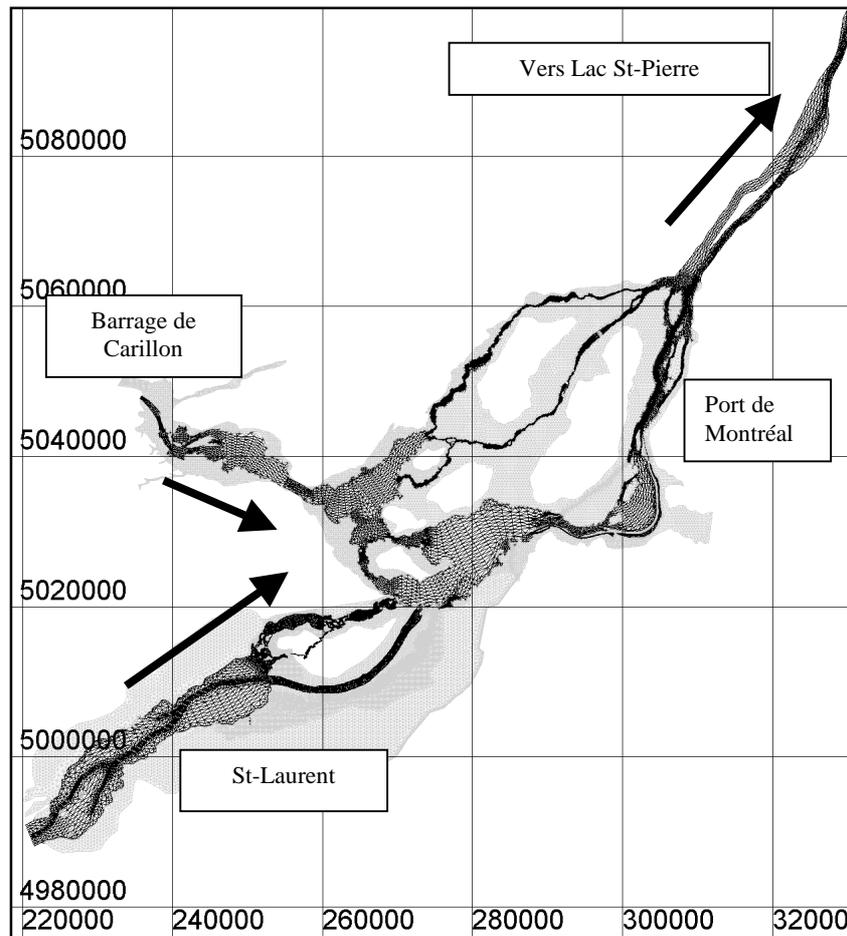
### 3.2. Région de Montréal

#### 3.2.1. Description du domaine d'étude



**Figure 6.** Canaux et îles autour de Montréal

La ville de Montréal se trouve au confluent entre le fleuve Saint-Laurent et la rivière des Outaouais. Cette région représente un réseau de rivières, avec de nombreuses îles de toutes tailles et de nombreux lacs (figure 6) aménagés avec plusieurs séries de barrages pour contrôler les niveaux du fleuve. Le barrage de Carillon (figure 7) se trouve à 80 km à l'amont du port de Montréal sur la rivière des Outaouais. La voie maritime du Saint-Laurent (voie navigable pour remonter de l'Atlantique jusqu'au Lac Supérieur) est aménagée le long de ce secteur.



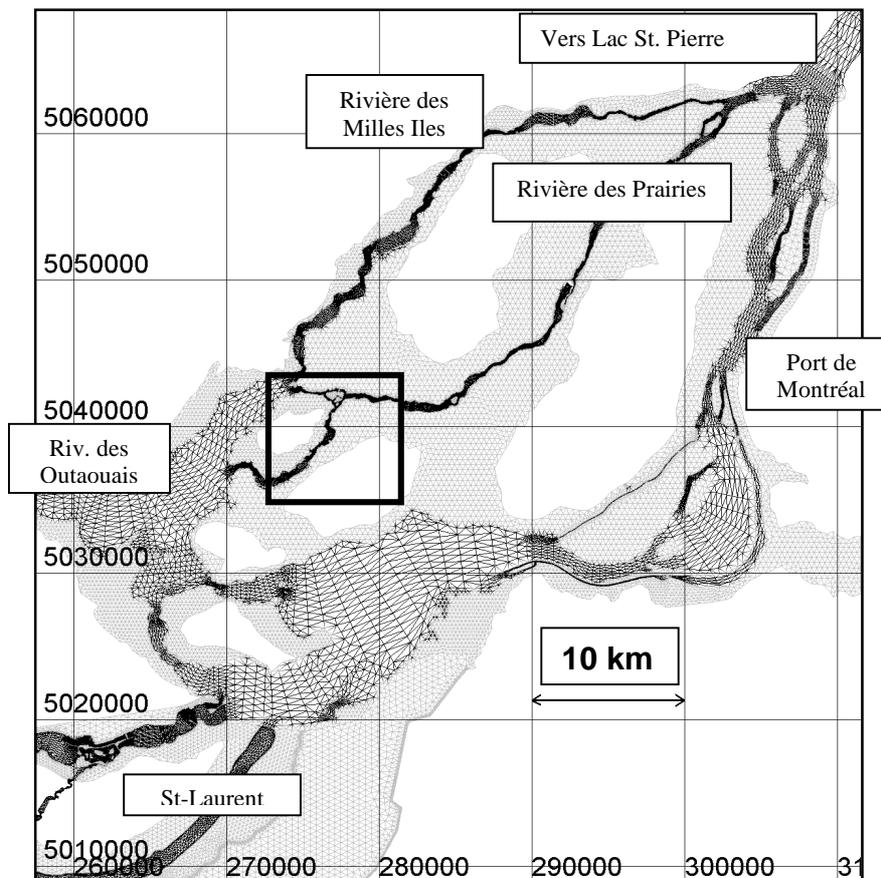
**Figure 7.** *Vue globale du maillage de Montréal*

Le modèle numérique a été préparé pour :

- simuler la rupture du barrage de Carillon sur la rivière des Outaouais,

- simuler le passage de la crue maximum probable (CMP) sur le Saint-Laurent et étudier, lors des débordements, les effets de l'érosion des digues (formation de brèches) et des ruptures des ouvrages de contrôle,
- simuler les ruptures individuelles des ouvrages de contrôle,
- vérifier les débordements le long des rivières.

La figure 8 illustre les principales rivières autour de la ville de Montréal.



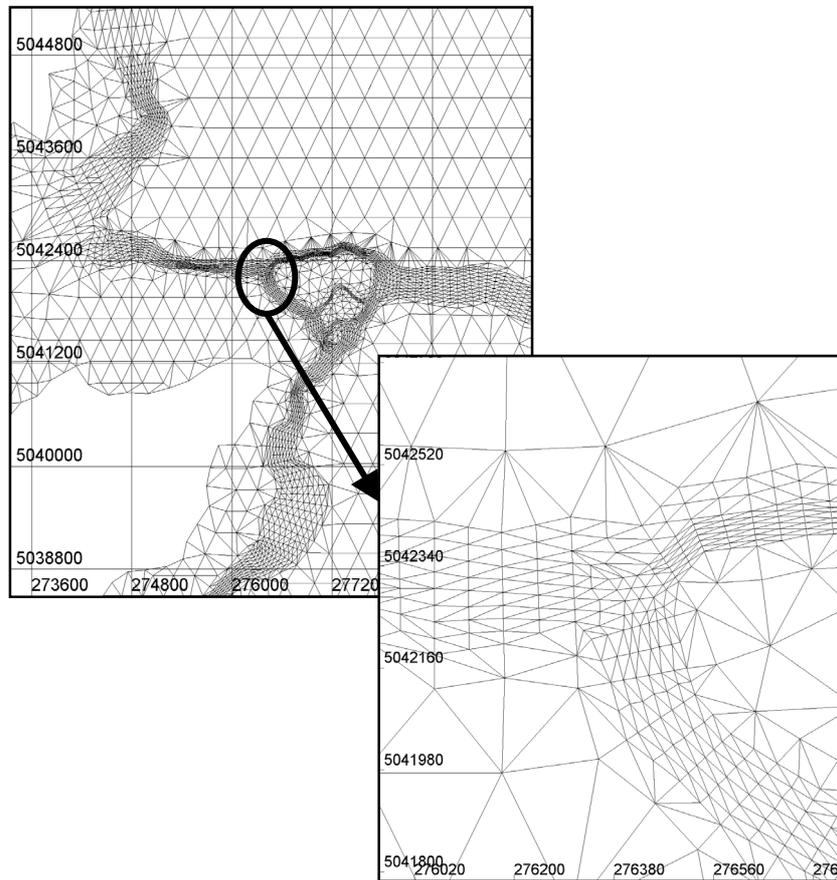
**Figure 8.** Maillage autour de la ville de Montréal

### 3.2.2. Modélisation numérique

Dans une telle région, la préparation du maillage constitue l'élément le plus important du modèle. Les mailles doivent suivre le pourtour des berges, des îles et des ouvrages de contrôles. Les îles n'ont pas toutes été représentées, mais les plus

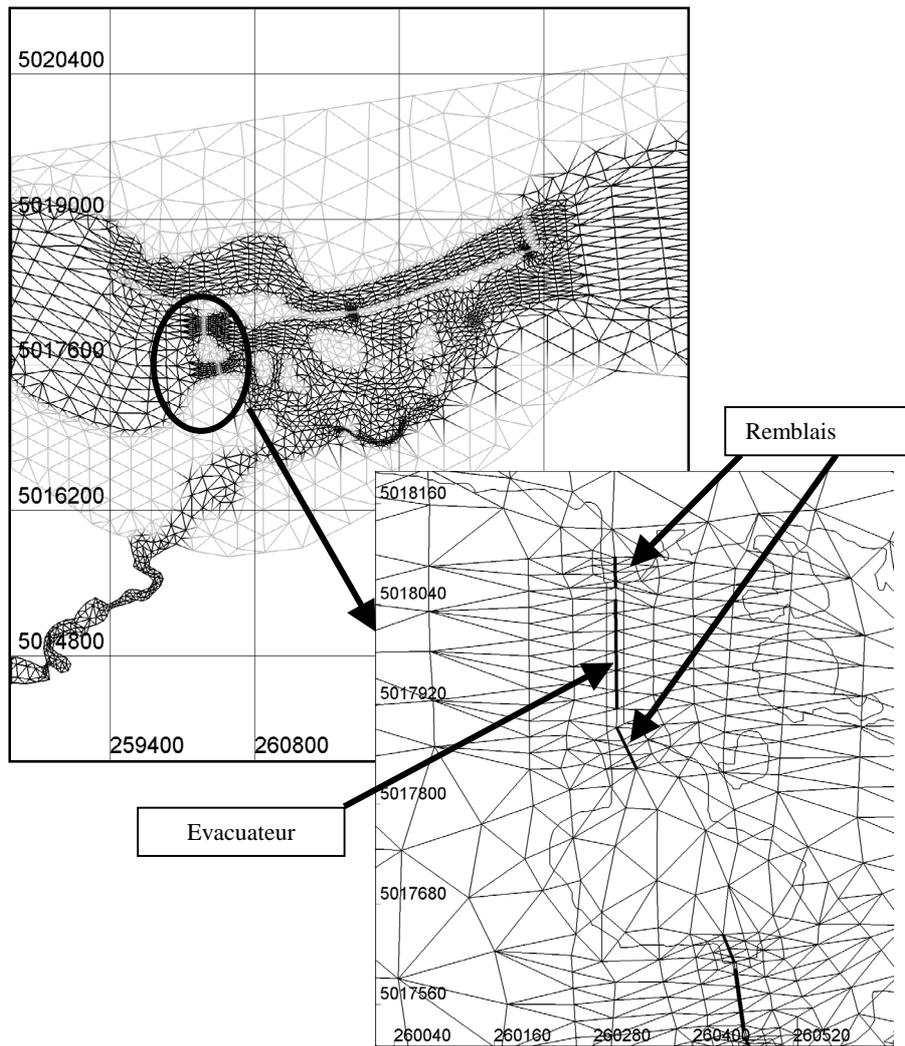
importantes et celles qui affectent fortement l'hydrodynamique (en particulier celles se trouvant devant un évacuateur de crue) ont été définies dans le domaine d'étude. Leur représentation a été réalisée comme une zone inondable ayant sa propre topographie, et non pas comme un trou dans le maillage.

Le modèle devait fonctionner pendant plusieurs jours pour réaliser une simulation complète. Il fallait limiter le nombre total de nœuds afin d'avoir des temps de calcul raisonnables. Ainsi, dans la majorité des cas, les rivières ont été définies avec un minimum de 4 nœuds toujours mouillés, avec des triangles allongés dans un rapport allant jusqu'à 1:5. De même, les lacs ont été définis avec des mailles beaucoup plus grossières, allant jusqu'à 1 300 m de long (figure 8 et 9). Les zones d'inondation ont été reproduites par un maillage plus régulier le long des berges.



**Figure 9.** *Détail des chenaux autour d'une île*

Dans le cas de crue extrême de CMP, comme la relation niveau-débit du fleuve Saint-Laurent à la sortie de Montréal n'était pas connue avec précision, la frontière aval a été située à la sortie d'un lac, suffisamment loin des régions d'intérêt. Cette frontière a été définie au lac St-Pierre, à 90 km à l'aval de la confluence des rivières des Milles-Iles et des Prairies (figure 8). La capacité du lac servait ainsi à laminier la crue. Cette région a été décrite dans le modèle par un maillage plus grossier, ne comprenant que la rivière sans les zones de débordement.



**Figure 10.** *Détail des mailles autour d'un évacuateur de crues*

Le modèle devait permettre la simulation des ruptures de certains ouvrages de contrôle et l'érosion des berges. Le maillage a donc été prévu pour décrire avec une maille assez fine tous ces ouvrages (7 évacuateurs de crues) ainsi que les brèches développées durant l'érosion des berges (14 digues en remblais), voir la figure 10. Le maillage résultant comprend plus de 34 000 nœuds et 66 000 éléments.

Au cours du passage de l'hydrogramme de la CMP injecté à l'amont du Saint-Laurent, les débits des évacuateurs étaient ajustés de manière à simuler l'utilisation des vannes des évacuateurs qui devaient maintenir le plus longtemps possible les niveaux d'eau à des valeurs proches des cotes d'exploitation habituelles des plans d'eau. Une procédure itérative a été implantée dans le code Fortran pour contrôler les débits des évacuateurs en fonction de leurs capacités d'évacuation maximales, des niveaux maximaux d'exploitation et des niveaux d'eau instantanés à l'amont et à l'aval aux ouvrages. Lorsque les débits d'apport s'avéraient plus importants que les débits évacués (ouverture complète de toutes les vannes), les niveaux d'eau montaient et un débordement au-dessus des ouvrages devenait possible.

### 3.2.3. Résultats

Les temps de calcul varient en fonction du pas de temps. Avant toute rupture (c'est-à-dire antérieurement à l'initiation de brèches), un pas de temps assez grand était réalisable et donnait des temps de calcul de 9,9 heures par jour simulé. Après la création des brèches, les vitesses devenaient importantes et un pas de temps plus faible était nécessaire, donnant 13,8 heures CPU par jour simulé sur un Pentium 4 de 2,5 GHz.

Une des conclusions les plus importantes tirées de ce cas d'application concerne l'importance de bien connaître les cotes topographiques de la région à modéliser, surtout le haut des berges et les zones relativement plates. Les premières simulations de propagation de la CMP ont indiqué un débordement vers une rivière latérale, vers des territoires très peuplés. Elles étaient basées sur des topographies datant de plusieurs décennies. Un relevé aérien au laser de la topographie de cette zone de débordement a été effectué pour mettre à jour les cartes de topographie, y compris les chemins et les routes, afin d'obtenir des débordements beaucoup plus précis.

## 4. Conclusion

Le logiciel Telemac-2D a été utilisé pour procéder aux simulations hydrodynamiques de rupture de barrages au sein de deux réseaux hydrographiques distincts situés au Québec. L'une des applications concernait la simulation de la propagation d'une onde de rupture de barrage vers une région maritime profonde. L'autre considérait la simulation de la propagation de crue sur un réseau de rivières complexes, causant des ruptures internes au modèle.

La robustesse et la flexibilité de Telemac-2D ont constitué les principaux critères qui ont mené au choix de ce logiciel. Différents phénomènes physiques, dont l'initiation et le développement des brèches, de même que l'évolution des débits transitant par les ouvrages d'évacuation, ont pu être adéquatement simulés grâce à la possibilité de contrôler la simulation dans le code Fortran.

Dans ces deux cas, le pas de temps de calcul devait être faible et rendait ces modélisations à caractère commercial assez longues. Certains scénarios d'une durée de 30 jours en temps réel, se sont déroulés sur un Pentium IV de 2,5 GHz en beaucoup plus qu'une semaine.

Il s'avère que la discrétisation géométrique du domaine de calcul constitue une étape cruciale dans le cadre de ce type d'étude. Les résultats de simulations peuvent être influencés significativement selon que les îles, les routes et la topographie des zones de débordement sont adéquatement représentées ou non dans le maillage.

## 5. Bibliographie

- Bates P.D., Anderson M. G., Hervouet J.-M., "Initial Comparison of two two-dimensional Finite Element Codes for River Flood Simulation", *Proceeding of the Institution of Civil engineers*, Water Maritime and Energy, vol. 112, n° 3, Sept. 1995, p. 238.
- Cooper A.J., Telemac Modeling System, Validation Document, Rapport Électricité de France-DER, HE-43/96/006/A, 1996.
- Hervouet J.-M., Rougé D., *Numerical Simulation of the Malpasset dam-break flood wave*. Rapport Électricité de France-DER, HE-43/96/040/A, 1996.