

3 Méthodologie

3.1 Introduction

L'étude de rupture par temps sec d'un barrage consiste à simuler le bris de l'ouvrage en condition normale d'opération puis à déterminer les impacts de la propagation de l'onde de rupture le long de la vallée à l'aval. Si le barrage fait partie d'une série d'aménagements en cascade, les impacts sur les ouvrages en aval sont évalués. Comme la rupture se produit en condition normale, les structures d'évacuation des crues sont généralement considérées fermées. Toutefois, de façon sécuritaire, un temps d'arrivée du front d'onde à chaque ouvrage d'au moins 24 h est considéré nécessaire pour permettre des actions d'ouverture des vannes.

Dans le cas des aménagements en cascades, le débordement au-dessus de l'ouvrage situé en aval se produit si le volume d'emmagasinement compris entre le plan d'eau initial et la crête du barrage est inférieur au volume d'eau provenant de la rupture du barrage en amont. Le débordement peut engendrer la rupture de ce second ouvrage et, le cas échéant, la nouvelle onde de rupture se propagera vers le barrage situé en aval et ainsi de suite. Il est à noter qu'aucune cause de rupture n'est présumée au barrage qui initie la rupture en cascade.

Dans la présente étude, la modélisation dans tous les cas de rupture est réalisée avec le modèle Mascaret. Le débit entrant à chacun des ouvrages, au moment de l'initiation de la brèche correspond au débit module de la rivière.

3.2 Modèle numérique utilisé

Le code Mascaret a été développé au Groupe Hydraulique Fluviale du laboratoire National Hydraulique et Environnement d'EDF en collaboration avec le Centre d'Études Techniques maritimes et Fluviales. C'est un modèle unidimensionnel qui représente numériquement les écoulements à surface libre. Il peut simuler tous les régimes d'écoulements, soit fluvial, critique et torrentiel. Pour les trois noyaux de calcul, le modèle de base est constitué des équations de Saint-Venant et utilise un réseau maillé et ramifié. De plus, pour chaque noyau, des fonctionnalités ont été ajoutées pour traiter des écoulements plus complexes : réseau, lit composé, singularités, apport de débit ponctuel et déversoir. L'objet principal d'un calcul consiste à déterminer les niveaux d'eau et les débits dans un ou plusieurs biefs.

L'utilisateur définit le réservoir de tête et les apports en eau pendant la période de calcul, le barrage ou les barrages successifs sur le cours d'eau, les brèches à considérer dans les ouvrages, ainsi que les conditions de rupture. Enfin, l'utilisateur fournit au modèle une description unidimensionnelle de la vallée par des sections transversales.

Les principaux résultats obtenus, à chaque section, sont les valeurs maximales de débit, de niveau d'eau et de vitesse d'écoulement, ainsi que le temps d'arrivée du front d'onde et le temps d'obtention du niveau d'eau maximal. De plus, les hydrogrammes (la variation du débit dans le temps) et les limnigrammes (la variation de niveau d'eau dans le temps) sont représentés graphiquement aux points d'intérêt de l'étude. Dans la présente étude, les simulations de la rupture des ouvrages et la propagation de l'onde de rupture sur la rivière Saint-Maurice ont été effectuées entre le barrage Gouin jusqu'à l'embouchure de la rivière Saint-Maurice.

3.3 Hypothèse de rupture

Les critères de rupture utilisés à Hydro-Québec considèrent le bris partiel d'un ouvrage à chacun des aménagements étudiés. La localisation, la géométrie et les dimensions des brèches définies aux deux aménagements sont décrites à la section 3.4. Les critères retenus concernant les conditions d'initiation et de formation de la brèche dans les ouvrages sont les suivants :

- Au premier ouvrage à l'amont, dans ce cas-ci le barrage Gouin, la rupture se produit dès le début de la simulation alors que le réservoir est au niveau maximal normal d'exploitation.
- À tous les aménagements, les ouvrages d'évacuation sont considérés fermés.
- Aux aménagements situés à l'aval du premier, le niveau de déversement provoquant la rupture des ouvrages en béton est de 1,5 m au-dessus de la crête de l'ouvrage ou au-dessus du sommet des vannes des évacuateurs de crues. Pour les ouvrages en remblai, la brèche commence à se former dès que le niveau d'eau atteint la crête de l'ouvrage.
- La brèche dans les barrages en béton se forme quasi instantanément, soit en 6 minutes. Pour ce qui est des ouvrages en enrochement, la formation de la brèche est progressive et le temps de formation est de 0,5 heure.

Par contre, si la rupture n'est pas suffisante et que la remontée du réservoir se poursuit malgré la présence de la brèche initiale, alors celle-ci s'élargit selon le même taux d'érosion, et la durée de formation est ajustée en conséquence.

3.4 Localisation et géométrie des brèches

En général, les brèches sont localisées dans la partie la plus profonde des ouvrages afin de produire les débits de rupture qui engendrent la zone maximale d'inondation.

Selon les critères utilisées à Hydro-Québec, dans une structure de béton, la brèche a une forme rectangulaire et la largeur est de 3 à 4 fois sa hauteur.

Dans un ouvrage en remblai, la brèche prend une forme trapézoïde dont les parois suivent une pente maximale de 1V:1H et dont la largeur à la base est de 4 fois sa hauteur. Toutefois, si le niveau d'eau du réservoir poursuit sa remontée malgré la présence de la brèche, ce rapport peut augmenter considérablement jusqu'à ce que la base de la brèche ait une largeur maximale correspondant à la moitié de la longueur totale de l'ouvrage.

L'emplacement et les dimensions des brèches initiales considérées sont décrits ci-dessous. Les principales caractéristiques des brèches sont résumées au tableau 3.1.

3.4.1 Barrage Gouin

La brèche dans le barrage Gouin, de type béton et étant le barrage de tête de la rivière Saint-Maurice est illustrée à la figure 3.1. Elle est de forme rectangulaire avec les caractéristiques suivantes :

- cote du réservoir lors de la rupture initiale : 405,08 m;
- cote de la base de la brèche : 385,88 m;
- largeur à la base de la brèche : 84,1 m;
- cote de la crête du barrage : 406,91 m;
- pente des côtés de la brèche : Verticales;
- temps de formation de la brèche : 6 minutes (instantanée).

Cette brèche correspond à la rupture des 10 pertuis de fond dont le seuil du radier est à la cote 385,88 m (réf. 3.1).

3.4.2 Barrage de la Chute Allard

Dans un premier temps, une petite brèche avait été considérée dans le barrage de la Chute Allard. Les caractéristiques étaient les suivantes :

- niveau d'eau lors de la rupture : 349,5 m;
- cote de la base de la brèche : 339,5 m;
- largeur à la base de la brèche : 34,0 m;
- cote de la crête du barrage : 348 m;
- pente des côtés de la brèche : Verticales;
- temps de formation de la brèche : 6 minutes (instantanée).

Cette brèche correspond à la rupture d'une section de l'évacuateur de crues. Toutefois, les premières simulations de rupture ont démontré que la brèche n'était pas suffisante. Alors, la brèche considérée à l'aménagement de la Chute Allard correspond à la rupture totale de cet aménagement incluant la centrale. La section représentée dans le modèle est illustrée à la figure 3.2.

3.4.3 Barrage des Rapides-des-Coeurs

La brèche dans le barrage des Rapides-des-Coeurs, de type enrochement est illustrée à la figure 3.3. Elle est de forme trapézoïdale et a les caractéristiques suivantes :

- niveau d'eau lors de la rupture : 302 m;
- cote de la base de la brèche : 284,5 m;
- largeur à la base de la brèche : 70 m;
- cote de la crête du barrage : 302 m;
- pente des côtés de la brèche : 1H:1V;
- temps de formation de la brèche : 30 minutes.

Cette brèche correspond à la rupture dans le barrage en enrochement soit dans la partie la plus profonde.

3.4.4 Barrage Rapide Blanc

La brèche dans le barrage Rapide Blanc, qui est en béton est illustrée à la figure 3.4. Elle est de forme rectangulaire et a les caractéristiques suivantes:

- niveau d'eau lors de la rupture : 277,64 m (1,5 m au dessus de la cote du sommet des vannes);
- cote de la base de la brèche : 249,14 m;
- largeur à la base de la brèche : 82,6 m;
- cote de la crête du barrage : 279,8 m;
- pente des côtés de la brèche : Verticale;
- temps de formation de la brèche : 6 minutes.

Cette brèche correspond à la rupture de l'évacuateur de crues. Il s'agit d'une section équivalente qui représente la rupture totale de l'évacuateur de crues.

3.4.5 Barrage Trenché

La brèche dans le barrage Trenché est illustrée à la figure 3.5. Ce barrage est en béton et donc la forme de la brèche est rectangulaire. Cette brèche a les caractéristiques suivantes :

- niveau d'eau lors de la rupture : 243,5 m (1,5 m au dessus de la cote du sommet des vannes);
- cote de la base de la brèche : 191,4 m;
- largeur à la base de la brèche : 202 m;
- cote de la crête du barrage : 242,6 m;
- pente des côtés de la brèche : Verticale;
- temps de formation de la brèche : 6 minutes.

Cette brèche correspond à la rupture du barrage poids en rive gauche et de 4 passes et 4 piliers de l'évacuateur de crues.

3.4.6 Barrage Beaumont

La brèche dans le barrage Beaumont est illustrée à la figure 3.6. Ce barrage est en béton et donc la forme de la brèche est rectangulaire. Cette brèche a les caractéristiques suivantes:

- niveau d'eau lors de la rupture : 194,7 m (1,5 m au dessus de la cote du sommet des vannes);
- cote de la base de la brèche : 150,87 m;
- largeur à la base de la brèche : 122 m;
- cote de la crête du barrage : 193,9 m;
- pente des côtés de la brèche : Verticale;
- temps de formation de la brèche : 6 minutes.

Cette brèche correspond à la rupture totale des ouvrages à l'exception de la centrale. La brèche utilisée dans le modèle est celle qui représente une section équivalente de la rupture de barrage.

3.4.7 Barrage La Tuque

La brèche dans le barrage La Tuque est illustrée à la figure 3.7. Ce barrage est en béton et donc la forme de la brèche est rectangulaire. Cette brèche a les caractéristiques suivantes:

- niveau d'eau lors de la rupture : 153,6 m (1,5 m au dessus de la cote du sommet des vannes);
- cote de la base de la brèche : 128 m;
- largeur à la base de la brèche : 114 m;
- cote de la crête du barrage : 152,99 m;
- pente des côtés de la brèche : Verticale;
- temps de formation de la brèche : 6 minutes.

Cette brèche correspond à la rupture de 5 passes de l'évacuateur, de deux pertuis et de 6 piliers.

3.4.8 Barrage Grand-Mère

La brèche dans le barrage Grand-Mère est illustrée à la figure 3.8. Ce barrage est en béton. La forme de la brèche est rectangulaire. Cette brèche a les caractéristiques suivantes:

- niveau d'eau lors de la rupture : 104,36 m (1,5 m au dessus de la cote du sommet des vannes);
- cote de la base de la brèche : 88 m;
- largeur à la base de la brèche : 77,6 m;
- cote de la crête du barrage : 105,56 m;
- pente des côtés de la brèche : Verticale;
- temps de formation de la brèche : 6 minutes.

Cette brèche correspond à la rupture du régulateur et 2 passes de l'évacuateur secondaire.

3.4.9 Barrage Shawinigan

À Shawinigan, 2 brèches ont été considérées, soit une à l'évacuateur Almaville et l'autre à l'évacuateur Melville. Les brèches sont illustrées à la figure 3.9. Les ouvrages sont en béton et donc la forme des brèches est rectangulaire. La brèche à l'évacuateur d'Almaville a les caractéristiques suivantes :

- niveau d'eau lors de la rupture : 77,62 m (1,5 m au dessus de la cote du sommet des vannes);
- cote de la base de la brèche : 70 m;
- largeur à la base de la brèche : 118,87 m;
- cote de la crête du barrage : 80,09 m;
- pente des côtés de la brèche : Verticale;
- temps de formation de la brèche : 6 minutes.

Cette brèche correspond à la rupture de 8 passes et de 7 piliers de l'évacuateur Almaville.

La brèche a l'évacuateur de Melville a les caractéristiques suivantes :

- niveau d'eau lors de la rupture : 77,62 m (1,5 m au dessus de la cote du sommet des vannes);
- cote de la base de la brèche : 70 m;
- largeur à la base de la brèche : 179,8 m;
- cote de la crête du barrage : 80,09 m;
- pente des côtés de la brèche : Verticale;
- temps de formation de la brèche : 6 minutes.

Cette brèche correspond à la rupture de 12 passes et de 11 piliers de l'évacuateur de Melville.

3.4.10 Barrage La Gabelle

La brèche dans le barrage de La Gabelle à la figure 3.10. Ce barrage est en béton. La forme de la brèche est rectangulaire. Cette brèche a les caractéristiques suivantes :

- niveau d'eau lors de la rupture : 33,2 m (1,5 m au dessus de la cote du sommet des vannes);
- cote de la base de la brèche : 14 m;
- largeur à la base de la brèche : 95 m;
- cote de la crête du barrage : 35,3 m;
- pente des côtés de la brèche : verticale;
- temps de formation de la brèche : 6 minutes.

Cette brèche correspond à la rupture de 5 passes et de 2 piliers de l'évacuateur de crues.

3.5 Description des scénarios

Deux scénarios ont été étudiés. Le premier scénario consiste de l'étude de rupture du barrage Gouin en considérant les aménagements actuels sur la rivière Saint-Maurice, soit l'état actuel sans les nouveaux aménagements de la Chute-Allard et des Rapides-des-Cœurs. Il s'agit d'un scénario en condition hydrologique normale avec le débit module de la rivière Saint-Maurice et consiste en la rupture du barrage Gouin au niveau maximal normal d'exploitation de 405,08 m. La rupture se produit instantanément. Le deuxième scénario est identique au premier à l'exception que nous avons introduits les nouveaux aménagements de la Chute-Allard et des Rapides-des-Coeurs sur l'escalier de la cascade, soit au Pks 85.5 et 119.2.

La propagation de l'onde de rupture est d'abord effectué avec le modèle numérique Mascaret entre le barrage Gouin où est initiée la rupture et l'embouchure de la rivière Saint-Maurice, soit à Trois-Rivières. Un débit module est introduit aux sections transversales aux PKs suivants: 5,99, 77,95, 143, 173,95, 189,98, 214,77, 249,06, 287,26, 304,57, 344,81 et 357,29. Les débits sont ceux des tributaires des rivières Wabano, Manouane, Vermillion, la Croche et Bostonnais, Wessoneau et Aux Rats, Mattawin, Mékinac et les débits intermédiaires entre les ouvrages. La figure 3.11 présente le schéma de localisation de débits modules.

L'hydrogramme de rupture du barrage Gouin subira un léger laminage dans le réservoir Rapide-Blanc et dans le bief d'amont de Grand-Mère. Le volume du réservoir Gouin déversé par la brèche est laminé de façon statique en considérant que le niveau d'eau est égal partout. Cette méthodologie est sécuritaire car tout le volume du réservoir est considéré. Toutefois, si l'étude de rupture était fait en conditions de crues, il serait préférable d'établir le débit à la brèche en considérant un laminage dynamique dans le réservoir Gouin.

Le volume total du réservoir Gouin à la cote maximale normale d'exploitation est de 8 243 hm³.

Tous les ruptures des ouvrages en cascade ont été simulés à l'aide du modèle Mascaret.

Il faut ajouter que compte tenu que l'objectif de cette étude était pour déterminer l'effet des nouveaux aménagements sur la rivière Saint-Maurice suite à la rupture du barrage Gouin, il n'y a pas eu de scénario de rupture en crues extrêmes à cette étape du projet. De plus à cette étape des études, les deux nouveaux aménagements sont conçus pour la crue maximale probable.

3.6 Hypothèses de calcul

Cette section énonce les hypothèses de calcul concernant les conditions frontières et initiales, la modélisation des ouvrages et les coefficients de rugosité.

3.6.1 Conditions aux frontières aval et amont

La méthodologie utilisée correspond en premier lieu à la détermination de l'hydrogramme de rupture du barrage Gouin en conditions normales. Cet hydrogramme correspond à la condition limite en amont du modèle.

La limite aval du modèle correspond au niveau d'eau de la grande marée à la marée haute et s'établi à 4,5 m pour la station 3360 sur le fleuve Saint-Laurent.

3.6.2 Conditions initiales

Les conditions initiales suivantes sont utilisées :

- les réservoirs et les biefs d'amont sont au niveau maximal d'exploitation;
- le débit dans la rivière Saint-Maurice et le débit des tributaires correspondent au débit module;
- la centrale s'arrête lors de la rupture;
- le débit à l'embouchure de la rivière Saint-Maurice correspond au débit module à la Gabelle et est de 739 m³/s.

3.6.3 Modélisation des barrages

Les principales caractéristiques requies des barrages dans les simulations sont les suivantes :

- la cote de la crête;
- le niveau d'eau initial du réservoir (niveau maximal d'exploitation);
- le niveau d'eau initiant la rupture;
- les dimensions, la forme et le temps de formation de la brèche;
- la capacité de déversement au-dessus des ouvrages en considérant les vannes fermées.

À l'aménagement de la Chute-Allard, l'hypothèse retenue est qu'il y a effacement total du barrage. À l'aménagement de Beaumont, l'hypothèse retenue est qu'il y a effacement total du barrage mais que la centrale reste en place. À l'aménagement de Shawinigan, il y aura effacement total des deux évacuateurs de crues, soit les évacuateurs Melville et Almaville.

3.6.4 Coefficients de rugosité (Strickler)

Dans la rivière Saint Maurice, le coefficient de Manning provient de la calibration réalisés par les spécialistes lors des études de conception de l'aménagement de Grand-Mère ainsi que l'étude de navigabilité qui a été effectuée entre La Tuque et Trois-Rivières.

Pour les simulations Mascaret, le coefficient de Strickler est utilisé au lieu du coefficient de Manning. Les coefficients Strickler suivants ont été utilisés :

- trente (30) pour le lit naturel de la rivière (qui correspond à un Manning de 0,033);
- vingt (20) sur les hautes rives (qui correspondent à un Manning de 0,05).

3.6.5 Présence de ponts

La présence de piliers, de la structure métallique et du tablier des ponts est ignorée dans la simulations. Plusieurs raisons guident vers ce choix :

- Le temps d'arrivée du front d'onde n'est pas affecté.
- Le débit de rupture est généralement considérable pour la rivière. Les ponts sont normalement construits pour une crue centennale.
- Le rehaussement est souvent de plusieurs mètres au-dessus du tablier du pont.

- La présence de débris pourrait provoquer avec la poussée hydrodynamique, la rupture du tablier et de la structure métallique. Il ne faut pas oublier que le pont est habituellement situé dans un rétrécissement de la rivière. Les vitesses d'écoulement sont alors considérables et la poussée hydrodynamique est en conséquence.

3.6.6 Érosion de la rivière et transport de débris

La géométrie de la vallée et de la rivière est considérée invariable, c'est-à-dire sur fond fixe. Ainsi l'érosion du lit de la rivière et des berges, ainsi que les glissements de terrains ne sont pas pris en compte. De plus, le transport de débris n'est pas considéré dans les calculs.

