

## PAR COURRIEL

Québec, le 3 août 2021

Objet : Demande d'accès n° 2021-07-058 – Lettre de réponse

---

Madame,

La présente fait suite à votre demande d'accès, reçue 19 juillet dernier, concernant les études de sécurité du Barrage Théodore réalisées en 2009 et 2020.

Le document suivant est accessible. Il s'agit de :

- Étude d'évaluation de la sécurité de mars 2009, Barrage Théodore, 127 pages.

Vous noterez que des renseignements ont été masqués en vertu des articles 53 et 54 de la Loi sur l'accès aux documents des organismes publics et sur la protection des renseignements personnels (RLRQ, chapitre A-2.1).

De plus, après vérification, nous vous informons que l'étude de 2020 est encore en préparation et nous ne pouvons pas répondre à ce point de votre demande maintenant.

Conformément à l'article 51 de la Loi, nous vous informons que vous pouvez demander la révision de cette décision auprès de la Commission d'accès à l'information. Vous trouverez, en pièce jointe, une note explicative concernant l'exercice de ce recours ainsi qu'une copie des articles précités de la Loi.

... 2

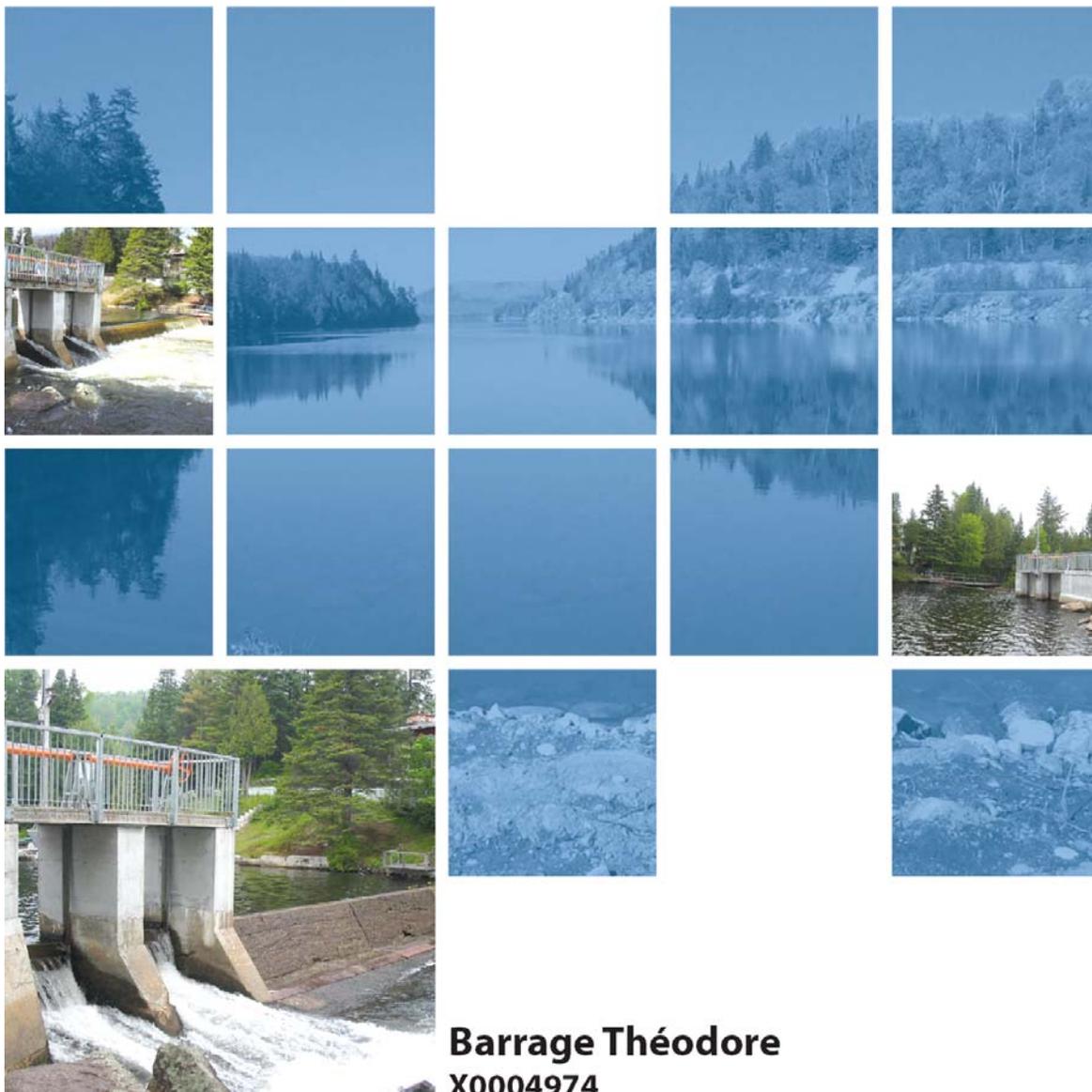
Pour obtenir des renseignements supplémentaires, vous pouvez communiquer avec M<sup>me</sup> Tamima Derhem Gosselin, analyste responsable de votre dossier, à l'adresse courriel [tamima.derhemgosselin@environnement.gouv.qc.ca](mailto:tamima.derhemgosselin@environnement.gouv.qc.ca), en mentionnant le numéro de votre dossier en objet.

Veillez agréer, Madame, l'expression de nos sentiments les meilleurs.

ORIGINAL SIGNÉ PAR

pour Chantale Bourgault, directrice

p. j. 3



**Barrage Théodore**  
X0004974

# Étude d'évaluation de la sécurité

Mars 2009

Centre d'expertise  
hydraulique

Québec 



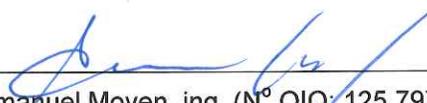
**Équipe de réalisation :**

Volet hydrologie et hydraulique :



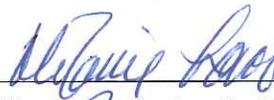
Martin Ferland, ing., M.B.A. (N° OIQ: 113 433)

Volet structure :

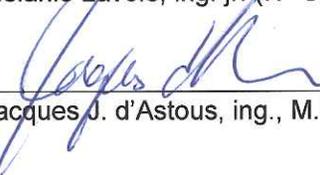


Emmanuel Moyen, ing. (N° OIQ: 125 797)

Volet géotechnique :



Mélanie Lavoie, ing. jr. (N° OIQ: 141 790)



Jacques J. d'Astous, ing., M.Sc. (N° OIQ: 34 721)

**Collaborateurs :**

Cartographie :

Marie-Lise Paquin et Frédéric Côté

Classement :

André Perron, ing.

Inspection d'évaluation :

Michel Mercier, ing. et Steve Corriveau

Mise en plan :

Renée Lavergne et Nicolas Gosselin

Relevés terrain :

Gilbert Côté et Kevin Paquette

Révision linguistique :

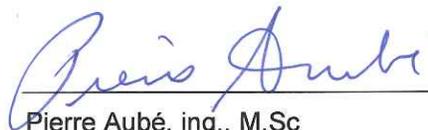
Joëlle Bissonnette-Laflamme

**Révisé par :**



Jacques J. d'Astous, ing., M.Sc.  
Chef de la Division de l'évaluation de la sécurité

**Approuvé administrativement par :**



Pierre Aubé, ing., M.Sc.  
Directeur de l'expertise et de la gestion des barrages publics

Le 12 mars 2009



## RÉSUMÉ

Ce document constitue la première évaluation de la sécurité du barrage Théodore. Il comprend une mise à jour de l'étude d'évaluation de la sécurité du barrage Théodore réalisée en novembre 2003 par le groupe conseil Genivar, notamment en regard des aspects hydrologiques, hydrauliques et structuraux. Cette étude vise à vérifier l'état, la stabilité et la fonctionnalité du barrage du Théodore, la conformité de sa conception et de sa construction au regard des normes minimales de sécurité prescrites par la Loi sur la sécurité des barrages (L.R.Q., c. S-3.1.01) et le Règlement sur la sécurité des barrages (S-3.1.01, r.1), ainsi qu'aux règles de l'art.

Le barrage Théodore se situe dans la municipalité de Val-Morin, laquelle fait partie de la MRC des Laurentides dans la région administrative des Laurentides. Plus précisément, cet ouvrage est construit à l'exutoire du lac Théodore, soit sur la rivière aux Mulets.

Le barrage Théodore est un ouvrage à forte contenance dont la fonction est d'assurer le maintien d'un plan d'eau à des fins récréatives et de villégiature. L'ouvrage est constitué d'une section de type béton-gravité d'une hauteur de 3,70 m et d'une longueur de 36,47 m ainsi que d'une aile droite en terre d'une hauteur de 1,78 m et d'une longueur de 16,0 m. Le barrage a une hauteur de retenue de 1,76 m et retient un volume d'eau de 5 456 000 m<sup>3</sup>.

À la suite de l'analyse de l'état et du comportement du barrage Théodore ainsi que de la revue de sa conception, on peut conclure qu'au regard des règles de l'art et des normes minimales de sécurité de la Loi sur la sécurité des barrages et de son Règlement, la sécurité structurale et fonctionnelle de l'ouvrage n'est pas assurée. Bien que le barrage Théodore permette l'évacuation de la crue de sécurité avec une revanche suffisante, l'importance de certains désordres observés compromet son intégrité structurale et sa sécurité. Par ailleurs, le niveau des conséquences du barrage ainsi que son classement ont fait l'objet d'une révision au terme de laquelle le niveau des conséquences « moyen » a été maintenu et la classe « D » déjà attribuée au barrage a été révisée à « C ».

Afin d'assurer la sécurité du barrage Théodore et sa conformité aux règles de l'art, des travaux correcteurs sont recommandés.



## TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE .....</b>	<b>2</b>
2.1	Description de l'ouvrage.....	5
2.2	Historique des interventions .....	11
2.3	Classement actuel.....	11
<b>3</b>	<b>ÉTAT ET COMPORTEMENTS DU BARRAGE .....</b>	<b>12</b>
3.1	Activités de surveillance .....	12
3.2	Inspection d'évaluation .....	12
3.3	Inspection sous-marine .....	12
3.4	Fonctionnalité et fiabilité des appareils d'évacuation .....	17
<b>4</b>	<b>REVUE DE LA CONCEPTION DU BARRAGE .....</b>	<b>18</b>
4.1	Analyses hydrologique et hydraulique.....	18
4.1.1	Description du bassin versant .....	18
4.1.2	Données hydrologiques.....	19
4.1.3	Capacité d'emmagasinement .....	24
4.1.4	Laminages des crues .....	26
4.1.5	Capacité d'évacuation .....	26
4.2	Analyse de rupture de l'ouvrage.....	30
4.2.1	Caractérisation préliminaire du territoire affecté .....	30
4.2.2	Étude d'onde de submersion.....	31
4.2.2.1	Modélisation du secteur à l'étude.....	31
4.2.2.2	Scénarios de rupture .....	31
4.2.2.3	Condition limite à l'amont .....	31
4.2.2.4	Débits des rivières en aval .....	32
4.2.2.5	Condition limite en aval .....	32
4.2.2.6	Description de la brèche.....	32
4.2.2.7	Résultats des simulations.....	33
4.2.3	Niveau des conséquences et crue de sécurité .....	37
4.2.4	Cartographie des zones inondables .....	43
4.2.5	Évaluation de la revanche .....	43
4.2.6	Analyse du pourtour du réservoir.....	44
4.2.7	Résumé des caractéristiques hydrauliques .....	44
4.3	Propriétés géotechniques des terrains de fondation.....	45
4.4	Analyse de la stabilité de l'ouvrage en remblai .....	46
4.4.1	Stabilité contre l'érosion externe.....	46
4.4.2	Stabilité post-sismique.....	48
4.5	Analyse de la stabilité des ouvrages en béton .....	50
4.5.1	Propriétés des matériaux.....	50
4.5.2	Déversoir fixe et déversoir à poutrelles .....	50

4.5.2.1	Méthodologie .....	50
4.5.2.2	Revue des charges.....	52
4.5.2.3	Combinaisons de charges.....	56
4.5.2.4	Facteurs de sécurité et critères de stabilité.....	57
4.5.2.5	Contraintes permises.....	60
4.5.2.6	Résultat de l'analyse .....	61
4.5.3	Culée .....	64
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>66</b>
5.1	Sécurité structurale et fonctionnelle .....	66
5.2	Niveau des conséquences et classement de l'ouvrage .....	66
5.3	Révision du plan de gestion des eaux retenues .....	67
5.4	Révision du plan de mesures d'urgence .....	67
<b>6</b>	<b>RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>68</b>
6.1	Relatives à la sécurité .....	68
6.1.1	Travaux d'entretien majeurs .....	68
6.1.2	Sécurité du public.....	69
6.2	Relatives à la maintenance .....	69
6.2.1	Entretien.....	69
6.2.2	Surveillance.....	69
	<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>71</b>
	<b>ANNEXES.....</b>	<b>73</b>
	Annexe 1 – « Informations relatives à la surveillance des ouvrages » et « État des ouvrages » (Extrait de l'étude du groupe conseil Génivar - novembre 2003)	
	Annexe 2 – Inspection statutaire du 23 juillet 2007	
	Annexe 3 – Inspection sous-marine (août 2008)	
	Annexe 4 – Cartographie des zones inondables	
	Annexe 5 – Révision du classement	
	Annexe 6 – Plan de gestion des eaux retenues	
	Annexe 7 – Extrait du registre des demandes d'intervention et extrait du registre de surveillance	

## Liste des tableaux

Tableau 3-1 : Description des carottes au barrage Théodore .....	13
Tableau 4-1 : Caractéristiques des stations hydrométriques de référence .....	19
Tableau 4-2 : Débits de crues printanières estimés aux stations 040122, 040129 et 040212 .....	23
Tableau 4-3 : Débits de crues instantanés non laminés estimés à la sortie du lac Théodore.....	24
Tableau 4-4 : Capacité d'emménagement du lac Théodore .....	24
Tableau 4-5 : Débits de crues instantanés laminés estimés à la sortie du barrage Théodore.....	26
Tableau 4-6 : Capacité d'évacuation du barrage Théodore.....	27
Tableau 4-7 : Débits des rivières en aval.....	32
Tableau 4-8 : Infrastructures susceptibles d'être affectées sur la rivière aux Mulets et du Nord .....	38
Tableau 4-9 : Inventaire des éléments potentiellement touchés par l'onde de rupture du barrage Théodore.....	42
Tableau 4-10 : Élévation minimale de la crête des digues selon différentes conditions .....	44
Tableau 4-11 : Niveaux d'eau et niveau des poutrelles considérés selon les conditions hydrauliques .....	45
Tableau 4-12 : Propriétés géotechniques des terrains de fondation .....	45
Tableau 4-13 : Propriétés du béton.....	50
Tableau 4-14 : Charge d'expansion thermique de la glace selon l'ACB.....	55
Tableau 4-15 : Combinaisons de charges considérées.....	56
Tableau 4-16 : Facteurs de sécurité et critères de stabilité .....	58
Tableau 4-17 : Résultats de l'analyse de stabilité – Section d'analyse 1 .....	61
Tableau 4-18 : Résultats de l'analyse de stabilité - Section d'analyse 2 .....	62
Tableau 4-19 : Résultats de l'analyse de contraintes - Section d'analyse 1.....	62
Tableau 4-20 : Résultats de l'analyse de contraintes - Section d'analyse 2.....	63
Tableau 5-1: Modification du classement au barrage Théodore .....	67

## Liste des figures

Figure 2-1 : Localisation du barrage Théodore (1) .....	2
Figure 2-2 : Localisation du barrage Théodore (2) .....	3
Figure 2-3 : Localisation du barrage Théodore (3) .....	4
Figure 2-4 : Principales dimensions du barrage Théodore (Vue en plan) .....	7
Figure 2-5 : Principales dimensions du barrage Théodore (Élévation aval) .....	9
Figure 3-1 : Localisation des carottages réalisés en août 2008 .....	15
Figure 4-1 : Barrage Théodore – Bassin versant .....	18
Figure 4-2 : Localisation et bassin versant de la station hydrométrique 040122 .....	20
Figure 4-3 : Localisation du bassin versant de la station hydrométrique 040129 .....	21
Figure 4-4 : Localisation du bassin versant de la station hydrométrique 040212 .....	22
Figure 4-5 : Courbe d'emmagasinement du lac Théodore .....	25
Figure 4-6 : Courbe d'évacuation du barrage Théodore .....	28
Figure 4-7 : Courbes du suivi hydrologique du barrage Théodore (station 040109) .....	29
Figure 4-8 : Profil en long des niveaux d'eau maximums atteints en condition de temps sec .....	34
Figure 4-9 : Profil en long des niveaux d'eau maximums atteints en condition de crue 1000 ans .....	35
Figure 4-10 : Rehaussements des niveaux d'eau occasionnés par une rupture du barrage Théodore .....	36
Figure 4-11 : Carte des zones de sismicité .....	49
Figure 4-12 : Section d'analyse 1 - Déversoir fixe .....	51
Figure 4-13 : Section d'analyse 2 - Déversoir à poutrelles .....	52
Figure 4-14 : Vue en plan générale du lac Théodore .....	55

## Liste des photos

Photo 2-1 : Vue générale aval du barrage Théodore.....	5
Photo 2-2 : Vue générale amont du barrage Théodore .....	5
Photo 4-1 : Perré amont en rive droite .....	48
Photo 4-2 : Vue générale amont du barrage Théodore (Hiver 2007) .....	54



## 1 INTRODUCTION

La présente étude d'évaluation de la sécurité vise à vérifier l'état, la stabilité et la fonctionnalité du barrage Théodore, la conformité de sa conception et de sa construction au regard des règles de l'art et des normes minimales de sécurité prescrites par la Loi sur la sécurité des barrages (L.R.Q., c. S-3.1.01) et le Règlement sur la sécurité des barrages (S-3.1.01, r.1).

Ce document constitue la première évaluation de la sécurité du barrage Théodore. Il comprend une mise à jour de l'étude d'évaluation de la sécurité du barrage Théodore réalisée en novembre 2003 par le groupe conseil Genivar, notamment en regard aux aspects hydrologiques, hydrauliques et structuraux. Le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) réalise cette étude pour le gouvernement du Québec à titre de responsable de l'exploitation de l'ouvrage. Au terme de cet exercice, des conclusions sont formulées relativement à la sécurité fonctionnelle et structurale du barrage.

Les correctifs appropriés, le cas échéant, sont exposés afin de rendre le barrage conforme aux règles de l'art ainsi qu'aux normes minimales de sécurité. Une visite de l'ouvrage a été réalisée le 7 mai 2008. Celle-ci a permis de compléter ou de confirmer l'information disponible dans les dossiers du CEHQ.

## 2 PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

Le barrage Théodore se situe dans la municipalité de Val-Morin, laquelle fait partie de la MRC des Laurentides dans la région administrative des Laurentides. Plus précisément, cet ouvrage est construit à l'exutoire du lac Théodore, soit sur la rivière aux Mulets. Les figures suivantes illustrent la localisation de l'ouvrage.

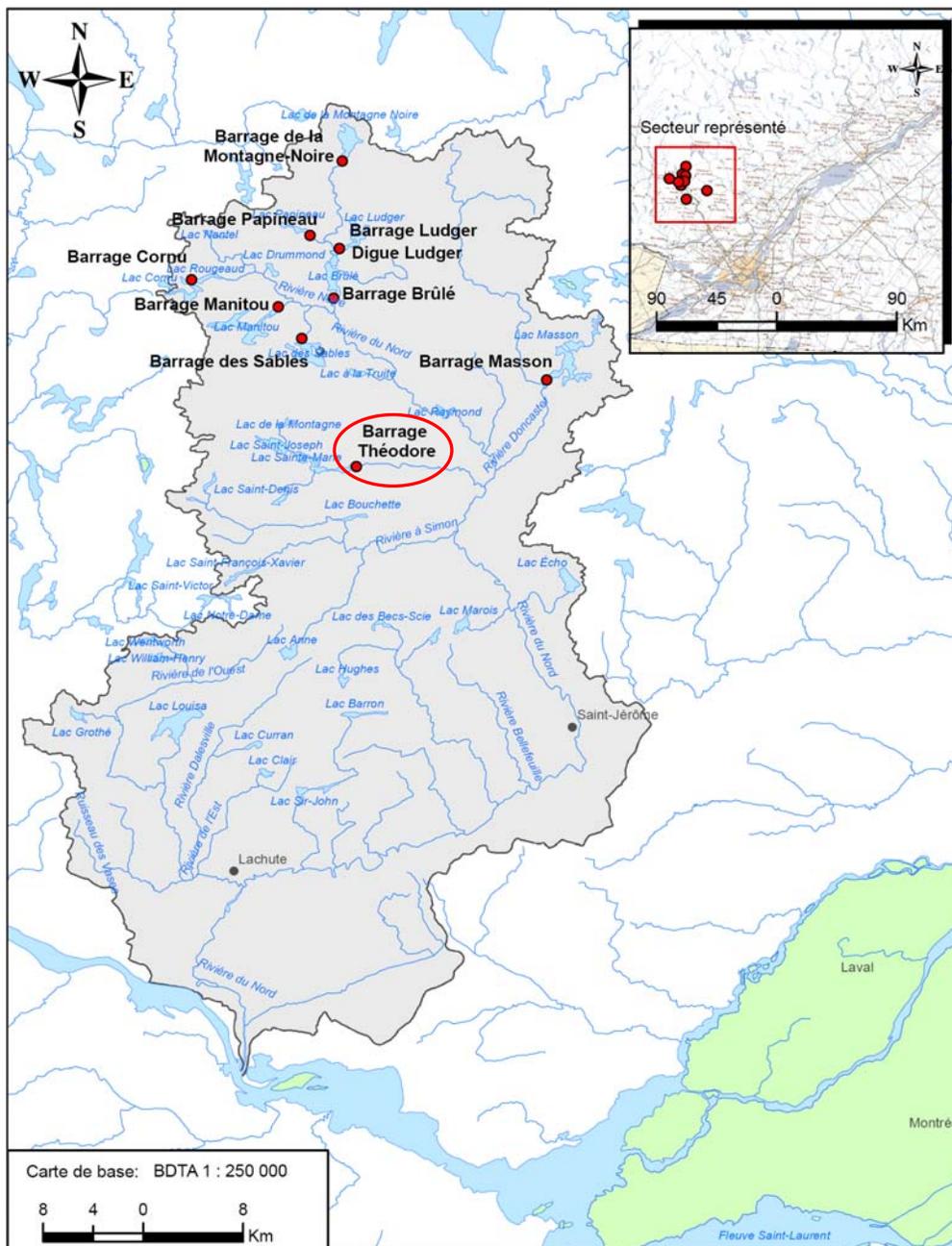


Figure 2-1 : Localisation du barrage Théodore (1)

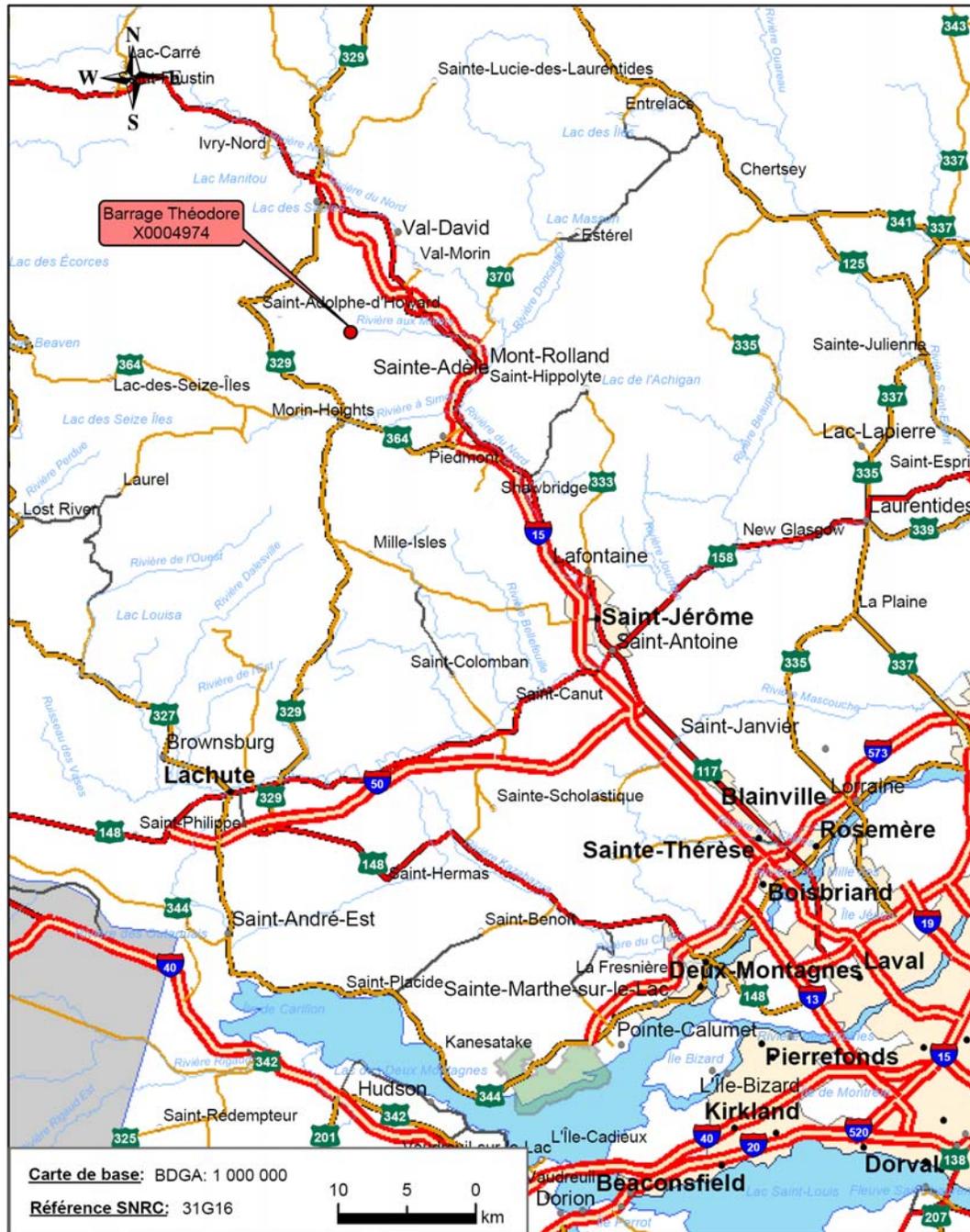


Figure 2-2 : Localisation du barrage Théodore (2)

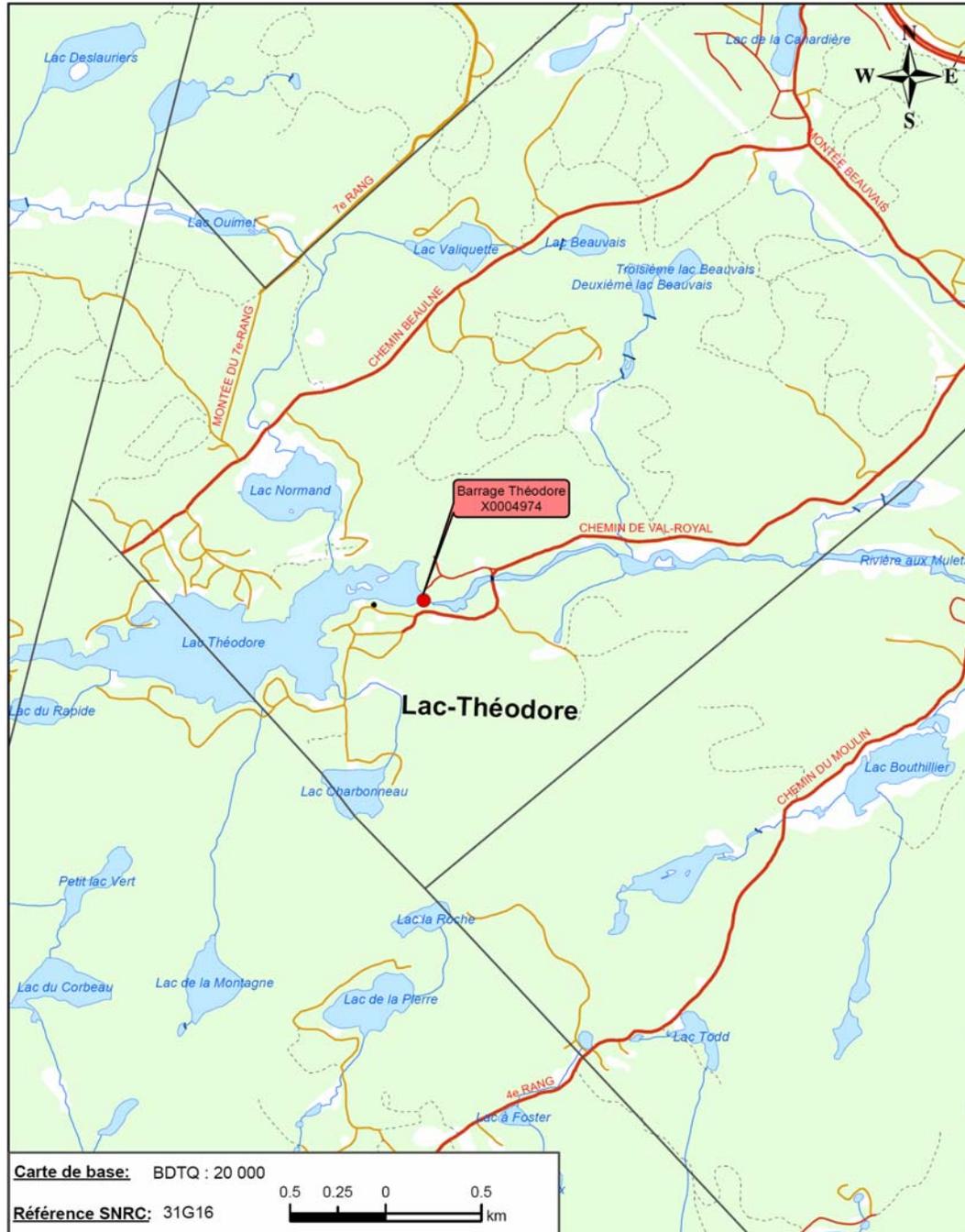


Figure 2-3 : Localisation du barrage Théodore (3)

## 2.1 Description de l'ouvrage

Le barrage Théodore est un ouvrage à forte contenance constitué de deux déversoirs à poutrelles, d'un déversoir fixe et d'une aile droite. L'ouvrage se décompose en deux sections, soit une section de type béton-gravité d'une hauteur de 3,70 m et d'une longueur de 36,47 m ainsi qu'une aile droite en terre d'une hauteur de 1,78 m et d'une longueur de 16,0 m. La pente moyenne de l'aile droite à l'amont est de 21° et à l'aval est de 27°. La culée droite du barrage s'appuie sur une aile en remblai et la culée gauche s'encastre dans le terrain naturel. Le roc est affleurant au pied amont de la digue gauche et à environ 25 m en aval de la culée droite. Le point bas de l'ouvrage se situe à l'élévation 366,47 m soit à la culée gauche. Ce barrage, dont la fonction est d'assurer le maintien d'un plan d'eau à des fins récréatives et de villégiature, a une hauteur de retenue de 1,76 m et retient un volume d'eau de 5 456 000 m<sup>3</sup>. L'ouvrage a fait l'objet d'un rehaussement de la culée et de la digue droite en 2001. De plus, cet ouvrage est l'objet d'un suivi hydrologique continu qui permet une gestion en temps réel des débits. Ce contrôle hydraulique s'effectue par l'ajout ou l'enlèvement de poutrelles de bois qui peuvent être manipulées grâce à un appareil de levage manuel. Les photos suivantes présentent une vue générale de l'ouvrage.



Photo 2-1 : Vue générale aval du barrage Théodore



Photo 2-2 : Vue générale amont du barrage Théodore

Les caractéristiques et les dimensions du barrage ont été déterminées à la suite de l'analyse :

- des plans « tels que construits » de l'ouvrage émis par le ministère des Richesses naturelles en 1964;
- des plans « tels que construits » du rehaussement de la revanche du barrage Théodore préparés par le Centre d'expertise hydrique du Québec en 2001.

Ces documents sont conservés au CEHQ et demeurent disponibles pour consultation. De plus, un relevé réalisé en à la fin août 2008 a permis de corriger et de valider certaines caractéristiques de l'ouvrage. Les figures suivantes résument les principales dimensions du barrage Théodore.

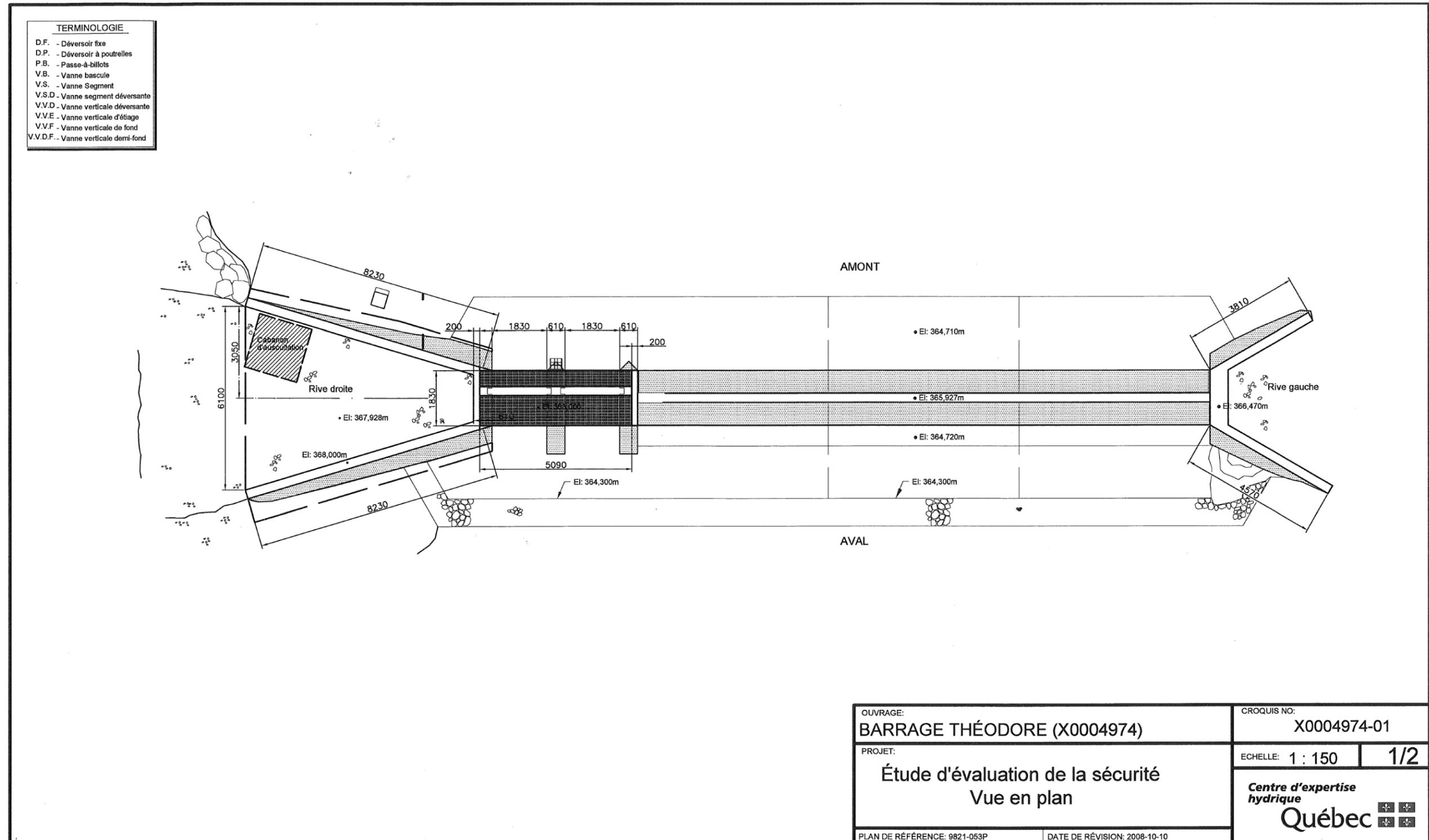


Figure 2-4 : Principales dimensions du barrage Théodore (Vue en plan)



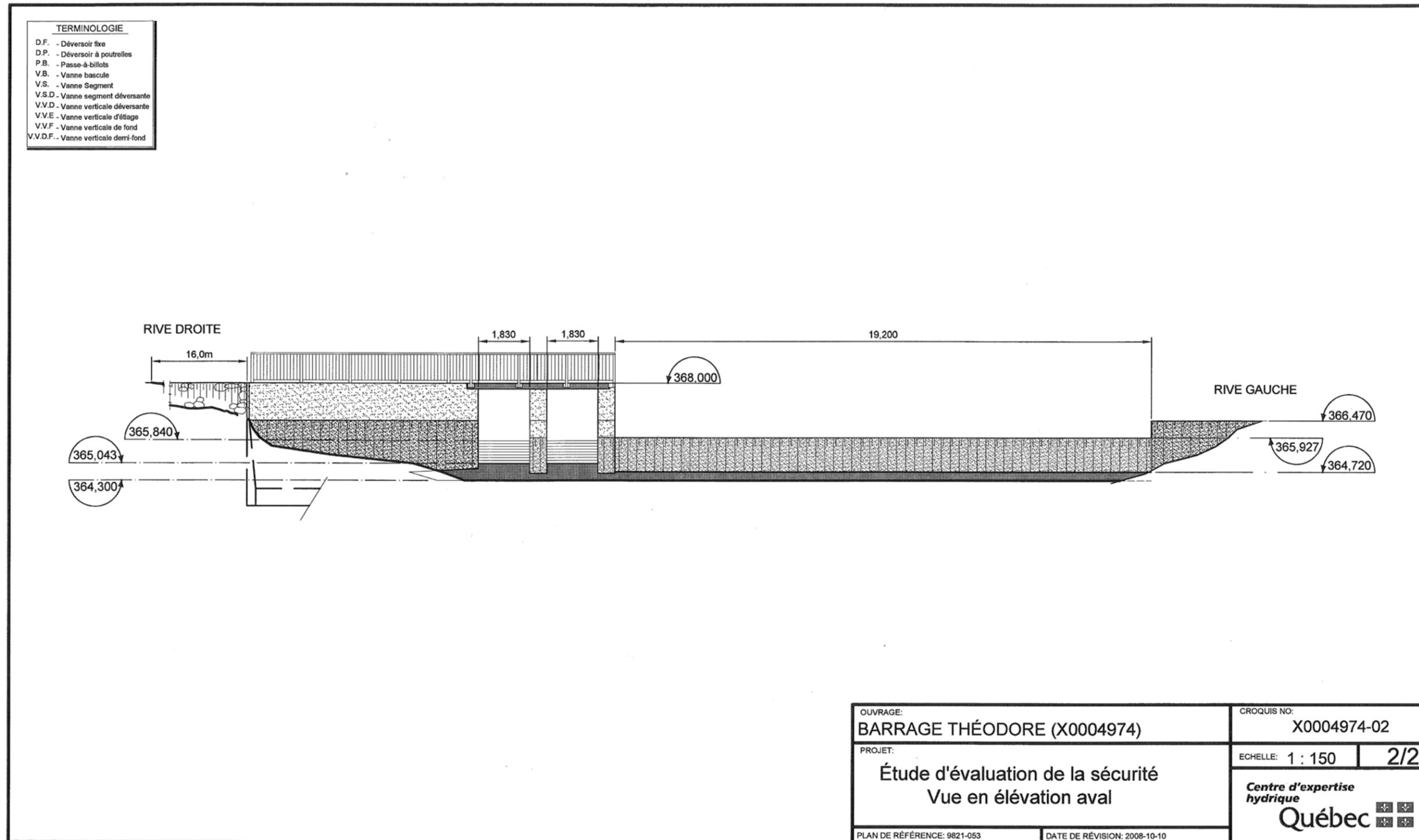


Figure 2-5 : Principales dimensions du barrage Théodore (Élévation aval)



## 2.2 Historique des interventions

Le barrage Théodore a fait l'objet d'une intervention majeure en 2001 soit le rehaussement des déversoirs à poutrelles et de la digue droite. Le tout a été rehaussé d'une hauteur de 1,325 m. La digue droite a été rehaussée à l'élévation 368,0 m.

## 2.3 Classement actuel

Le barrage Théodore est un ouvrage à forte contenance qui doit faire l'objet d'un classement en fonction des risques qu'il présente pour les personnes et les biens. Ces risques sont mesurés en fonction des conséquences du barrage advenant sa rupture et de sa vulnérabilité, laquelle dépend de différents facteurs comme son âge, son état, la fiabilité des appareils d'évacuation, etc. Selon les informations tirées du Répertoire des barrages, le barrage Théodore est de classe « D ».

À la suite de la présente étude d'évaluation du barrage Théodore, le classement du barrage sera révisé.

### 3 ÉTAT ET COMPORTEMENTS DU BARRAGE

#### 3.1 Activités de surveillance

Conformément au classement actuel, le barrage Théodore fait l'objet de deux activités de surveillance annuellement dont une inspection statutaire à tous les huit ans. Les rapports d'inspection sont consignés dans un dossier au CEHQ et les principaux éléments relevés sont présentés au tableau 1 à la page 7 de l'étude du groupe conseil Genivar à l'annexe 1. Ces éléments concernent essentiellement l'érosion du béton des piliers, les trous sur le déversoir fixe, l'affouillement en aval du barrage et les affaissements différentiels des sections du déversoir fixe. On y mentionne aussi l'érosion à l'aval sur la rive droite.

Le barrage Théodore a fait l'objet de deux inspections spéciales suite aux séisme de mars 1996 et mai 1997, de magnitude 4,5 et 4,2 respectivement. Selon les rapports d'inspection consignés au CEHQ, M. Gilles Forget s'est rendu sur les lieux et « aucun signe laissant supposé des dégâts n'a été décelé ».

Globalement, l'état de la section en béton du barrage Théodore est qualifié d'acceptable puisque tel que stipulé dans le Règlement sur la sécurité des barrages, le « barrage présente des détériorations qui demandent des réparations sans cependant représenter un danger à court terme pour la structure ». Toutefois, l'état de la digue est considéré très bon puisque aucune anomalie n'y a été relevée.

#### 3.2 Inspection d'évaluation

L'inspection d'évaluation de la sécurité vise à compléter et à confirmer l'information disponible sur l'ouvrage afin de réaliser la présente étude. Dans le cas du barrage Théodore, une inspection d'évaluation a été réalisée dans le cadre de l'étude du groupe conseil Genivar. D'autre part, une inspection statutaire a été réalisée par MM. Michel Mercier, ing. et Steve Corriveau, tech. au CEHQ le 23 juillet 2007. Cette inspection statutaire, à l'annexe 2, fait office d'inspection d'évaluation pour le CEHQ. Cette inspection fait état des mêmes observations relevées dans les inspections régulières.

#### 3.3 Inspection sous-marine

Une inspection sous-marine a été réalisée par les plongeurs du CEHQ au mois d'août 2008. L'inspection a confirmée le déplacement relatif des plots du déversoir fixe, l'affouillement à l'aval de l'ouvrage et l'érosion du béton sur la section datant de 1964. De plus, cinq carottages du béton ont été réalisés (figure 3-1). Le tableau 3-1 présente un résumé de la description des carottages. Pour les fins de l'inspection sous-marine, le déversoir a été divisé en trois plots

distincts. Le plot 1 se situant près des appareils de levage tandis que le plot 3 s'appuie sur la culée en rive gauche (figure 3-1). Une zone d'affouillement a été notée sous le plot 3 à partir du joint de construction 2-3 sur 500 mm de longueur, pour une profondeur de 1000 mm et une hauteur de 100 mm. Sous le déversoir à poutrelles, une autre zone d'affouillement a été notée à partir du pilier central jusqu'en rive droite sur une profondeur de plus de 1000 mm et une hauteur de 170 mm. Les zones d'affouillement sont indiquées approximativement en pointillés orange sur la figure 3-1. L'annexe 3 de la présente étude présente les informations complètes tirées de l'inspection sous-marine.

Tableau 3-1 : Description des carottes au barrage Théodore

Carottage	Longueur totale de la carotte (m)	Description de la carotte	Nature des matériaux de fondation
#T-1 Vertical Plot 2	0,36	Joint de coulée à 0,29 m Granulats : partie supérieure (0 à 0,29 m) $\Phi \approx 1,5$ cm partie inférieure $\Phi \approx 0,5$ cm Treillis métallique foré	Graviers / Sable et Graviers
#T-2 Vertical Plot 3	0,47	Béton sans fissure Bris de carotte dû au forage à 0,26 m	Graviers / Sable et graviers
#T-3 Vertical Plot 1	1,16	Cavité avec granulats à 0,52 m Roc à 0,84 m	Roc (Anorthosite)
#T-4 Vertical Plot 2	0,82	Aucune fissure Graviers collés sous la carotte	Graviers / Sable et graviers
#T-5 incliné 30° p/r verticale Plot 3	1,20	Aucune fissure	Sable et graviers



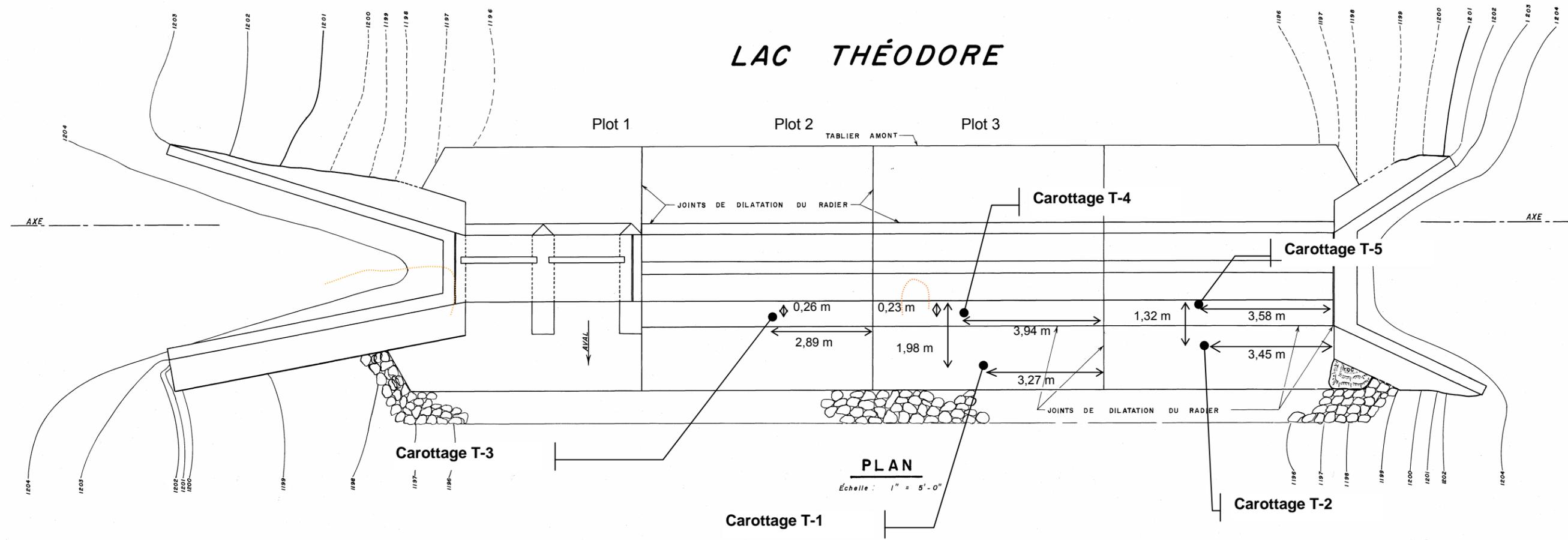


Figure 3-1 : Localisation des carottages réalisés en août 2008



### 3.4 Fonctionnalité et fiabilité des appareils d'évacuation

L'appareil d'évacuation du barrage Théodore est composé d'un déversoir fixe et de deux déversoirs à poutrelles. Les poutrelles sont opérées régulièrement puisqu'il s'agit d'un barrage géré en temps réel. La fonctionnalité et la fiabilité des déversoirs à poutrelles sont ainsi jugées adéquates. Pour le déversoir fixe, sa fiabilité est qualifiée d'« adéquate » de part sa nature.

## 4 REVUE DE LA CONCEPTION DU BARRAGE

### 4.1 Analyses hydrologique et hydraulique

#### 4.1.1 Description du bassin versant

La superficie du bassin versant au site du barrage Théodore est de 99,6 km<sup>2</sup> et est présentée à la figure 4-1. Le lac Théodore a une superficie de 3,1 km<sup>2</sup>. La superficie des lacs et marécages présents sur le bassin versant représente environ 12,0 % de la superficie totale de celui-ci. Ce bassin versant est en majeure partie boisé et montagneux. Les eaux du lac Théodore se déversent dans la rivière aux Mulets, tributaire de la rivière du Nord.

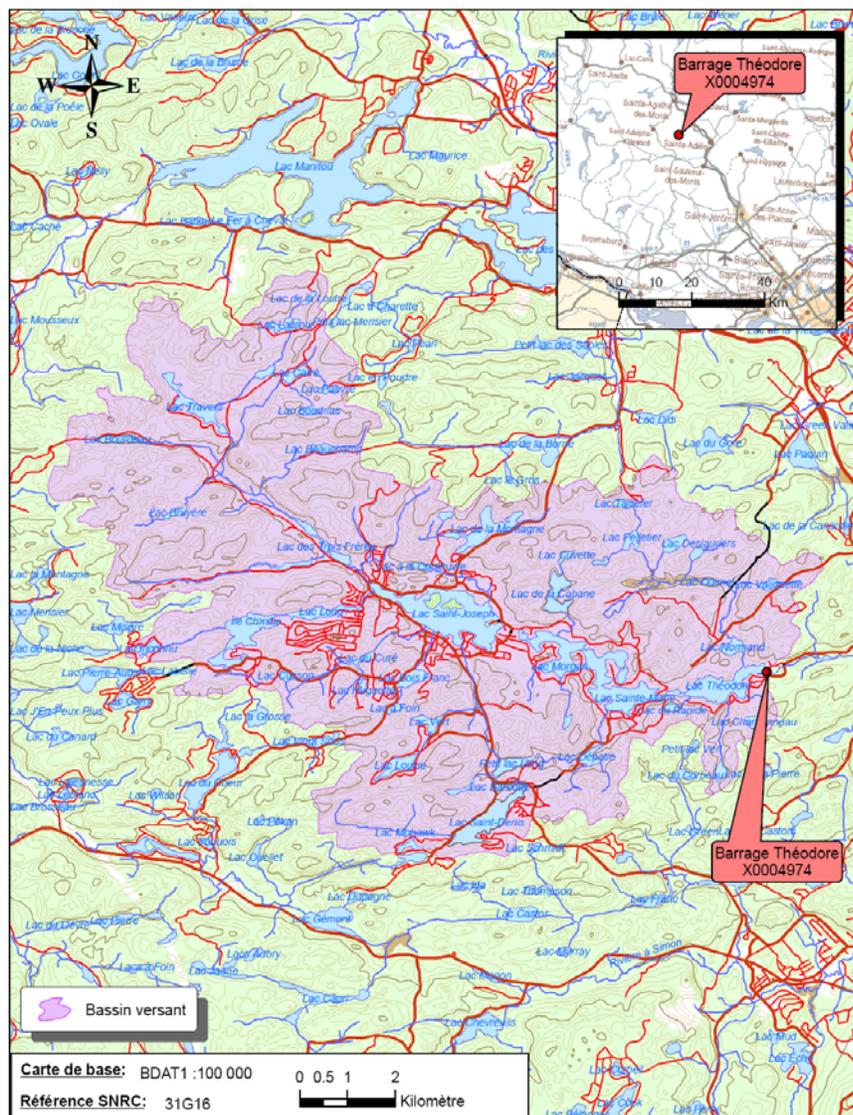


Figure 4-1 : Barrage Théodore – Bassin versant

#### 4.1.2 Données hydrologiques

Les débits au barrage Théodore ne sont pas jaugés. Par ailleurs, la région hydrographique 04 dont fait partie le secteur à l'étude possède quelques stations qui pourraient être utilisées pour effectuer une transposition des débits. Ainsi, les méthodes suivantes ont donc été utilisées :

- 1- L'analyse statistique des débits maximums enregistrés aux stations situées sur des cours d'eau à proximité du site à l'étude et à la station 040122 située sur la rivière du Nord. Les débits de crues estimés à ces stations sont ensuite transposés au secteur visé en fonction de la superficie des bassins versants des deux sites. Cette technique est communément appelée « transfert de bassin versant ». Les bassins versants des deux rivières doivent toutefois posséder des caractéristiques physiographiques similaires, la plus importante étant la superficie;
- 2- La méthode régionale proposée par M. Van Diem Hoang en 1977 (HP-40) a été utilisée pour valider les résultats de l'analyse statistique. Selon cette méthode, des équations empiriques, permettant d'estimer un débit moyen, ont été développées pour chacune des régions.

Dans un premier temps, une analyse statistique des débits de crues enregistrés aux stations 040122, 040129 et 040212 a été effectuée. Celles-ci ont des superficies de bassins versants comparables à celle du site à l'étude. Ces stations sont exploitées par le CEHQ. Le tableau 4-1 résume les caractéristiques de ces stations, tandis que les figures 4-2, 4-3 et 4-4 illustrent la localisation de ces stations et leurs bassins versants.

Tableau 4-1 : Caractéristiques des stations hydrométriques de référence

Station	Localisation		Années d'opération	Superficie du B.V. (km <sup>2</sup> )	% lacs
	Cours d'eau	Région			
040122	du Nord	Laurentides	Depuis 1971	311	10,8 %
040129	Doncaster	Laurentides	Depuis 1974	106	2,5 %
040212	Saint-Louis	Laurentides	Depuis 1968	39,8	4,5 %

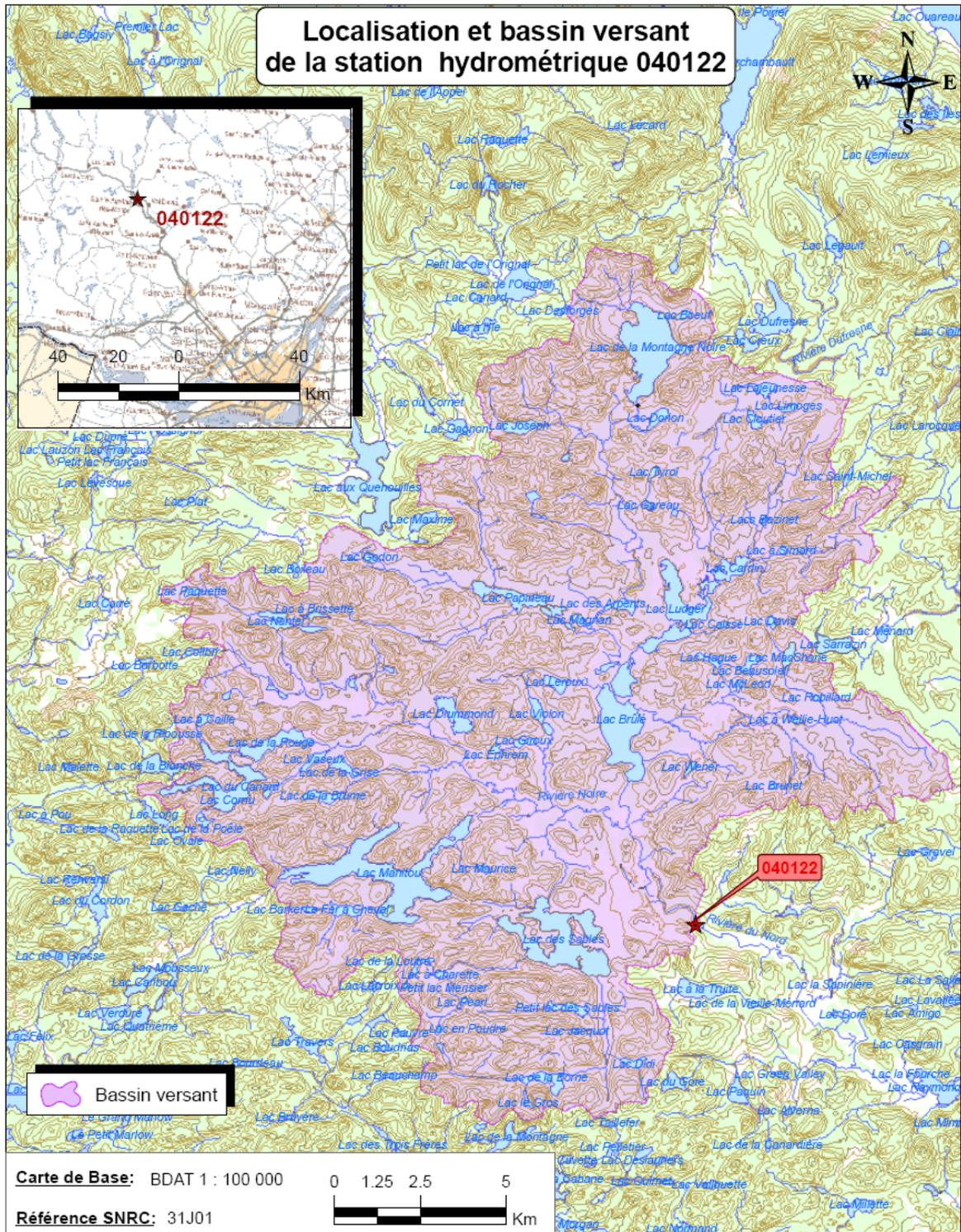


Figure 4-2 : Localisation et bassin versant de la station hydrométrique 040122



Figure 4-3 : Localisation du bassin versant de la station hydrométrique 040129

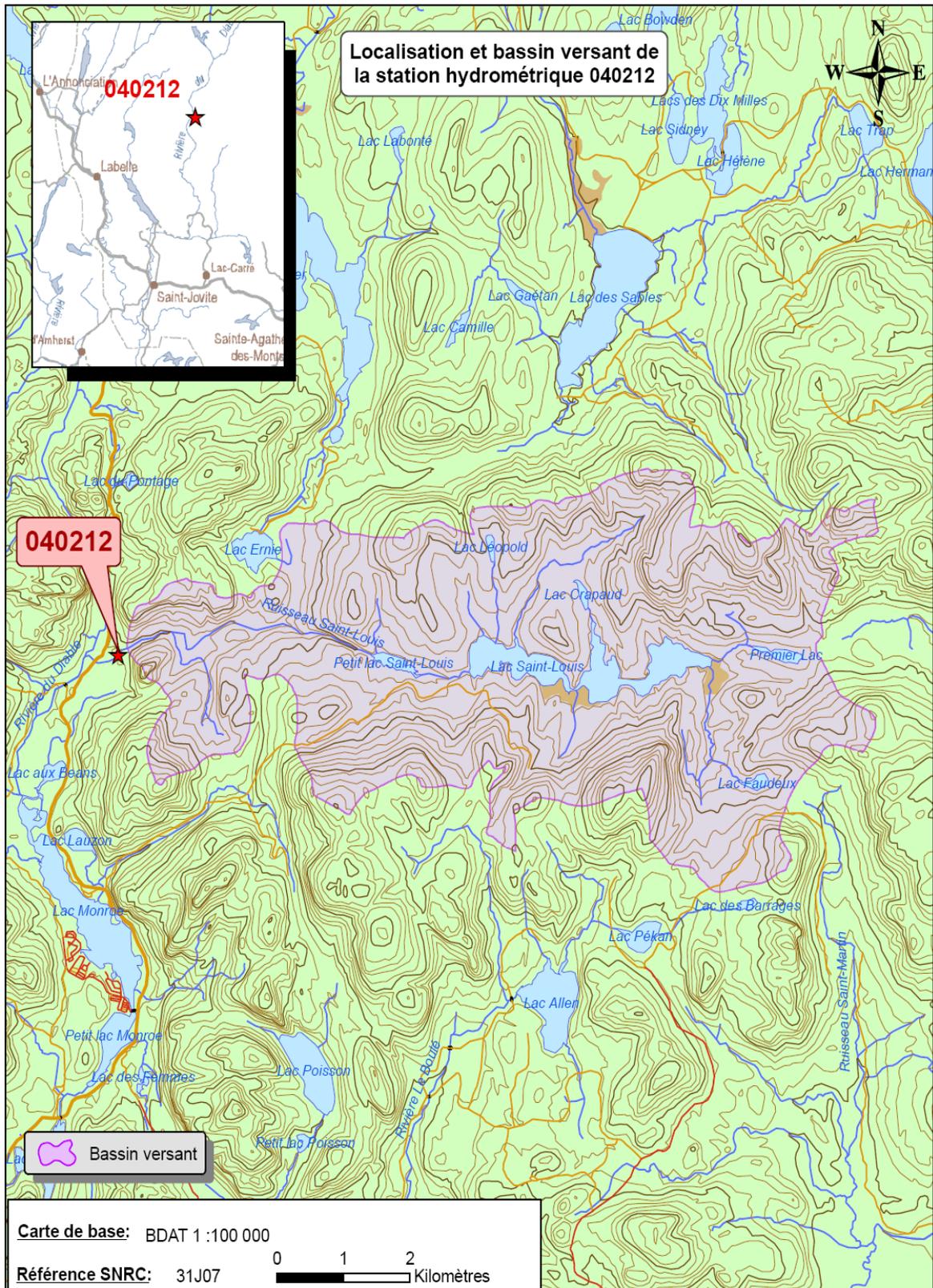


Figure 4-4 : Localisation du bassin versant de la station hydrométrique 040212

L'analyse statistique des crues aux stations 040122, 040129 et 040212 a été effectuée à partir de séries de données moyennes journalières. La valeur maximale de chaque période printanière, estivale-automnale et annuelle, a été extraite et les vecteurs de pointes de crue ont ensuite été analysés à l'aide des trois lois statistiques suivantes : Loi Normale (maximum de vraisemblance), Loi Weibull (maximum de vraisemblance) et Loi Lognormale (maximum de vraisemblance). Les débits de crues printanières se sont avérés les plus élevés et ont été retenus.

Les valeurs ainsi estimées sont présentées au tableau 4-2.

Tableau 4-2 : Débits de crues printanières estimés aux stations 040122, 040129 et 040212

Récurrence (année)	Débits de crues printanières (m <sup>3</sup> /s)		
	Station 040122	Station 040129	Station 040212
2	51,1	22,8	11,9
10	67,1	29,2	20,2
20	71,7	30,8	23,4
50	76,8	32,5	27,7
100	80,2	33,6	31,0
1000	89,8	36,6	42,5
10 000	97,7	38,8	55,1

Les débits de crues estimés à ces stations sont ensuite transposés au secteur visé en fonction de la superficie des bassins versants des deux sites.

Dans un deuxième temps, l'analyse régionale développée par M. Hoang (1977) fut également utilisée et a permis d'estimer des débits journaliers de différentes récurrences au barrage Théodore et de valider les valeurs tirées des analyses fréquentielles locales.

Par la suite, les débits obtenus par ces méthodes ont été multipliés par un facteur de pointe de 1,24 afin d'obtenir des débits de pointe instantanés puisque, jusqu'à maintenant, les débits considérés sont évalués à partir de moyennes journalières.

Nous avons retenu les débits les plus représentatifs résultant de notre analyse; ceux-ci ont été évalués à partir de la station 040212. Ces valeurs sont conservatrices puisque, en observant la figure 4-4, on s'aperçoit que le pourcentage de lacs est plus faible et que les pentes de la rivière et du bassin versant sont similaires. De cette manière, nous sommes d'avis que les incertitudes hydrologiques sont prises en compte.

Le tableau 4-3 présente les débits de crues instantanés non laminés estimés à la sortie du lac Théodore.

Tableau 4-3 : Débits de crues instantanés non laminés estimés à la sortie du lac Théodore

Réurrence (année)	Débit de crue instantané (m <sup>3</sup> /s)
2	20,2
10	26,7
20	28,5
50	30,5
100	31,9
1000	35,7
10 000	38,8

#### 4.1.3 Capacité d'emmagasinement

La courbe d'emmagasinement est établie à partir de l'hypothèse conservatrice que les berges du pourtour du lac Théodore sont verticales. Les données sont présentées au tableau 4-4 et la courbe à la figure 4-5.

Tableau 4-4 : Capacité d'emmagasinement du lac Théodore

Élévation (m)	Volume	
	(million de m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> /s-jr)
364,30	0,00	0,00
364,55	0,78	8,97
364,80	1,55	17,94
365,05	2,33	26,91
365,30	3,10	35,88
365,55	3,88	44,85
365,80	4,65	53,82
366,05	5,43	62,79
366,30	6,20	71,76
366,55	6,98	80,73
366,80	7,75	89,70
367,05	8,53	98,67
367,30	9,30	107,64

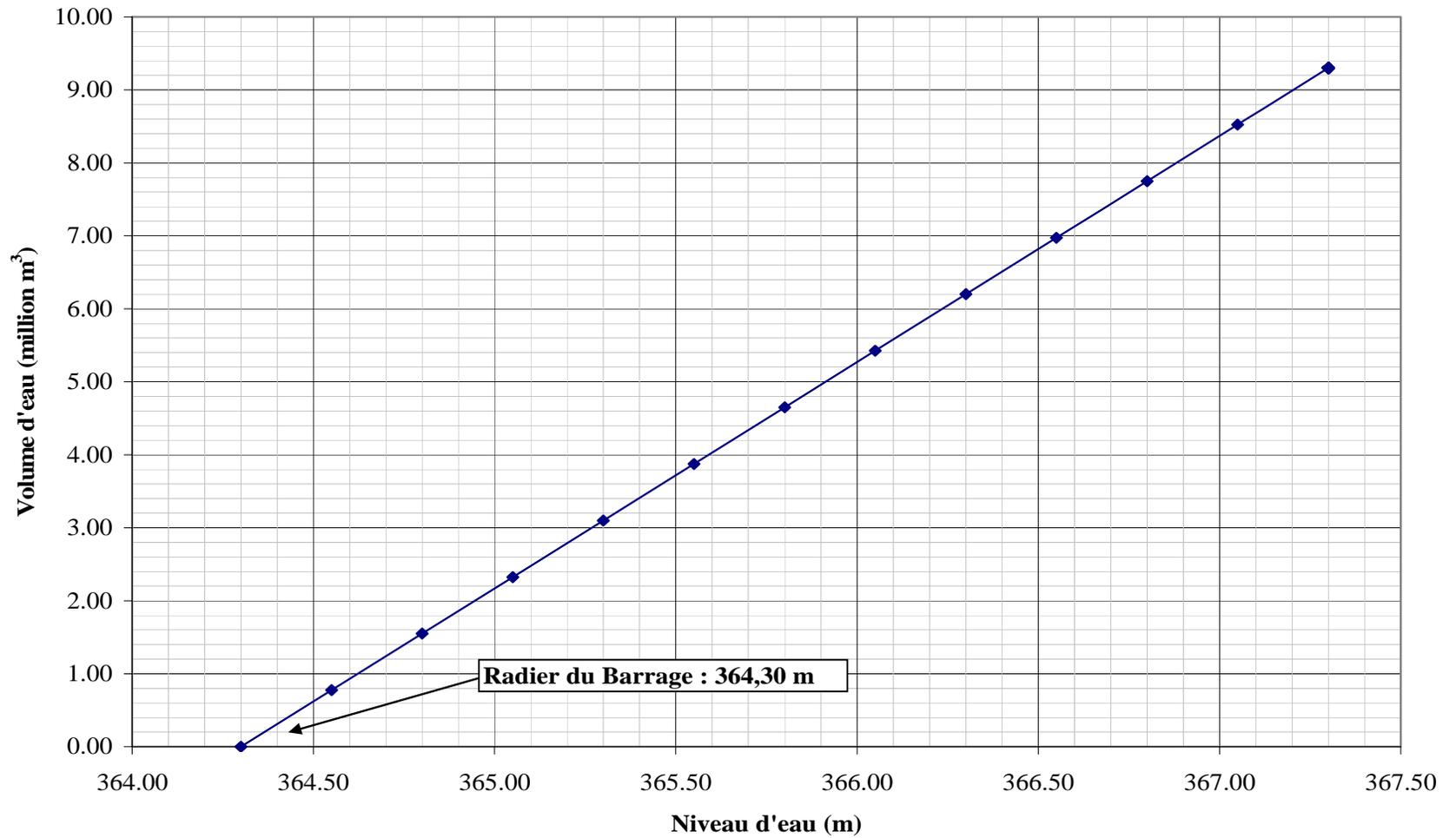


Figure 4-5 : Courbe d'emmagasinement du lac Théodore

#### 4.1.4 Laminages des crues

Afin de tenir compte du pourcentage de lacs et marécages sur le bassin du barrage Théodore, environ 12,0 %, les débits obtenus ont aussi été multipliés par un facteur de laminage de 0,59. Le facteur de laminage est tiré du Manuel de conception des ponceaux du ministère des Transports du Québec (figure 3.6, page 3-28).

Le tableau 4-5 présente les débits de crues instantanés estimés à la sortie du barrage Théodore.

Tableau 4-5 : Débits de crues instantanés laminés estimés à la sortie du barrage Théodore

Réurrence (année)	Débit de crue instantané (m <sup>3</sup> /s)
2	21,7
10	36,8
20	42,7
50	50,5
100	56,5
1 000	77,5
10 000	100,4

#### 4.1.5 Capacité d'évacuation

Les dimensions des appareils d'évacuation du barrage Théodore sont présentées à la section 2-1. Le tableau 4-6 ainsi que la figure 4-6 présente la capacité d'évacuation du barrage Théodore selon les modes de gestion actuels, aucune poutrelle en place dans les deux pertuis à poutrelles.

Le calcul de la capacité d'évacuation est fait en considérant certaines hypothèses. Pour le déversoir en béton et le déversoir à poutrelles, le coefficient de débit ( $\mu$ ) s'établit à 0,41. La formule utilisée pour le calcul des débits évacués est la suivante :

$$Q = \mu \sqrt{2g} L H^{3/2}$$

Où :

- $Q$  est le débit (m<sup>3</sup>/s)
- $\mu$  est le coefficient de débit (0,41)
- $g$  est la constante d'accélération gravitationnelle (9,81 m/s<sup>2</sup>)
- $L$  est la largeur du déversoir (m)
- $H$  est la hauteur d'eau au-dessus de la crête des poutrelles (m)

Nous avons estimé les niveaux d'eau atteints pour les crues de récurrence 1 : 100 ans et 1 : 1000 ans. Ainsi, les niveaux d'eau estimés sont 367,00 m et 367,30 m, respectivement.

Tableau 4-6 : Capacité d'évacuation du barrage Théodore

Élévation (m)	Débit (m <sup>3</sup> /s)	Observations
365,04	0,00	Niveau de la crête des déversoirs à poutrelles (0 poutrelle en place)
365,35	1,15	
365,51	2,10	
365,82	4,53	
365,93	5,53	Niveau de la crête du déversoir fixe
366,13	10,61	
366,40	21,7	Niveau de la crue 1 : 2 ans
366,75	40,61	
367,00	56,5	Niveau de la crue 1 : 100 ans
367,07	60,79	
367,30	77,47	Niveau de la crue 1 : 1000 ans
367,53	96,04	
367,59	100,44	Niveau de la crue 1 : 10 000 ans
367,84	122,47	
368,00	136,48	Niveau de la crête du barrage

Ainsi, la capacité d'évacuation maximale du barrage actuel correspond à une crue de récurrence supérieure à 1 : 10 000 ans.

La courbe du suivi hydrologique du barrage Théodore, présentée à la figure 4-7, démontre que la courbe de capacité d'évacuation ainsi que les débits de crue retenus représentent bien les observations enregistrées à la station 040109 située à l'amont du barrage Théodore. Le niveau maximum enregistré en 2007 et 2008 ainsi que le niveau maximum enregistré depuis les dix dernières années (366,47 m) correspondent à une crue de récurrence avoisinant la crue 2 ans calculée précédemment.

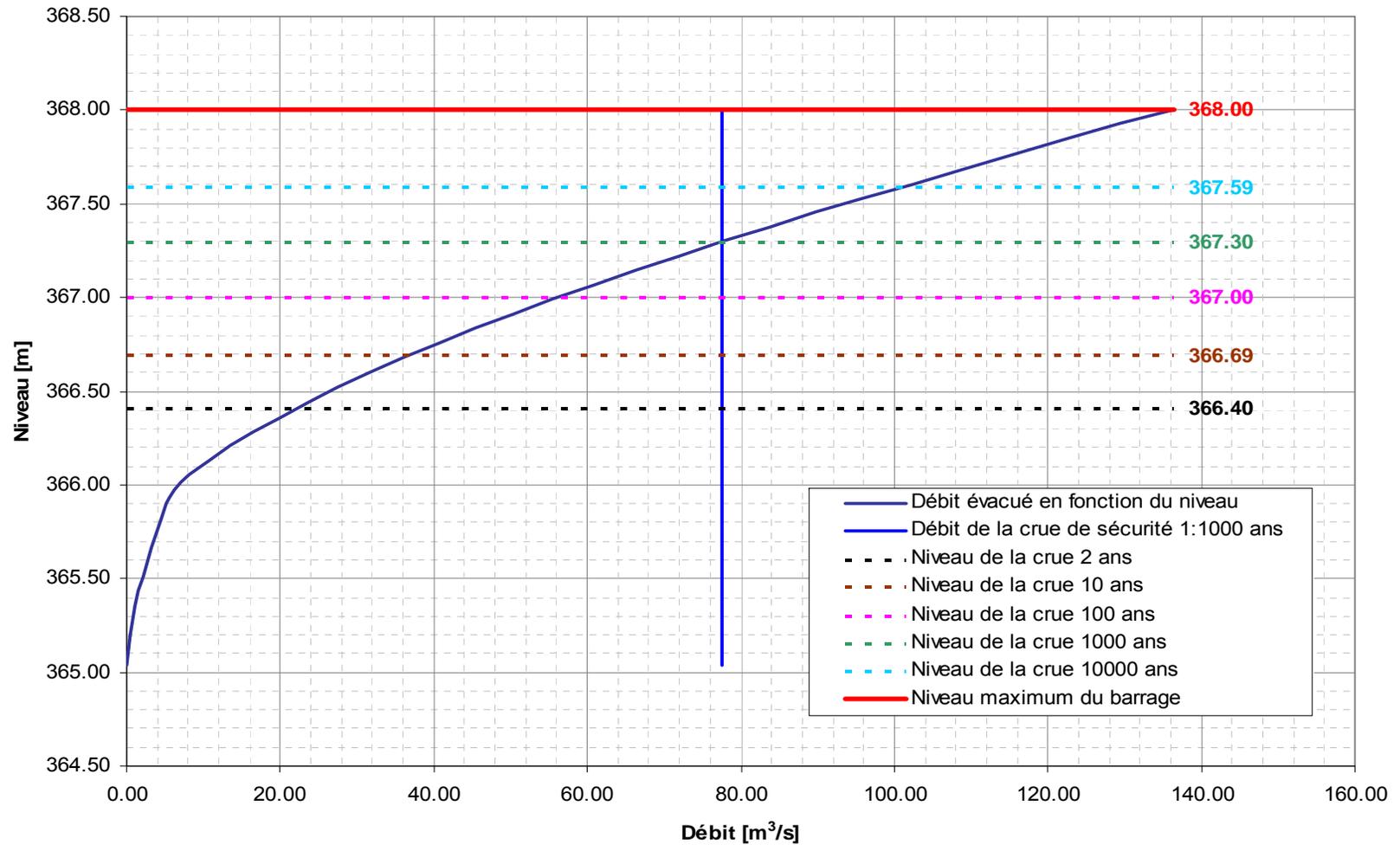


Figure 4-6 : Courbe d'évacuation du barrage Théodore

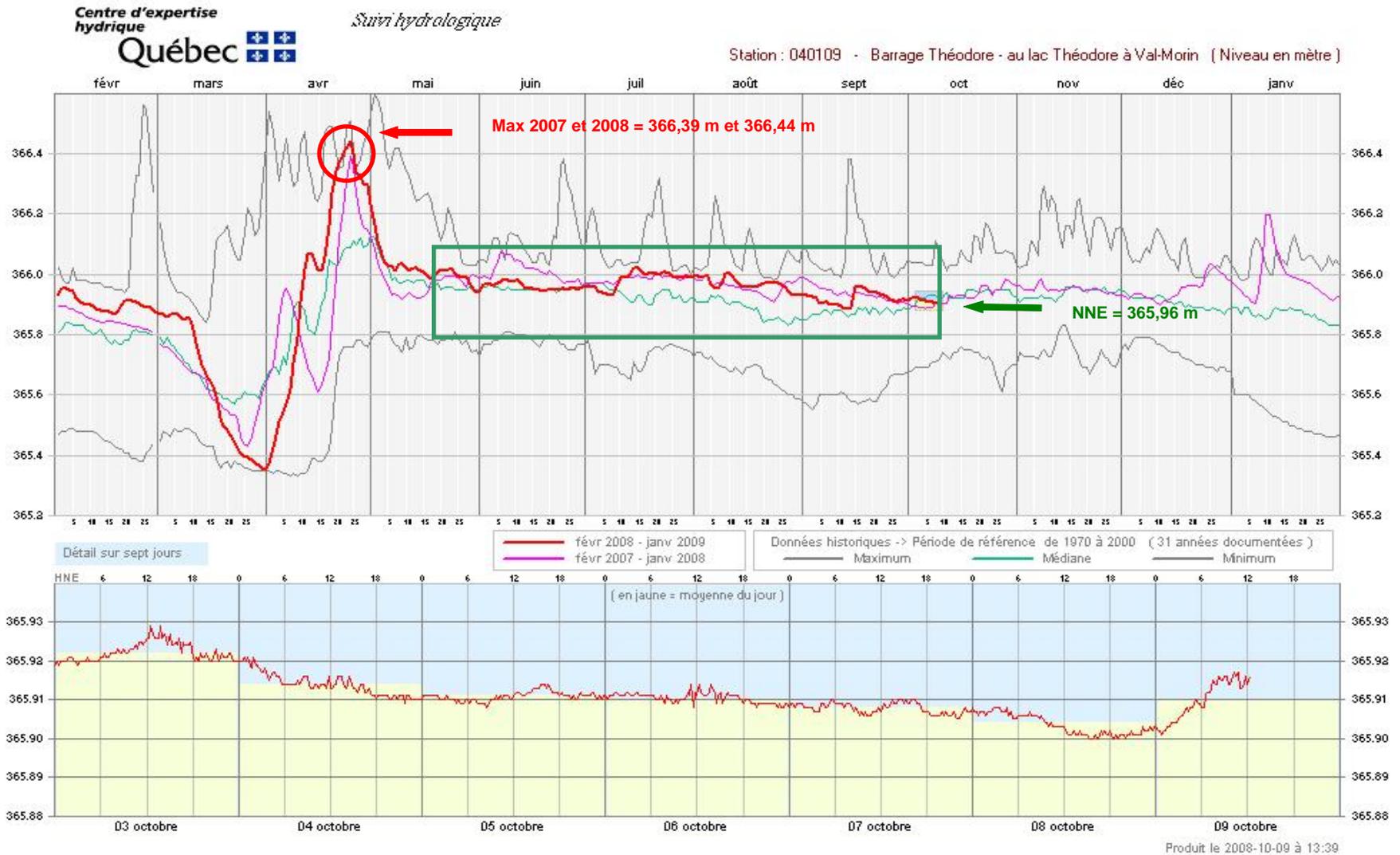


Figure 4-7 : Courbes du suivi hydrologique du barrage Théodore (station 040109)

## 4.2 Analyse de rupture de l'ouvrage

La présente section vise à déterminer le niveau des conséquences en cas de rupture du barrage Théodore. Actuellement, cet ouvrage a un niveau des conséquences « moyen » dans le Répertoire des barrages. Toutefois, il s'agit d'un classement préliminaire qui n'a jamais fait l'objet d'une vérification formelle par un ingénieur.

### 4.2.1 Caractérisation préliminaire du territoire affecté

Afin de déterminer le niveau des conséquences, une caractérisation du territoire susceptible d'être affecté par la rupture du barrage Théodore a été effectuée. Une carte topographique à l'échelle 1 : 20 000 ainsi qu'une visite terrain ont permis de dresser un inventaire des habitations et principales infrastructures présentes dans la zone susceptible d'être affectée en cas de rupture. Ainsi, la zone d'influence, advenant la rupture du barrage Théodore, débute à l'emplacement de cet ouvrage et longe la rivière aux Mulets jusqu'à la confluence de la rivière du Nord, sur une distance d'environ 16,0 km. Cette limite du tronçon d'étude est justifiée par les raisons suivantes :

- la rivière du Nord est un cours d'eau important;
- le volume du réservoir ne peut maintenir un débit élevé sur une longue période;
- la distance de près de 16,0 km qui permet un laminage du débit de brèche.

La zone d'influence inclut plusieurs bâtiments résidentiels ou commerciaux (territoire habité en permanence comptant 10 résidences ou plus et moins de 1000 habitants), six ponts de route locale, un pont de route collectrice et un pont de route nationale (route 117).

Compte tenu de l'importance du nombre d'habitants susceptibles d'être affectés ainsi que de la présence de la route nationale le niveau des conséquences initial a été établi à « très important ». Les zones susceptibles d'être affectées sont validées par l'étude de bris de barrage, présentée ci-dessous. Ainsi, la crue correspondant à ce niveau des conséquences est de récurrence 1 : 10 000 ans.

Afin de déterminer plus précisément le niveau des conséquences advenant la rupture du barrage Théodore, une caractérisation de la zone susceptible d'être affectée doit être réalisée à partir des résultats d'une étude d'onde de submersion.

## 4.2.2 Étude d'onde de submersion

Afin de déterminer le niveau des conséquences advenant la rupture du barrage Théodore, une caractérisation de la zone susceptible d'être affectée a été réalisée à partir des résultats d'une étude d'onde de rupture. Cette étude est réalisée en considérant différents débits et à partir de relevés de sections du cours d'eau en aval de l'ouvrage jusqu'au point d'atténuation de l'onde de rupture. Pour ce faire, nous avons utilisé le modèle FLDWAV (Flood Wave), un modèle unidimensionnel d'écoulement non permanent développé par le National Weather Service aux États-Unis.

L'étude d'onde de rupture nécessite l'analyse de divers scénarios de rupture en temps sec et en période de crue. Dans le scénario prévoyant la rupture du barrage en période de crue, le territoire affecté correspond à celui dont l'inondation est exclusivement attribuable à la rupture du barrage. Le scénario donnant les conséquences les plus élevées doit être retenu. Des cartes d'inondation doivent de plus être produites pour délimiter les zones affectées.

Les sections suivantes présentent la modélisation du secteur à l'étude, les hypothèses et les scénarios de rupture, les résultats obtenus ainsi qu'une description du territoire affecté et la détermination du niveau des conséquences du barrage Théodore.

### 4.2.2.1 Modélisation du secteur à l'étude

Dans le but de bien représenter le tronçon affecté par une rupture du barrage Théodore, un total de 32 sections ont été relevées à partir de cartes topographiques à l'échelle 1 : 20 000 et de relevés terrain réalisés par des techniciens du CEHQ. La section 1 constitue le barrage Théodore dont le point kilométrique est considéré égal à 0,00. La section 32 correspond au point kilométrique 16,02 et est située en aval de la confluence des rivières aux Mulets et du Nord.

### 4.2.2.2 Scénarios de rupture

Les scénarios de rupture suivants sont analysés : en temps sec, en crue 100 ans, 1000 ans et 10 000 ans. Préalablement aux simulations des scénarios de rupture, les conditions limites en amont, les débits des rivières en aval, les conditions limites en aval, la géométrie de la brèche ainsi que les niveaux de rupture du barrage ont été définis dans FLDWAV.

### 4.2.2.3 Condition limite à l'amont

Règle générale, la condition limite amont correspond à l'hydrogramme des débits déversés par l'évacuateur du barrage pour une condition donnée.

En temps sec, on estime à 1,5 m<sup>3</sup>/s le débit moyen évacué au barrage Théodore. Le niveau correspondant à ce débit au barrage est de 365,95 m selon la courbe de la capacité d'évacuation de l'ouvrage.

En crue 100 ans, 1000 ans et 10 000 ans, on considère que des débits constants respectifs de 56,51 m<sup>3</sup>/s, 77,47 m<sup>3</sup>/s et 100,44 m<sup>3</sup>/s sont déversés par le barrage. Dans ces conditions, l'ouvrage n'est pas submergé et les niveaux correspondants à ces débits sont de 367,00 m, 367,30 m et 367,59 m.

Lors d'une rupture du barrage, le débit passant par la brèche est calculé en fonction des dimensions de la brèche et est ajouté aux débits déversés par le barrage.

#### 4.2.2.4 Débits des rivières en aval

Les apports en provenance des rivières alimentant la rivière aux Mulets en aval du barrage Théodore ont été considérés dans les calculs. Le tableau 4-9 résume les débits considérés dans le modèle hydraulique.

Tableau 4-7 : Débits des rivières en aval

Localisation	Bassin versant (km <sup>2</sup> )	Temps sec (m <sup>3</sup> /s)	100 ans (m <sup>3</sup> /s)	1000 ans (m <sup>3</sup> /s)	10 000 ans (m <sup>3</sup> /s)
Décharges des lacs Bouthillier et Millette situés 3,50 km en aval du barrage Théodore	12	0,3	12	16	21
Décharge du lac Roy situé 9,50 km en aval du barrage Théodore	5	0,1	5	7	9
Rivière du Nord situé 13,60 km en aval du barrage Théodore	680	15	217	244	265

#### 4.2.2.5 Condition limite en aval

L'écoulement hydraulique au droit de la frontière aval est un écoulement normal régi par la loi de Manning.

#### 4.2.2.6 Description de la brèche

Une brèche est caractérisée par son temps de formation et sa géométrie. Le temps de formation de la brèche est établi en tenant compte du type d'ouvrage et des matériaux qui le composent. Le barrage Théodore est un ouvrage en béton. La hauteur du barrage est de 3,70 m. Sa longueur est d'environ 50,0 m et l'élévation minimale de la crête de l'ouvrage est à la cote 368,00 m. L'hypothèse de rupture retenue est la rupture d'une partie du déversoir fixe de l'ouvrage. Un temps de formation de brèche de 0,1 heure a donc été considéré. Par ailleurs, on

considère une brèche de forme rectangulaire ayant une largeur de 13,0 m, soit environ trois fois la hauteur du barrage. On considère en outre que le fond de la brèche est à l'élévation 363,81 m, soit l'élévation du radier du barrage.

#### **4.2.2.7 Résultats des simulations**

À titre informatif, la figure 4-8 et figure 4-9 illustrent le profil longitudinal du tronçon de rivière modélisé et, notamment, le niveau d'eau maximal atteint sans et avec la rupture du barrage en temps sec et en crue 1000 ans. La figure 4-10 présente les rehaussements des niveaux des eaux causés par la rupture du barrage, et ce, pour tous les scénarios analysés.

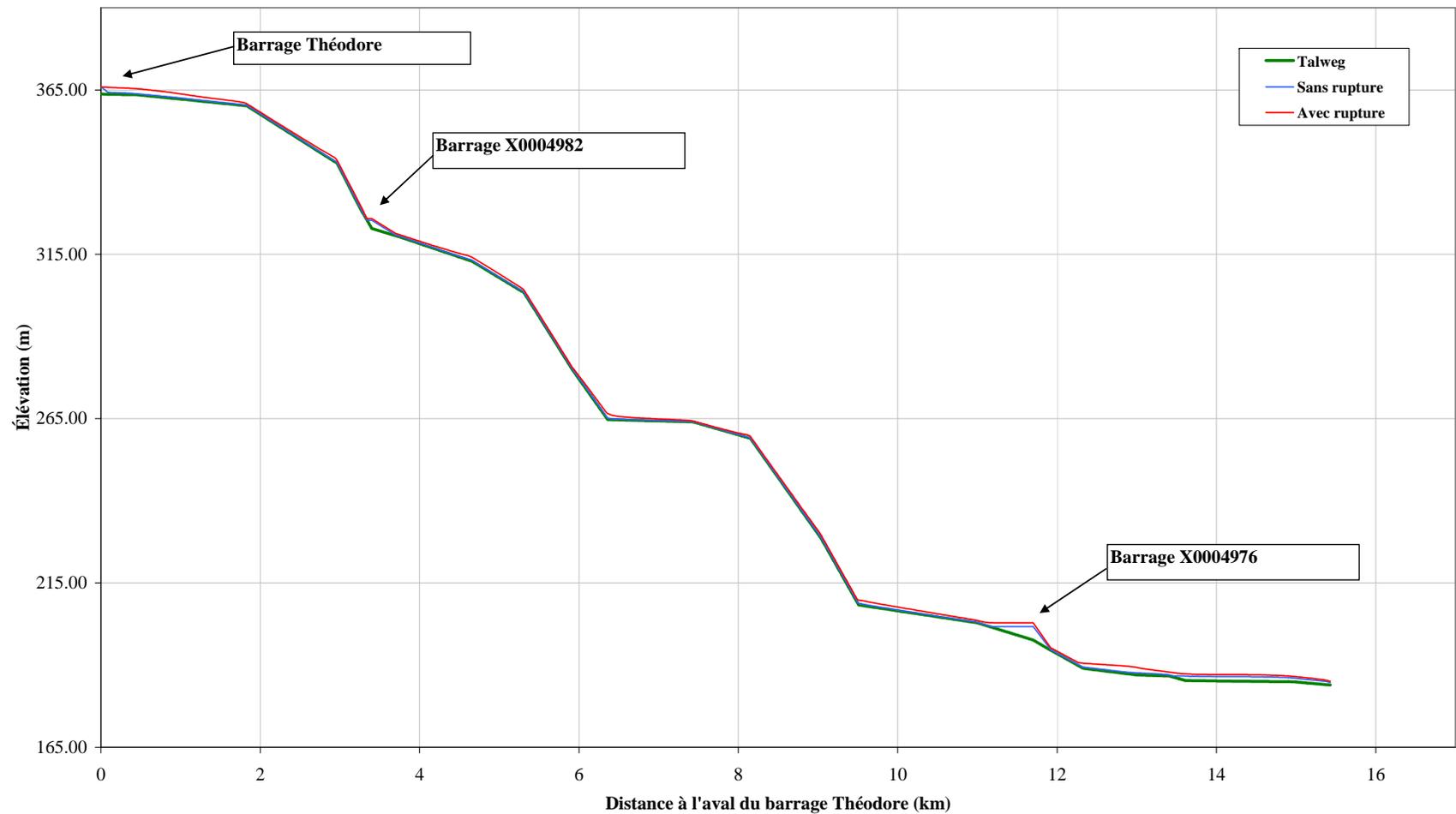


Figure 4-8 : Profil en long des niveaux d'eau maximums atteints en condition de temps sec

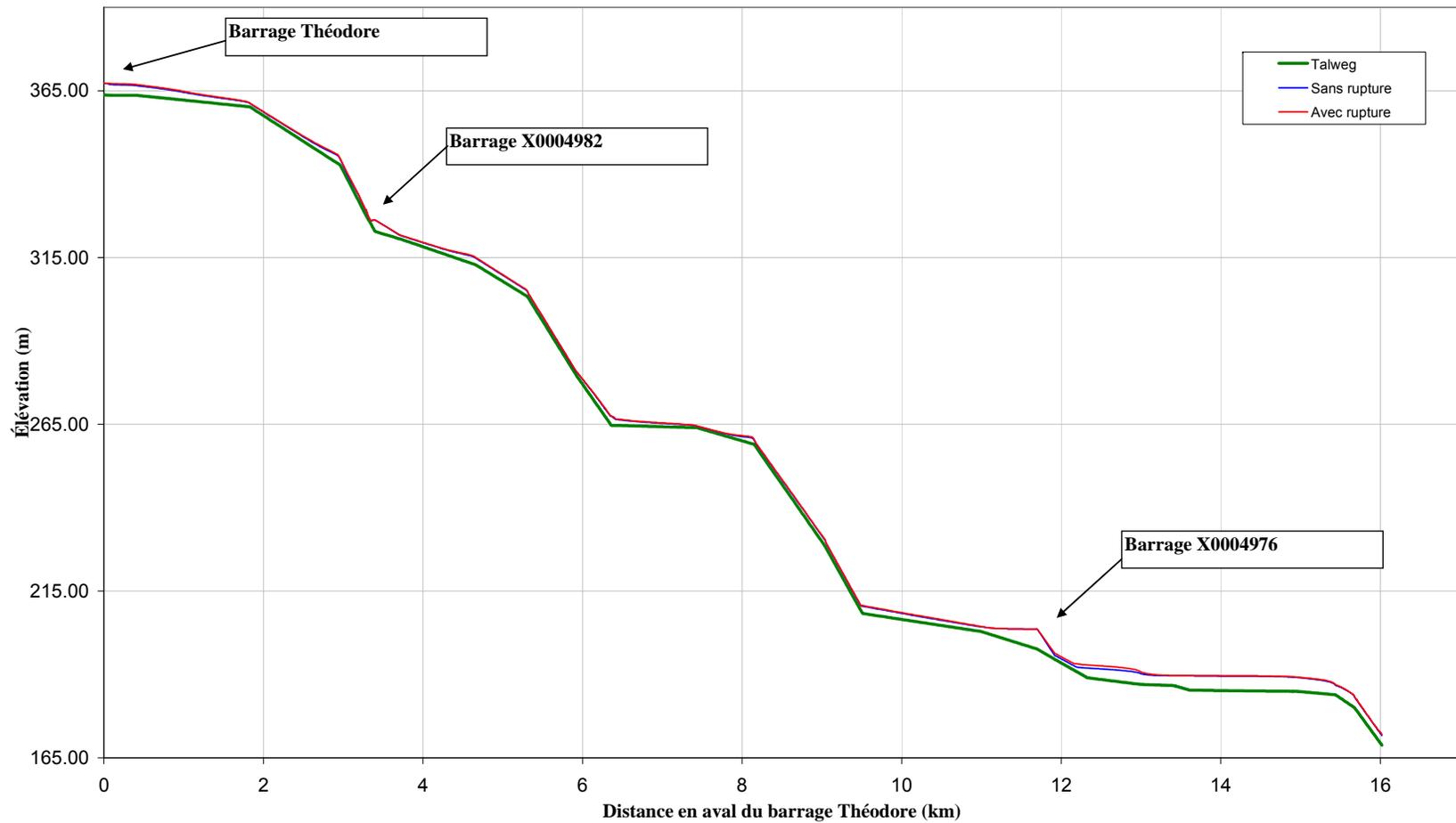


Figure 4-9 : Profil en long des niveaux d'eau maximums atteints en condition de crue 1000 ans

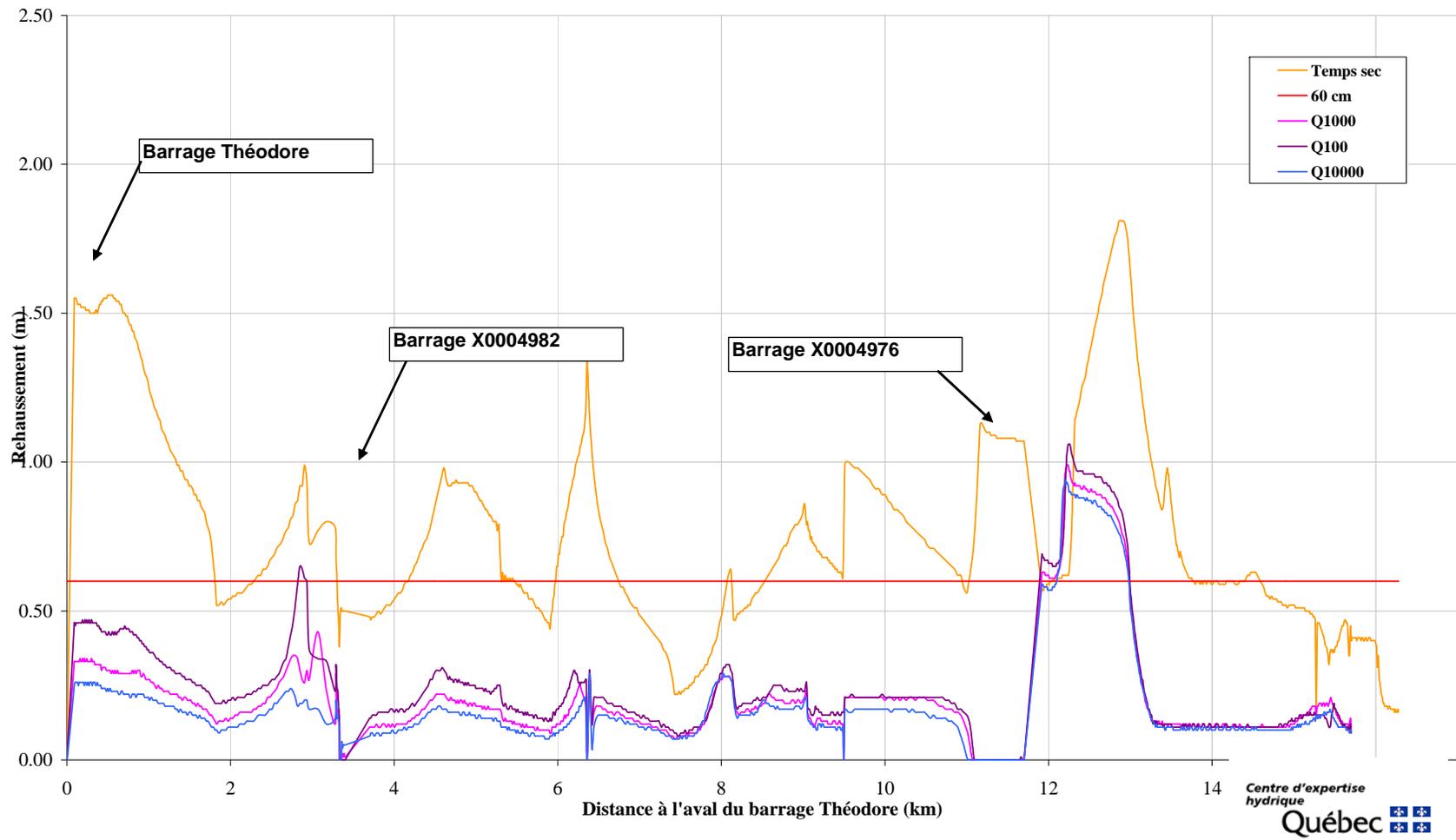


Figure 4-10 : Rehaussements des niveaux d'eau occasionnés par une rupture du barrage Théodore

#### 4.2.3 Niveau des conséquences et crue de sécurité

Le territoire affecté advenant la rupture du barrage Théodore est montré sur les cartes d'inondation placées à l'annexe 4. Selon les résultats de l'étude de bris de barrage, l'analyse des cartes topographiques et les relevés terrain effectués, le territoire affecté débute au barrage Théodore et longe les rivières aux Mulets et du Nord, jusqu'en aval de la confluence des deux rivières, sur une distance de 16,0 km. L'onde de submersion s'atténue le long de la rivière du Nord et, comme le montre les cartes d'inondation, la zone d'atténuation varie selon le scénario considéré.

Le niveau de conséquences pour chacun des scénarios a été établi selon l'article 17 et l'annexe V du Règlement sur la sécurité des barrages. Le niveau des conséquences est évalué en terme de densité de population et d'importance des infrastructures et services qui seraient détruits ou lourdement endommagés en cas de rupture. Comme le stipule le Règlement sur la sécurité des barrages, les infrastructures jugées affectées sont celles qui risquent d'être endommagées par l'onde de submersion engendrée par la rupture du barrage selon différents scénarios. Celles qui seraient touchées par la crue seule ont été jugées non affectées. Aussi, le nombre de bâtiments touchés par la rupture du barrage en crue est l'incrément entre ceux affectés par les scénarios sans et avec rupture du barrage. Notons que les bâtiments touchés n'incluent aucun hôpital, complexe industriel majeur ou école.

Le tableau 4-8 présente les infrastructures routières susceptibles d'être affectées sur les rivières aux Mulets et du Nord. Selon les résultats de l'étude d'onde de submersion, quatre ponts de route locale, un pont de route collectrice et deux barrages de faible contenance seraient affectés. Étant donné les niveaux d'eau atteints ainsi que les vitesses estimées à proximité de ces routes, nous considérons que les autres infrastructures présentées ne seraient pas affectées pour l'onde de rupture, et ce, quel que soit le scénario. En outre, le tableau 4-9 dresse un inventaire des éléments potentiellement touchés par l'onde de submersion selon les scénarios étudiés.

Tableau 4-8 : Infrastructures susceptibles d'être affectées sur la rivière aux Mulets et du Nord

Description de l'infrastructure	PK	Photographie
<p><b>Pont du chemin Val-Royal, Municipalité de Val-Morin (route locale)</b></p> <p>Dessus du tablier : 366,11 m Dessous du tablier : 365,26 m</p> <p><b>Niveaux d'eau atteints sans et avec rupture du barrage</b></p> <p>Temps sec : Nmax = 363,90 m et 365,43 m <b>affectée</b> Crue 100 ans : Nmax = 366,15 m et 366,59 m <b>non affectée</b> Crue 1000 ans : Nmax = 366,54 m et 366,86 m <b>non affectée</b> Crue 10 000 ans : Nmax = 366,90 m et 367,15 m <b>non affectée</b></p>	0,41	
<p><b>Barrage X0004982, Municipalité de Sainte-Adèle</b></p> <p>Catégorie administrative : faible contenance Type de barrage : béton Hauteur du barrage : 2,6 m Longueur du barrage : 49,6 m Capacité de retenue : 5 500 m<sup>3</sup> Niveau des conséquences : faible Propriétaire : personne physique</p> <p><b>Rupture en cascade en scénario de crue</b></p>	3,40	
<p><b>Pont du chemin du Moulin, Municipalité de Sainte-Adèle (route locale)</b></p> <p>Dessus du tablier : 327,17 m Dessous du tablier : 326,07 m</p> <p><b>Niveaux d'eau atteints sans et avec rupture du barrage</b></p> <p>Temps sec : Nmax = 320,85 m et 321,33 m <b>non affectée</b> Crue 100 ans : Nmax = 321,65 m et 321,79 m <b>non affectée</b> Crue 1000 ans : Nmax = 321,81 m et 321,92 m <b>non affectée</b> Crue 10 000 ans : Nmax = 321,97 m et 322,05 m <b>non affectée</b></p>	3,42	

<p><b>Pont du chemin du Mont-Loup-Garou, Municipalité de Sainte-Adèle (route locale)</b></p> <p>Dessus du tablier : 268,21 m Dessous du tablier : 266,01 m</p> <p><b>Niveaux d'eau atteints sans et avec rupture du barrage</b></p> <p>Temps sec : Nmax = 264,93 m et 265,89 m <b>non affectée</b> Crue 100 ans : Nmax = 266,20 m et 266,41 m <b>non affectée</b> Crue 1000 ans : Nmax = 266,41 m et 266,57 m <b>non affectée</b> Crue 10 000 ans : Nmax = 266,59 m et 266,70 m <b>non affectée</b></p>	<p>6,44</p>	
Description de l'infrastructure	PK	Photographie
<p><b>Pont de la route 117, Municipalité de Sainte-Adèle (route nationale)</b></p> <p>Dessus du tablier : 254,41 m Dessous du tablier : 252,71 m</p> <p><b>Niveaux d'eau atteints sans et avec rupture du barrage</b></p> <p>Temps sec : Nmax = 240,08 m et 240,76 m <b>non affectée</b> Crue 100 ans : Nmax = 241,16 m et 241,41 m <b>non affectée</b> Crue 1000 ans : Nmax = 241,41 m et 241,61 m <b>non affectée</b> Crue 10 000 ans : Nmax = 241,64 m et 241,81 m <b>non affectée</b></p>	<p>8,71</p>	
<p><b>Pont du chemin du Mont-Sauvage, Municipalité de Sainte-Adèle (route locale)</b></p> <p><b>Niveaux d'eau atteints sans et avec rupture du barrage</b></p> <p>Temps sec : Nmax = 232,51 m et 233,30 m <b>affectée</b> Crue 100 ans : Nmax = 233,70 m et 233,94 m <b>non affectée</b> Crue 1000 ans : Nmax = 233,94 m et 234,14 m <b>non affectée</b> Crue 10 000 ans : Nmax = 234,16 m et 234,34 m <b>non affectée</b></p>	<p>8,92</p>	
<p><b>Pont de la route 370, Municipalité de Sainte-Adèle (route collectrice)</b></p> <p>Dessus du tablier : 204,20 m Dessous du tablier : 202,70 m</p> <p><b>Niveaux d'eau atteints sans et avec rupture du barrage</b></p> <p>Temps sec : Nmax = 201,75 m et 202,82 m <b>affectée</b> Crue 100 ans : Nmax = 203,33 m et 203,33 m <b>non affectée</b> Crue 1000 ans : Nmax = 203,61 m et 203,61 m <b>non affectée</b> Crue 10 000 ans : Nmax = 203,90 m et 203,90 m <b>non affectée</b></p>	<p>11,61</p>	

<p><b>Barrage X0004976, Municipalité de Sainte-Adèle</b>                  Catégorie administrative : faible contenance                  Type de barrage : béton                  Hauteur du barrage : 4,9 m                  Longueur du barrage : 32,0 m                  Capacité de retenue : 10 656 m<sup>3</sup>                  Niveau des conséquences : minimal                  Propriétaire : personne physique  <b>Rupture en cascade en scénario de crue</b></p>	<p>11,70</p>	
<p><b>Description de l'infrastructure</b></p>	<p><b>PK</b></p>	<p><b>Photographie</b></p>
<p><b>Pont du chemin Notre-Dame, Municipalité de Sainte-Adèle (route locale)</b>                  Dessus du tablier : 193,83 m                  Dessous du tablier : 192,83 m  <b>Niveaux d'eau atteints sans et avec rupture du barrage</b>                  Temps sec : Nmax = 189,42 m et 190,56 m <b>non affectée</b>                  Crue 100 ans : Nmax = 191,50 m et 192,49 m <b>non affectée</b>                  Crue 1000 ans : Nmax = 191,93 m et 192,86 m <b>affectée</b>                  Crue 10 000 ans : Nmax = 192,34 m et 193,23 m <b>affectée</b></p>	<p>12,32</p>	
<p><b>Pont de la rue, Municipalité de Sainte-Adèle (route locale)</b>                  Dessus du tablier : 190,31 m                  Dessous du tablier : 189,31 m  <b>Niveaux d'eau atteints sans et avec rupture du barrage</b>                  Temps sec : Nmax = 188,31 m et 189,95 m <b>affectée</b>                  Crue 100 ans : Nmax = 190,86 m et 191,79 m <b>non affectée</b>                  Crue 1000 ans : Nmax = 191,31 m et 192,18 m <b>non affectée</b>                  Crue 10 000 ans : Nmax = 191,72 m et 192,55 m <b>non affectée</b></p>	<p>12,72</p>	

<p><b>Pont de la rue de la Vallée-du-Golf, Municipalité de Sainte-Adèle (route locale)</b></p> <p>Dessus du tablier : 189,46 m Dessous du tablier : 187,96 m</p> <p><b>Niveaux d'eau atteints sans et avec rupture du barrage</b></p> <p>Temps sec : Nmax = 185,58 m et 186,08 m <b>non affectée</b> Crue 100 ans : Nmax = 188,26 m et 188,41 m <b>non affectée</b> Crue 1000 ans : Nmax = 188,61 m et 188,76 m <b>non affectée</b> Crue 10 000 ans : Nmax = 188,89 m et 189,01 m <b>non affectée</b></p>	<p>15,15</p>	
<p><b>Pont de la rue Saint-Joseph, Municipalité de Sainte-Adèle (route locale)</b></p> <p>Dessus du tablier : 192,56 m Dessous du tablier : 190,41 m</p> <p><b>Niveaux d'eau atteints sans et avec rupture du barrage</b></p> <p>Temps sec : Nmax = 185,46 m et 185,95 m <b>non affectée</b> Crue 100 ans : Nmax = 188,11 m et 188,27 m <b>non affectée</b> Crue 1000 ans : Nmax = 188,47 m et 188,64 m <b>non affectée</b> Crue 10 000 ans : Nmax = 188,76 m et 188,89 m <b>non affectée</b></p>	<p>15,20</p>	
<p><b>Description de l'infrastructure</b></p>	<p><b>PK</b></p>	<p><b>Photographie</b></p>
<p><b>Pont de la rue Rolland, Municipalité de Sainte-Adèle (route locale)</b></p> <p>Dessus du tablier : 176,96 m Dessous du tablier : 175,76 m</p> <p><b>Niveaux d'eau atteints sans et avec rupture du barrage</b></p> <p>Temps sec : Nmax = 171,74 m et 172,14 m <b>non affectée</b> Crue 100 ans : Nmax = 173,80 m et 174,06 m <b>non affectée</b> Crue 1000 ans : Nmax = 174,03 m et 174,27 m <b>non affectée</b> Crue 10 000 ans : Nmax = 174,25 m et 174,82 m <b>non affectée</b></p>	<p>15,95</p>	

Tableau 4-9 : Inventaire des éléments potentiellement touchés par l'onde de rupture du barrage Théodore

Élément	Rupture en temps sec	Rupture en crue 100 ans	Rupture en crue 1000 ans	Rupture en crue 10 000 ans
<b>Population</b>				
Habitations permanentes	1	5	5	5
Habitations saisonnières	4	2	2	2
Camping	0	0	0	0
École	0	0	0	0
Hôpital	0	0	0	0
<b>Entreprises</b>				
Entreposage de matières dangereuses	0	0	0	0
Grande entreprise ( > 500 employés )	0	0	0	0
Moyenne entreprise ( > 50 et < 500 employés)	0	0	0	0
Petite entreprise (< 50 employés)	0	0	0	0
<b>Infrastructures</b>				
Pont de route d'accès aux ressources	0	0	0	0
Pont de route locale	3	0	1	1
Pont de route collectrice	1	0	0	0
Pont de route régionale	0	0	0	0
Pont de route nationale	0	0	0	0
Ligne de chemin de fer (locale ou régionale)	0	0	0	0
Autres barrages	0	2	2	2
<b>Niveau des conséquences</b>	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen

Compte tenu des infrastructures et du nombre d'habitations affectées par la rupture du barrage Théodore, son niveau des conséquences est « moyen ». Selon l'article 21 du Règlement sur la sécurité des barrages, la crue de sécurité correspondant à ce niveau des conséquences est la crue de récurrence 1 : 1000 ans.

#### 4.2.4 Cartographie des zones inondables

Les résultats des simulations hydrodynamiques des ondes de submersion ont été transposés sur des cartes afin de délimiter les zones qui seraient affectées par la rupture du barrage Théodore. Les informations contenues sur ces cartes sont :

- les limites des zones affectées avec et sans rupture du barrage;
- des étiquettes contenant : les informations relatives aux niveaux maximums observables suite à la rupture de l'ouvrage, le temps d'arrivée du front d'onde et le temps requis pour atteindre les niveaux maximums.

Les cartes sommaires d'inondation par temps sec et en crue 1000 ans sont présentées à l'annexe 4.

#### 4.2.5 Évaluation de la revanche

L'article 25 du Règlement sur la sécurité des barrages stipule qu'il doit exister une distance minimale de 1,0 m entre le point bas de la crête d'un ouvrage susceptible d'érosion et le niveau maximal atteint lors de la crue de sécurité à moins que le propriétaire ne démontre que toutes les incertitudes hydrologiques ainsi que celles relatives à la gestion des crues ont été prises en compte dans l'établissement de la crue de sécurité. Le barrage Théodore, comportant des éléments en remblai, est susceptible d'érosion.

Afin de tenir compte de toutes les incertitudes hydrauliques, une analyse de la capacité à gérer la crue et du rehaussement du plan d'eau causé par les vagues ainsi qu'une estimation de l'élévation des niveaux d'eau atteints en crue seront effectuées.

Compte tenu du type d'appareil d'évacuation en place, soit un déversoir à poutrelles opéré occasionnellement, il y a peu d'incertitude quant à la capacité de gérer la crue. En ce qui concerne la présence de vagues, un calcul de la hauteur de vagues a été réalisé à l'aide d'une méthode décrite dans le Shore Protection Manuel (1977). Selon ce calcul, on estime à 39 cm la hauteur de vagues pouvant être générée par un vent de 75 km/h, et à 24 cm le rehaussement causé par un vent de 50 km/h. Afin de déterminer si la revanche est adéquate, les conditions suivantes doivent être respectées :

- L'élévation en crête des composantes du barrage qui sont susceptibles d'érosion doit être supérieure ou égale au rehaussement dû aux vagues engendrées par un vent de 50 km/h s'ajoutant au niveau correspondant à l'évacuation de la crue de sécurité estimée à 367,30 m;

- L'élévation en crête des composantes du barrage qui sont susceptibles d'érosion doit être supérieure ou égale au rehaussement dû aux vagues engendrées par un vent de 75 km/h s'ajoutant au niveau normal d'exploitation du barrage établi à 365,96 m;
- La revanche doit permettre le passage d'une crue supérieure à la crue de sécurité, soit une crue 10 000 ans estimée à 367,59 m;
- La revanche doit être d'au moins 30 cm.

Le tableau 4-10 indique l'élévation obtenue selon chacune de ces conditions.

Tableau 4-10 : Élévation minimale de la crête des digues selon différentes conditions

Condition	Élévation (m)
A	367,54
B	366,35
C	367,59
D	367,60

Pour respecter toutes ces conditions, l'élévation de la crête du barrage devrait être au minimum de 367,60 m. Rappelons que la crête du barrage Théodore est à l'élévation 368,00 m. Ainsi, la revanche actuelle est suffisante. Cependant, il est à noter qu'en rive gauche, le terrain naturel est à l'élévation 366,47 m. D'après nos observations, nous considérons ce dernier non érodable. Par contre, une validation de la nature des sols en place sera réalisée lors des travaux de réfection du barrage.

#### 4.2.6 Analyse du pourtour du réservoir

Une analyse de la topographie du pourtour du réservoir fut réalisée à partir d'une carte topographique à l'échelle 1 : 20 000. Cette analyse démontre que le point le plus bas se situe au droit du barrage, soit à l'élévation du terrain naturel en rive gauche, qui est de 366,47 m.

#### 4.2.7 Résumé des caractéristiques hydrauliques

Le tableau suivant indique les niveaux d'eau ainsi que ceux des poutrelles relatifs aux différentes conditions hydrauliques.

Tableau 4-11 : Niveaux d'eau et niveau des poutrelles considérés selon les conditions hydrauliques

Condition hydraulique	Élévation amont (m)	Élévation aval (m)	Niveau des poutrelles (mm)
Niveau maximal d'exploitation	366,06	364,51	365,84 (4 poutrelles)
Niveau de la crue 2 ans	366,40	364,72	365,04 (0 poutrelles)
Niveau de la crue de sécurité (crue 1000 ans)	367,30	365,87	365,04 (0 poutrelles)

### 4.3 Propriétés géotechniques des terrains de fondation

Les caractéristiques de la fondation de la digue sont présentées à l'article 3.5.6 de l'étude du groupe conseil Génivar jointe à l'annexe 1. Le groupe conseil a mandaté la firme Inspec-sol afin de caractériser les matériaux de l'ouvrage ainsi que ses fondations. Afin de compléter les informations concernant la fondation de la section déversante en béton, des forages à la carotteuse ont été réalisés par l'équipe de plongeurs du CEHQ à l'été 2008. Le rapport de carottages est présenté en annexe 3. Ces carottages de béton ont permis de confirmer la présence du roc sous les pertuis et sous le plot 3 (figure 3-1). Cependant sous les plots 2 et 3, une fondation de sable et graviers a été trouvée. En rive gauche, la fondation de la culée n'a pu être déterminée avec certitude puisque aucun forage n'y a été effectué. Cependant, on observe à environ 25 m à l'amont de la culée un affleurement rocheux. De plus, le propriétaire de la maison située en sommet de talus confirme que les fondations de celles-ci sont assises sur le roc. Les analyses de stabilité ont été réalisées pour les cas les plus critiques soit avec une section déversante reposant sur une fondation granulaire. Les propriétés géotechniques utilisées pour les analyses de stabilité de l'ouvrage en béton sont présentées au tableau 4-12. La capacité portante utilisée provient de l'étude du groupe conseil Génivar et l'angle de friction a été déterminé selon *Bowles (1996)* pour un sable et graviers.

Tableau 4-12 : Propriétés géotechniques des terrains de fondation

Caractéristique	Valeur
Capacité portante ( $q_a$ )	250 kPa
Angle de friction résiduel ( $\Phi'_r$ )	36°

#### 4.4 Analyse de la stabilité de l'ouvrage en remblai

L'aile droite est constituée de matériaux granulaires compactés de calibre 20-0 mm. Selon les informations disponibles et les observations, la digue serait assise sur le roc. D'après les relevés topographiques effectués à l'été 2008 par le CEHQ, la digue a une hauteur maximale de 1,7 m. La hauteur maximale de la digue est située à la jonction avec la culée droite du barrage. Les pentes maximales amont et aval sont de 22,5° et 32° respectivement. Il est important de remarquer dans cette étude que seul le niveau d'eau amont à la crue de sécurité atteint la digue. Aussi, les plans du rehaussement montrent qu'un géotextile de type « Texel » a été posé sous l'enrochement, ce qui permet de restreindre l'écoulement à travers la digue. Pour toutes ces considérations, la digue a été jugée stable contre l'érosion interne et les pentes ont été jugées stables pour tous les cas de chargements.

##### 4.4.1 Stabilité contre l'érosion externe

La dimension de l'enrochement de la digue a été vérifiée afin d'assurer une protection contre l'effet des vagues. Seul l'enrochement amont fait l'objet d'une étude particulière. La hauteur de la vague provient du calcul de la revanche à la section 4.2.5. L'équation suivante permet de calculer la masse minimale ( $M_{\min}$ ) de la pierre utilisée pour cet enrochement.

$$M_{\min} = \frac{\rho_r H_s^3}{K(S_r - 1)^3 (\cot \alpha)}$$

Où :  $\rho_r$  : Masse volumique du roc ( $\text{kg/m}^3$ )

$H_s$  : Hauteur significative de la vague (m)

$K$  : Coefficient expérimental de stabilité, soit 3,50 pour un degré de dommage acceptable ou 1,75 pour une absence de dommage acceptable

$S_r$  : Gravité spécifique de la pierre

$\cot \alpha$  : Pente du talus (horizontale/verticale)

Quant aux dimensions de la pierre, elles sont déterminées par l'équation suivante :

$$D = \left( \frac{M}{C_f \rho_r} \right)^{1/3}$$

Où :  $M$  : Masse de la pierre (kg)

$C_f$  : Coefficient de forme (0,60)

$\rho_r$  : Masse volumique du roc (kg/m<sup>3</sup>)

Puisque avec un vent de 75 km/h, une vague de 0,39 m serait générée, le diamètre minimal de l'enrochement amont de la digue doit être de 138 mm. Cependant, de façon générale, la masse maximale ne doit pas être supérieure à trois fois la masse minimale afin d'assurer une granulométrie uniforme. En supposant un diamètre minimal de 150 mm, le diamètre maximal devrait être de 216 mm. Les observations, photo 4-1, permettent d'affirmer que le calibre de l'enrochement amont est de dimension supérieure à 150 mm, et uniforme. Les plans tels que construits indiquent d'ailleurs un calibre 400-600 mm mis en place. La hauteur de l'enrochement, qui s'élève jusqu'à la crête de la digue (368,0 m), est suffisante. La protection de l'enrochement arrête à 14 m après le mur de la culée. À partir de ce point la digue à moins de 0,75 m de hauteur, se confond avec le terrain naturel et est protégée par la présence d'arbres. Enfin, les observations permettent de conclure que la protection offerte par le perré amont est adéquate.



Photo 4-1 : Perré amont en rive droite

#### 4.4.2 Stabilité post-sismique

Le barrage Théodore est situé dans une zone de forte sismicité, soit la zone 4 de la carte du Règlement (figure 4-11). Pour cette raison, le potentiel de liquéfaction au sein de la digue doit être vérifié. Cependant, le remblai présente une granulométrie étalée et n'est qu'exceptionnellement partiellement saturé dans des conditions extrêmes. C'est pourquoi le risque de liquéfaction n'est pas considéré pour cette digue. Dans la culée, on retrouve une couche de sable fin silteux, saturé et très lâche. Cependant, cette couche se retrouve confinée entre les murs de béton et le matériau de la digue (20-0 mm), non liquéfiable. Advenant la liquéfaction de cette couche, un tassement des matériaux de la culée serait attendu. Au quel cas, la stabilité de l'ouvrage à court terme ne serait pas menacée et un remblai pourra y être ajouté.

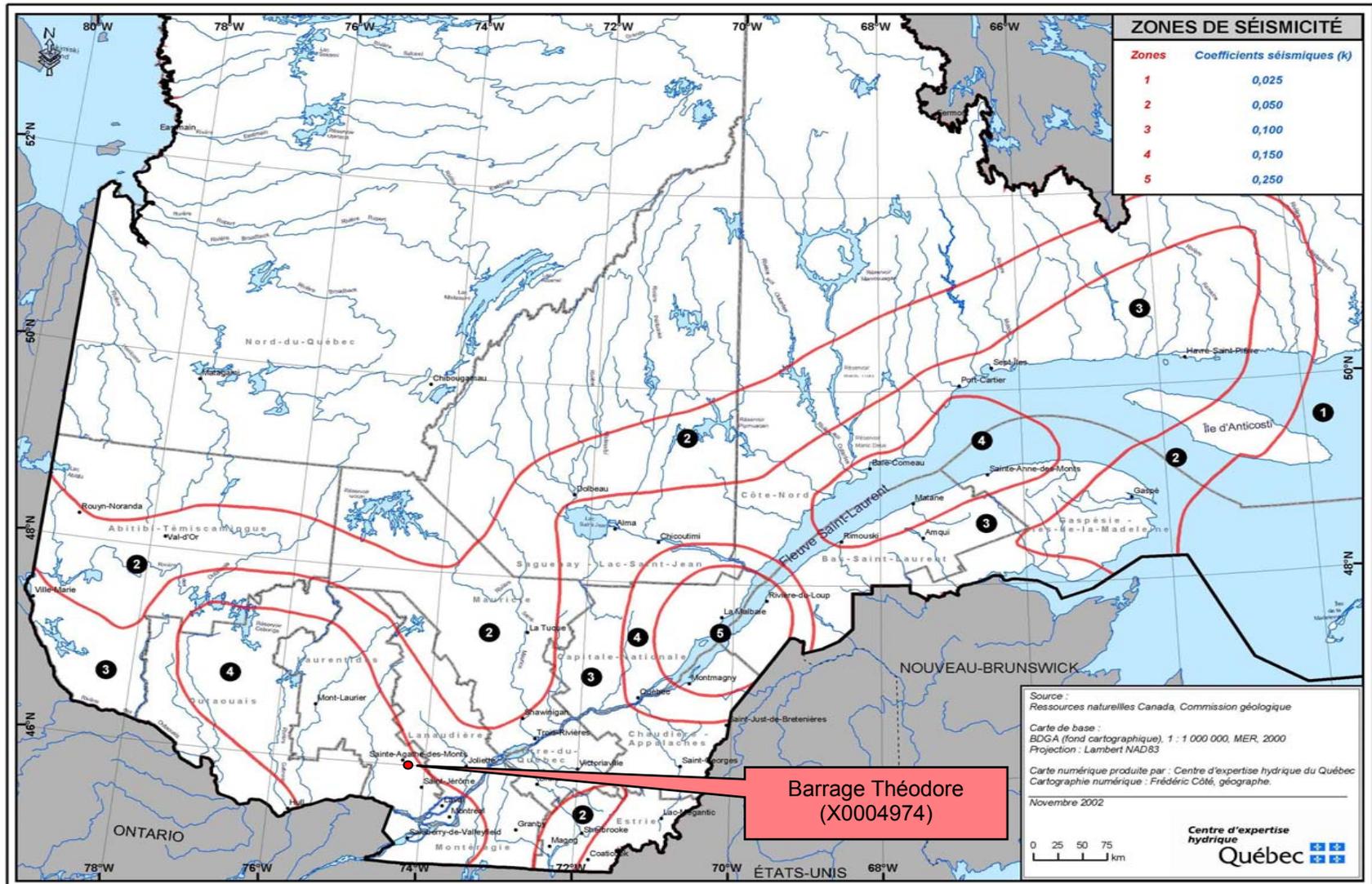


Figure 4-11 : Carte des zones de séismicité

## 4.5 Analyse de la stabilité des ouvrages en béton

### 4.5.1 Propriétés des matériaux

Le barrage Théodore a été l'objet de travaux d'investigation réalisés par Inspec-Sol Inc. La présentation des essais sur le béton se retrouve à l'article 3.5.7 (page 18, annexe 1) de l'étude du groupe conseil Genivar. Les propriétés retenues pour la présente analyse de la stabilité sont celles relatives au vieux béton (tableaux 6 et 8) qui sont plus conservatrices. Ainsi, une résistance à la compression du béton ( $f'c$ ) de 30 MPa et une masse volumique de 2310 kg/m<sup>3</sup> sont considérées.

Les autres propriétés du béton prises en compte sont présentées au tableau suivant et les valeurs retenues sont celles suggérées par l'ACB.

Tableau 4-13 : Propriétés du béton

Caractéristique	Valeur
Résistance à la traction $f_t$	3,00 MPa
Résistance à la traction – joint ( $f_{tj}$ )	1,50 MPa
Angle de friction de pointe ( $\Phi$ )	55 °
Cohésion de pointe (C)	0,931 MPa
Cohésion de pointe – joint (C <sub>j</sub> )	0,466 MPa
Angle de friction résiduel ( $\Phi_r$ )	45 °
Cohésion résiduelle (C <sub>r</sub> )	0 MPa

Par ailleurs, les pertes de section causées par l'érosion du béton ne sont pas considérées dans l'analyse.

### 4.5.2 Déversoir fixe et déversoir à poutrelles

#### 4.5.2.1 Méthodologie

La méthodologie utilisée respecte les directives de l'ACB actuellement en vigueur. La stabilité des structures déversantes est vérifiée suivant la méthode de gravité en faisant l'analyse des charges susceptibles de solliciter l'ouvrage. Cette méthode repose sur l'hypothèse que l'ouvrage à l'étude se comporte comme un corps rigide dont la stabilité est assurée par son

pois propre. Il existe trois catégories de combinaisons de charges, soient les combinaisons normales, inhabituelles et extrêmes. Dans chaque cas, il faut établir les charges à considérer et vérifier que leurs combinaisons répondent aux critères de sécurité reconnus.

Le comportement global du barrage Théodore est modélisé par deux sections d'analyse présentées aux figures suivantes. La première section, de largeur unitaire, permet d'évaluer la stabilité du déversoir fixe. La seconde section, composée du pilier central ainsi que de la portion tributaire du radier et des poutrelles de part et d'autre, contribue à l'étude du déversoir à poutrelles.

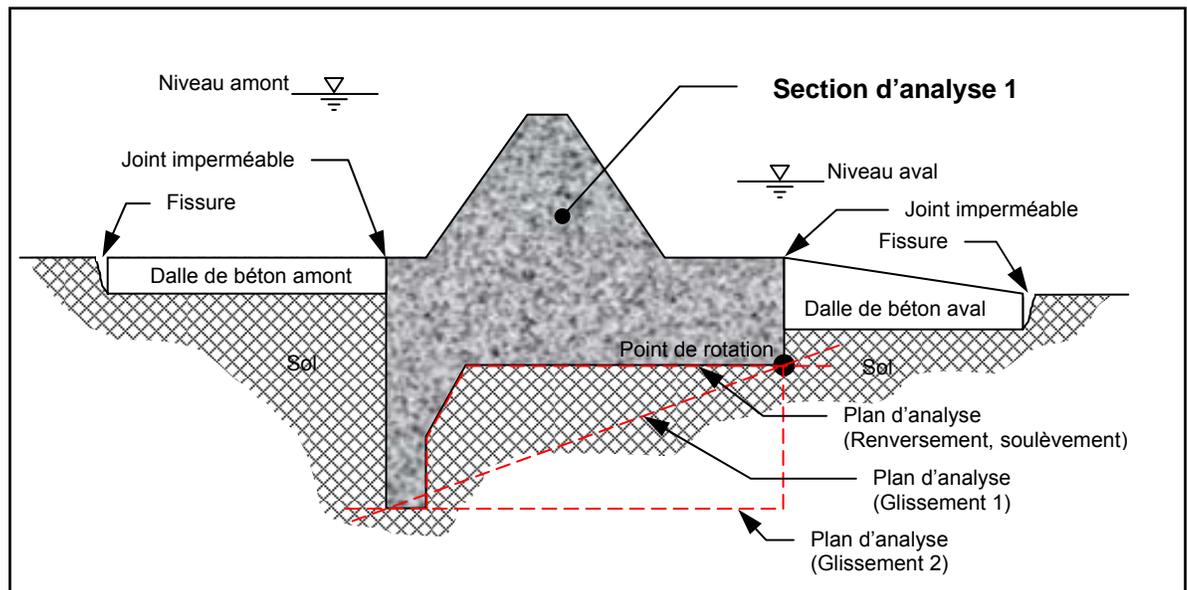


Figure 4-12 : Section d'analyse 1 - Déversoir fixe

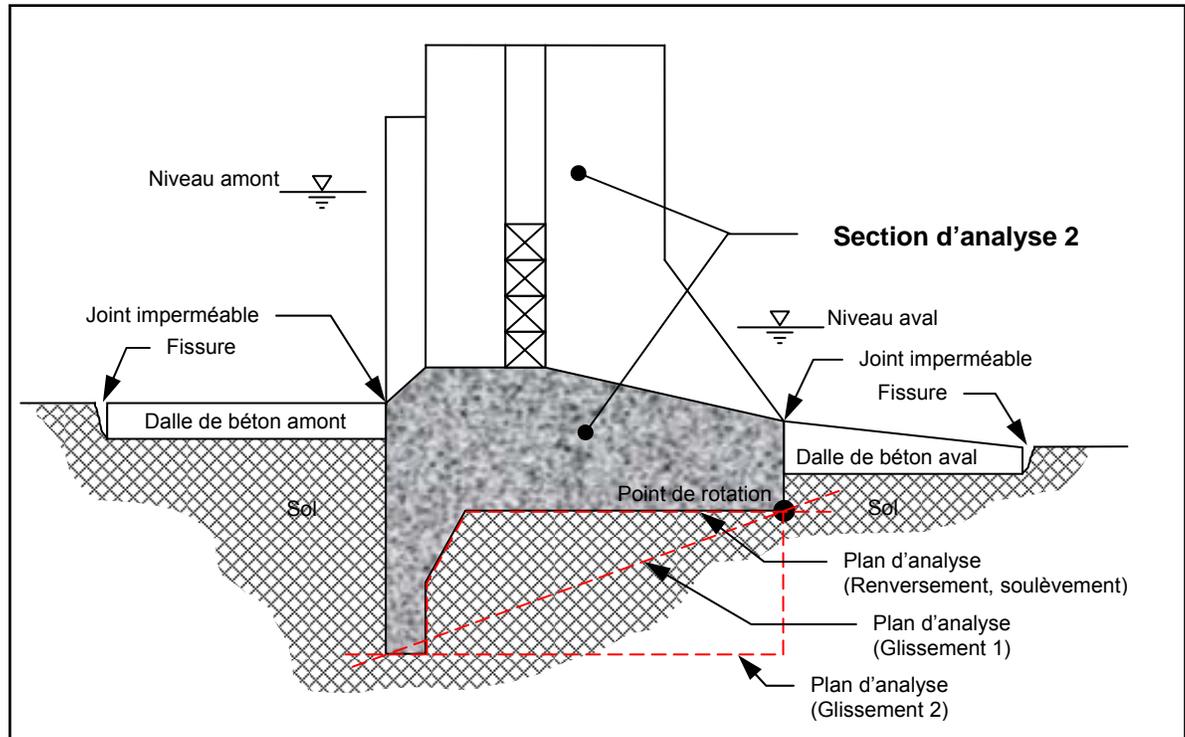


Figure 4-13 : Section d'analyse 2 - Déversoir à poutrelles

#### 4.5.2.2 Revue des charges

##### Charges permanentes (D)

Les charges permanentes comprennent le poids propre du béton, notamment celui des piliers et du radier. De plus, le poids déjaugé des dalles de béton amont et aval est considéré pour le calcul du glissement selon le plan d'analyse (Glissement 2). Par ailleurs, les poids des passerelles et celui des appareils de levage sont négligés.

##### Pressions hydrostatiques (H)

La pression hydrostatique s'exerce perpendiculairement aux surfaces immergées. Des composantes horizontales et verticales de cette pression peuvent être obtenues à partir des niveaux d'eau amont et aval. Ces charges sont appliquées jusqu'aux plans d'analyse et peuvent avoir un effet stabilisateur ou déstabilisateur. Les niveaux d'eau ainsi que ceux des poutrelles relatifs aux différentes conditions hydrauliques qui sont considérés pour l'analyse de la stabilité sont présentés au tableau 4-10.

Par ailleurs, sous le niveau du dessous des dalles de béton amont et aval, la distribution des pressions hydrostatiques est établie selon une méthode simplifiée proposée par FERC ("Creep

Théorie", 3-2.4.4.1). Reposant sur cette théorie, les valeurs de ces efforts sont obtenues par la somme des composantes relatives au potentiel d'écoulement et à l'élévation. Enfin, lors d'un séisme le niveau maximal d'exploitation est considéré.

#### Sous-pressions (U)

Les sous-pressions sont considérées comme agissant sur 100 % des surfaces qui leurs sont exposées et elles sont calculées pour chacun des plans d'analyse montrés aux figures 4-11 et 4-12. La démarche retenue pour le calcul des pressions hydrostatiques sous le niveau des dalles amont et aval (FERC ("Creep Théorie", 3-2.4.4.1) permet également de déterminer les valeurs des sous-pressions.

#### Poussée des sols et des sédiments (S)

Aucune poussée des sédiments en amont du barrage Théodore n'est considérée et aucun remblai ne s'appuie sur la structure. De plus, la contribution d'un effort de butée en aval n'a pas été considérée dans l'analyse de la stabilité compte tenu de l'affouillement observé.

#### Poussée des glaces (I)

Les poussées des glaces peuvent se résumer en deux catégories : les poussées statiques et les forces dynamiques.

Les poussées statiques se produisent lorsque l'ouvrage s'oppose au déplacement d'un couvert de glace continu causé, entre autre, par l'expansion thermique de la glace. En ce qui a trait au barrage Théodore, un comportement représentatif des glaces au site de l'ouvrage a pu être observé le 28 février 2007 comme l'illustre la photo suivante.



Photo 4-2 : Vue générale amont du barrage Théodore (Hiver 2007)

Cette vue générale amont du barrage Théodore prise au cœur de l'hiver témoigne de la faible épaisseur des glaces en rives et de l'absence d'un couvert de glace directement en amont du déversoir fixe et du déversoir à poutrelles. En fait, cette photographie illustre bien la gestion actuelle du barrage et les observations des gardiens selon lesquelles l'eau se déverse en crête des deux déversoirs pratiquement de façon ininterrompue en condition hivernale. Ainsi, l'écoulement d'une lame d'eau entre les déversoirs et le couvert de glace rend improbable le développement de la poussée statique des glaces.

Les forces dynamiques résultent de l'impact des glaces entraînées par le courant ou le vent. Au site du barrage Théodore, les conditions sont défavorables au développement de ces efforts. En effet, la présence d'un réservoir directement en amont du barrage suggère de faible valeur de courant. De plus, un étranglement à environ 800 mètres en amont du barrage réduit la largeur du lac à  $\pm 175$  mètres. Ainsi, un couvert de glace de dimension limitée pourrait potentiellement cheminer jusqu'au barrage si ce n'était des îles présentes dans cette section du lac qui contribuent à morceler les plaques de glace. Par ailleurs, la géométrie du lac en amont du barrage prend la forme d'un entonnoir, configuration propice au fractionnement de la glace.

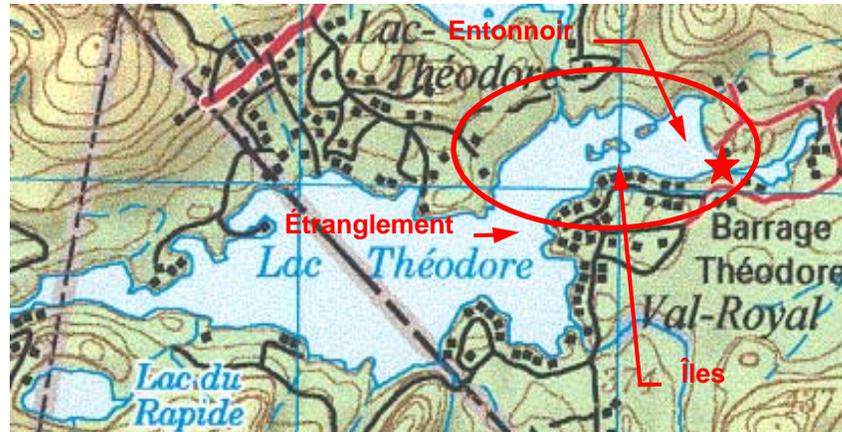


Figure 4-14 : Vue en plan générale du lac Théodore

En somme, les forces dynamiques sont théoriquement de faible intensité considérant que seul des blocs de petite taille pourraient heurter l'ouvrage et ce, avec une faible vitesse. Dès lors, ces efforts peuvent être présumés inférieurs aux poussées statiques des glaces.

Toutefois, malgré les conditions défavorables à la formation des efforts de glaces, les valeurs théoriques de poussées statiques présentées au tableau suivant seront intégrées à l'analyse de la stabilité du déversoir fixe et à celle du déversoir à poutrelles.

Tableau 4-14 : Charge d'expansion thermique de la glace selon l'ACB

Élément	Charge exercée
Pilier et déversoir de béton	150 kN/m
Poutrelles	30 kN/m

Advenant le cas où ces dernières engendreraient un non respect des critères de stabilité, la marge disponible pour les poussées des glaces sera déterminée et appréciée.

Forces sismiques ( $Q_h$  et  $Q_v$ )

D'un point de vue sismique, la réponse du barrage est évaluée à partir de la méthode pseudo-statique où les forces d'inertie sont estimées par le produit de la masse et d'un coefficient sismique constant. La vérification de la sécurité sismique de l'ouvrage s'effectue par l'entremise de deux analyses distinctes : une analyse de stabilité et une analyse de contraintes. La première, visant à évaluer le potentiel de glissement de l'ouvrage, utilise le coefficient de sismicité  $k$  de la carte du Règlement qui est présenté à la figure 4-6. La valeur de ce coefficient est égale à 50 % de l'accélération de pointe au rocher (APR).

La deuxième analyse, visant à déterminer la longueur d'une éventuelle fissure et les contraintes maximales de compression, s'effectue avec un coefficient sismique  $k$  égal à l'APR. Cette approche est généralement reconnue comme plus appropriée. À partir de la carte de la figure 4-6, on détermine que l'ouvrage à l'étude est situé dans une zone de sismicité 4 avec un coefficient  $k$  de 0,150g pour l'analyse de stabilité et de 0,300g pour l'analyse de contraintes.

Concernant les forces hydrodynamiques issues des mouvements de vibration des structures en contact avec l'eau et les sédiments, elles doivent être combinées aux pressions hydrostatiques initiales. Les forces hydrodynamiques sont calculées en utilisant le concept des masses ajoutées de Westergaard.

Enfin, puisque l'APR horizontale maximale ne se produira pas simultanément avec l'APR verticale maximale, la pratique courante veut que l'on réduise à 30 % les forces d'inertie et les forces hydrodynamiques agissant simultanément avec l'APR maximale dans une orientation. Comme le séisme peut se produire de l'amont vers l'aval ou de l'aval vers l'amont, l'analyse doit aussi être effectuée dans les deux directions. Les combinaisons de charges présentées à la section suivante prennent en compte ces deux aspects.

#### 4.5.2.3 Combinaisons de charges

Le tableau suivant résume toutes les combinaisons de charges considérées pour les sections d'analyse.

Tableau 4-15 : Combinaisons de charges considérées

N° Cas	Type	Description	D	H	U	S	I	Qh	Qv
Cas 1	Normale	Exploitation normale	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0
Cas 2	Normale	Crue 2 ans	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
Cas 3	Inhabituelle	Crue de sécurité	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,0	0,0
Cas 4	Extrême	Séisme horizontal max	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	1,0	0,3
Cas 5	Extrême	Séisme horizontal max	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	1,0	-0,3
Cas 6	Extrême	Séisme horizontal max	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	-1,0	0,3
Cas 7	Extrême	Séisme horizontal max	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	-1,0	-0,3

N° Cas	Type	Description	D	H	U	S	I	Qh	Qv
Cas 8	Extrême	Séisme vertical max	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,3	1,0
Cas 9	Extrême	Séisme vertical max	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	0,3	-1,0
Cas 10	Extrême	Séisme vertical max	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	-0,3	1,0
Cas 11	Extrême	Séisme vertical max	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0	-0,3	-1,0

Les combinaisons de charges normales sont celles qui sont liées à l'exploitation normale de l'ouvrage, été comme hiver. Elles sont fréquentes et ne doivent pas solliciter l'ouvrage au-delà du domaine élastique. En ce qui concerne les combinaisons de charges inhabituelles, elles peuvent se présenter occasionnellement et solliciter le barrage plus sévèrement que la normale. Enfin, les combinaisons extrêmes incluent les charges reliées aux séismes. Elles sont reliées à des événements improbables qui pourraient endommager l'ouvrage sans toutefois entraîner sa rupture.

#### 4.5.2.4 Facteurs de sécurité et critères de stabilité

L'analyse de stabilité a pour but de s'assurer que l'ouvrage respecte les facteurs de sécurité et les critères de stabilité établis pour les points suivants :

- Le renversement;
- Le glissement;
- Le soulèvement;
- Les contraintes permises dans le béton et dans la fondation.

Ces critères sont vérifiés pour toutes les combinaisons de charges énumérées précédemment. Les exigences à respecter sont présentées au tableau suivant.

Tableau 4-16 : Facteurs de sécurité et critères de stabilité

Indicateurs de performance	Combinaisons de charges		
	Normales	Inhabituelles	Extrêmes
<b>Contraintes - traction</b>			
Béton de masse	0,0	$0,50f_t$	$0,90f_t$
Joints de reprise	0,0	$0,50f_{ij}$	$0,90f_{ij}$
Contact béton-sol	0,0	0,0	0,0
Fondation	0,0	0,0	0,0
<b>Contraintes - compression</b>			
Béton de masse, joints	$0,33f_c$	$0,50f_c$	$0,90f_c$
Fondation	$< q_a$	$< q_a$	$< 1,33 q_a$
<b>Renversement</b>			
Position résultante	1/3 médian	1/2 médian	intérieur section
<b>Glissement</b>			
FSG <sub>p</sub>	3,00	2,00	1,30
FSG <sub>r</sub>	1,50	1,30	1,05
<b>Soulèvement</b>			
FSS	1,20	1,10	1,05

### Stabilité au renversement

La stabilité au renversement est vérifiée en calculant la position de la résultante de toutes les forces le long du plan d'analyse considéré, en fonction d'une condition de chargement donnée. La position de la résultante par rapport au point de rotation est déterminée par l'équation suivante :

$$\text{Position de la résultante} = \frac{\Sigma M}{\Sigma F_V}$$

Où :  $\Sigma M$  : Somme des moments

$\Sigma F_V$  : Somme des forces verticales

### Stabilité au glissement

La stabilité au glissement est vérifiée en comparant l'ensemble des efforts horizontaux qui sollicitent le barrage avec la résistance au cisaillement de l'interface analysée. La résistance au cisaillement combine le frottement et la cohésion lorsque la présence de cette dernière est justifiable. Il existe deux types de résistance au cisaillement : la résistance de pointe et la résistance résiduelle. Dès lors, le facteur de sécurité contre le glissement (FSG) peut être déterminé par l'équation suivante :

$$FSG = \frac{(\Sigma F_{V(-U)} \cos \alpha + \Sigma F_{h(-U)} \sin \alpha - U) \tan \phi + CA_C}{\Sigma F_{h(-U)} \cos \alpha - \Sigma F_{V(-U)} \sin \alpha}$$

Où :  $\Sigma F_{V(-U)}$  : Somme des forces verticales sans les sous-pressions

$\Sigma F_{h(-U)}$  : Somme des forces horizontales sans les sous-pressions

$U$  : Résultante des sous-pressions normales au plan

$\phi$  : Angle de friction

$C$  : Cohésion

$A_C$  : Aire de contact en compression

$\alpha$  : Angle d'inclinaison p/r à l'horizontale du plan de rupture

La formule générale précédente est utilisée pour prédire le comportement du barrage Théodore. Compte tenu de la nature des sols de fondation, uniquement la résistance résiduelle a été évaluée en ne mobilisant aucune cohésion. De plus, pour chacune des sections typiques présentées aux figures 4-11 et 4-12, deux plans d'analyse ont été considérés pour l'étude de la stabilité au glissement des structures globales par rapport à la fondation.

#### Stabilité au soulèvement

La stabilité au soulèvement est vérifiée en comparant la somme des forces verticales sans les sous-pressions à la résultante des sous-pressions. Le facteur de sécurité contre le soulèvement (FSS) est donc déterminé par l'équation suivante :

$$FSS = \frac{\Sigma F_{V(-U)}}{U}$$

Où :  $\Sigma F_{V(-U)}$  : Somme des forces verticales sans les sous-pressions

$U$  : Résultante des sous-pressions normales au plan

#### 4.5.2.5 Contraintes permises

Les critères de contraintes sont vérifiés pour le béton et la fondation du barrage. Il faut vérifier que les contraintes maximales admissibles en compression et en traction dans le béton sont inférieures ou égales aux valeurs du tableau 4-17. Pour les combinaisons de charges normales, la traction n'est pas permise dans le béton. Les contraintes de compression à la fondation doivent être inférieures à la contrainte admissible, sauf pour les combinaisons de charges extrêmes où les contraintes admissibles sont augmentées de 33 %. Les équations suivantes sont utilisées pour le calcul des contraintes de compression ( $\sigma_C$ ) et de tension ( $\sigma_T$ ) lorsque la résultante est située à l'intérieur du tiers médian :

$$\sigma_C = \frac{\Sigma F_V}{A_C} \left( 1 + \frac{6e}{L} \right) \qquad \sigma_T = \frac{\Sigma F_V}{A_C} \left( 1 - \frac{6e}{L} \right)$$

Dans le cas où la résultante est à l'extérieur de ce tiers médian, de la tension se développe à l'amont et l'on utilise plutôt la formule suivante pour la compression :

$$\sigma_c = \frac{2 \sum F_v}{3((L/2) - e)b}$$

Où :

$\sum F_v$  : Somme des forces verticales

$A_c$  : Aire de contact en compression de la section

$e$  : Excentricité de la résultante p/r au centre de la section

$L$  : Longueur de la base de la section

$b$  : Largeur de la base de la section

#### 4.5.2.6 Résultat de l'analyse

L'examen des résultats de l'analyse démontre le comportement satisfaisant du barrage Théodore. En effet, les facteurs de sécurité et les critères de stabilité sont respectés pour toutes les combinaisons de chargement susceptibles d'être observées. Les résultats obtenus dans le cadre de l'étude des deux sections d'analyse sont détaillés aux tableaux suivants.

Tableau 4-17 : Résultats de l'analyse de stabilité – Section d'analyse 1

Combinaisons de charges	N° cas	Position de la résultante	Glissement 1	Glissement 2	Soulèvement
<b>Normales</b>		<b>1/3 médian</b>	<b>&gt;1,50</b>	<b>&gt;1,50</b>	<b>&gt;1,20</b>
Exploitation normale * (Glace max. = 17 kN/m)	Cas 1	1/3 médian	12,96	1,77	2,72
Crue (1 : 2 ans)	Cas 2	1/3 médian	Aucun Glissement	2,31	2,40
<b>Inhabituelles</b>		<b>1/2 médian</b>	<b>&gt;1,30</b>	<b>&gt;1,30</b>	<b>&gt;1,10</b>
Crue de sécurité (1 : 1000 ans)	Cas 3	1/3 médian	Aucun Glissement	2,11	1,78
<b>Extrêmes</b>		<b>Intérieur section</b>	<b>&gt;1,05</b>	<b>&gt;1,05</b>	<b>&gt;1,05</b>
Séisme maximum	Cas 4 à Cas 11	1/3 médian	3,42	1,14	2,47

Remarques :

\* Une poussée statique des glaces égale à 17 kN/m correspond à la valeur maximale permettant le respect de l'ensemble des facteurs de sécurité et des critères de stabilité.

Tableau 4-18 : Résultats de l'analyse de stabilité - Section d'analyse 2

Combinaisons de charges	N° cas	Position de la résultante	Glissement 1	Glissement 2	Soulèvement
<b>Normales</b>		<b>1/3 médian</b>	<b>&gt;1,50</b>	<b>&gt;1,50</b>	<b>&gt;1,20</b>
Exploitation normale * (Glace max. = 62 kN)	Cas 1	<b>1/3 médian</b>	8,33	1,69	2,98
Crue (1 : 2 ans)	Cas 2	<b>1/3 médian</b>	Aucun Glissement	3,13	2,59
<b>Inhabituelles</b>		<b>1/2 médian</b>	<b>&gt;1,30</b>	<b>&gt;1,30</b>	<b>&gt;1,10</b>
Crue de sécurité (1 : 1000 ans)	Cas 3	<b>1/3 médian</b>	Aucun Glissement	2,93	1,86
<b>Extrêmes</b>		<b>Intérieur section</b>	<b>&gt;1,05</b>	<b>&gt;1,05</b>	<b>&gt;1,05</b>
Séisme maximum	Cas 4 à Cas 11	<b>1/3 médian</b>	3,95	1,23	2,70

Remarques :

\* Une poussée statique des glaces égale à 62 kN correspond à la valeur maximale permettant le respect de l'ensemble des facteurs de sécurité et des critères de stabilité.

Tableau 4-19 : Résultats de l'analyse de contraintes - Section d'analyse 1

Combinaisons de charges	N° cas	Contraintes amont		Contraintes aval	
		Fondation (kPa)	Béton (kPa)	Fondation (kPa)	Béton (kPa)
<b>Normales</b>		<b>&gt; 0 et &lt; 250</b>	<b>&gt; 0 et &lt; 9900</b>	<b>&gt; 0 et &lt; 250</b>	<b>&gt; 0 et &lt; 9900</b>
Exploitation normale * (Glace max. = 17 kN/m)	Cas 1	0	0	47	47
Crue (1 : 2 ans)	Cas 2	23	23	24	24
<b>Inhabituelles</b>		<b>&gt; 0 et &lt; 250</b>	<b>&gt; -1500 et &lt; 15000</b>	<b>&gt; 0 et &lt; 250</b>	<b>&gt; -1500 et &lt; 15000</b>
Crue de sécurité (1 : 1000 ans)	Cas 3	14	14	28	28
<b>Extrêmes</b>		<b>&gt; 0 et &lt; 333</b>	<b>&gt; -2700 et &lt; 27000</b>	<b>&gt; 0 et &lt; 333</b>	<b>&gt; -2700 et &lt; 27000</b>
Séisme maximum	Cas 4 à Cas 11	9 (Min.) 44 (Max.)	9 (Min.) 44 (Max.)	38 (Max.) 6 (Min.)	38 (Max.) 6 (Min.)

Remarques :

\* Une poussée statique des glaces égale à 17 kN/m correspond à la valeur maximale permettant le respect de l'ensemble des facteurs de sécurité et des critères de stabilité.

Tableau 4-20 : Résultats de l'analyse de contraintes - Section d'analyse 2

Combinaisons de charges	N° cas	Contraintes amont		Contraintes aval	
		Fondation (kPa)	Béton (kPa)	Fondation (kPa)	Béton (kPa)
<b>Normales</b>		> 0 et < 250	> 0 et < 9900	> 0 et < 250	> 0 et < 9900
Exploitation normale * (Glace max. = 62 kN)	Cas 1	0	0	54	54
Crue (1 : 2 ans)	Cas 2	35	35	17	17
<b>Inhabituelles</b>		> 0 et < 250	> -1500 et < 15000	> 0 et < 250	> -1500 et < 15000
Crue de sécurité (1 : 1000 ans)	Cas 3	26	26	20	20
<b>Extrêmes</b>		> 0 et < 333	> -2700 et < 27000	> 0 et < 333	> -2700 et < 27000
Séisme maximum	Cas 4 à Cas 11	7 (Min.) 59 (Max.)	7 (Min.) 59 (Max.)	46 (Max.) 0 (Min.)	46 (Max.) -2 (Min.)

Remarques :

\* Une poussée statique des glaces égale à 62 kN correspond à la valeur maximale permettant le respect de l'ensemble des facteurs de sécurité et des critères de stabilité.

Dans un premier temps, l'analyse de stabilité révèle que la position de la résultante demeure, pour tous les cas de chargement des deux sections d'analyse, dans le tiers médian du plan étudié. Ainsi, les déversoirs agissent en compression et aucune propagation de fissure (zone de traction) n'est observée. Par ailleurs, tous les facteurs de sécurité au glissement sont respectés. Comparativement aux indicateurs de performance relatif au plan d'analyse (glissement 2), ceux associés au plan d'analyse (glissement 1) sont rencontrés dans une plus grande mesure. Après justification, un effort de butée aurait possiblement pu être considéré, ce qui aurait contribué à augmenter la résistance au glissement au plan d'analyse (glissement 2). Toutefois, la démonstration de la présence d'une poussée passive des terres inaltérables n'est pas requise pour satisfaire tous les critères de sécurité. Enfin, le soulèvement le plus important survient en crue de sécurité et il peut s'expliquer par la présence d'un imposant radier continu combiné aux niveaux d'eau élevés à l'amont et à l'aval. Le facteur de sécurité minimum de 1,78 demeure néanmoins supérieur à la limite de 1,10.

Par la suite, l'analyse des contraintes expose, à une exemption près, que les déversoirs induisent à la fondation seulement des contraintes de compression sans générer de fissures au niveau des plans d'analyse. La contrainte de compression maximale observée, dont la valeur est égale à 59 kPa, survient lors d'une exploitation en condition extrême. Par ailleurs, la

combinaison de charges extrêmes (cas 5) de la section d'analyse 2 constitue un cas particulier. En effet, la position de la résultante de cette combinaison relative au séisme se trouve tout juste à l'extérieur du tiers médian du plan analysé, soit à 67,9 %. Ainsi, de faibles contraintes de tension de l'ordre de 2 kPa sont induites dans le béton. Dès lors, comme les valeurs de contraintes de compression et celles de tension sont significativement inférieures aux contraintes admissibles de la fondation et du béton, cette analyse n'est pas considérée critique pour les deux sections d'analyse.

En outre, la gestion de l'ouvrage explique que certains indicateurs de performance soient moins élevés en exploitation normale qu'en crue de sécurité. Puisque les poutrelles sont complètement enlevées en crue de sécurité, les pressions hydrostatiques s'en trouvent réduites et celles qui subsistent à l'amont sont, en majeure partie, équilibrées par celles à l'aval.

Par ailleurs, la stabilité des deux sections d'analyse est conditionnelle à une limitation des efforts de glace. En effet, les poussées des glaces maximales auxquelles peuvent résister les structures déversantes sont estimées à 17 kN/m pour le déversoir fixe et à 62 kN pour le déversoir à poutrelles. À partir de l'ensemble des valeurs obtenues, une épaisseur de glace maximale peut être tirée des équations développées par Carter à la suite d'un programme systématique de mesures parrainé par Hydro-Québec. Ainsi, l'épaisseur maximale du couvert de glace assurant la stabilité globale des déversoirs est évaluée à 165 mm. Comme discuté dans la section de la revue des charges, les conditions au site de l'ouvrage confirment le faible potentiel de formation des efforts de glace. En conséquence, les valeurs limites de poussée des glaces obtenues pour les deux sections d'analyse constituent une réserve de charges confortable considérant l'ensemble des observations hivernales et la gestion actuelle du barrage.

En résumé, abstraction faite de l'état des structures et des fondations, la stabilité théorique globale du déversoir fixe et celle du déversoir à poutrelles peuvent être démontrées et ce, considérant une réserve de charges se traduisant par un couvert de glace s'appuyant sur l'ouvrage d'une épaisseur limitée à 165 mm.

#### 4.5.3 Culée

La stabilité des murs de soutènement composant les culées de l'ouvrage a été étudiée. Pour ce faire, les coupes des culées présentées au plan de construction de 1964 combinées aux plans de rehaussement de la revanche datés de 2001 ont été consultés. Aux fins de l'analyse, quelques sections critiques de largeur unitaire ont été déterminées et leur stabilité a été vérifiée suivant une méthodologie similaire à celle présentée précédemment pour l'étude des déversoirs.

L'examen des plans expose la géométrie non conventionnelle des murs de soutènement. En effet, les culées sont constituées de murs poids dépourvus de semelle. Bien que cette conception ne soit pas usuelle de nos jours, le comportement convenable de telles structures est possible. D'ailleurs, les résultats de l'analyse exposent que globalement, la stabilité au glissement des murs de soutènement est assurée considérant la contribution d'une pression passive des terres. Toutefois, la mobilisation de cet effort est discutable compte tenu des pentes, du potentiel d'érosion et des niveaux variables des remblais agissant comme butée. Par ailleurs, l'appréciation des proportions des murs de culée permet de juger de la faible épaisseur de leur base par rapport à leur hauteur. Comme ce profil contribue à la grande sensibilité de la réponse des murs relativement au renversement et que l'amplitude de certains efforts appliqués peut être grande, la stabilité au renversement des culées demeure hypothétique. De plus, l'inclinaison de l'interface béton-fondation de certaine section de murs handicape leur stabilité au glissement en plus d'engendrer l'instabilité au renversement si aucun effort de traction n'est développé entre le mur de béton et la fondation.

En somme, au regard de cette discussion, le comportement sécuritaire des culées gauche et droite ne peut pas être clairement démontré bien qu'aucun indice ou observation ne laisse présager de désordres structuraux au moment de cette étude.

## 5 CONCLUSIONS

### 5.1 Sécurité structurale et fonctionnelle

Le barrage Théodore, âgé de 44 ans, semble se comporter de façon satisfaisante. En effet, l'ouvrage évacue la crue de sécurité avec une revanche suffisante. Par ailleurs, l'analyse de la stabilité démontre que l'ouvrage en béton armé demeure théoriquement stable pour l'ensemble des cas étudiés dont ceux relatifs à la crue de sécurité et au séisme. Toutefois, cette analyse néglige certains désordres pouvant nuire à son intégrité structurale et à sa sécurité. Notamment, les incertitudes relatives à l'état de la fondation, les pertes de section causées par l'érosion ainsi que l'affouillement potentiellement délétère pour la structure principale n'ont pas été considérés dans les calculs de stabilité. De plus, bien qu'aucun signe de déstructuration n'a été observé relativement aux murs de soutènement gauche et droit, leur stabilité demeure difficile à démontrer explicitement, considérant leur géométrie non conventionnelle et la contribution d'une poussée passive des terres qui reste discutable. Or, à la suite de certains travaux correctifs, les proportions actuelles du barrage pourraient permettre d'assurer sa stabilité.

En somme, à la suite de notre analyse de l'état et du comportement du barrage Théodore ainsi que de la revue de sa conception, on peut conclure qu'au regard des règles de l'art et des normes minimales de sécurité de la Loi sur la sécurité des barrages et du Règlement sur la sécurité des barrages, la sécurité structurale et fonctionnelle de l'ouvrage n'est pas assurée si aucun travail d'entretien majeur n'est réalisé.

### 5.2 Niveau des conséquences et classement de l'ouvrage

Conformément au Règlement, le barrage Théodore fait l'objet d'un classement en fonction des risques qu'il présente pour les personnes et les biens. Cette classification est établie en considérant la vulnérabilité et les conséquences d'une rupture de l'ouvrage. Chaque section du barrage est d'abord classée individuellement et le classement final de l'ouvrage correspond à la classe de la section qui a obtenu le niveau de conséquence le plus défavorable.

Suivant les résultats de l'analyse de rupture du barrage Théodore, le niveau des conséquences « moyen » est maintenu. Toutefois, l'ajout d'une section correspondant à l'aile droite ainsi que les modifications de certains paramètres physiques constants et variables contribuent à modifier le classement de l'ouvrage. Brièvement, l'état de la section de type béton-gravité est maintenant considéré « acceptable » et celui de l'aile droite est établi à « très bon ». Par ailleurs, la fiabilité des appareils d'évacuation demeure « adéquate ». Ainsi, le classement actuel « D » est révisé à « C ».

Le tableau suivant résume la révision du classement actuel alors que la nouvelle fiche de classement et se retrouve à l'annexe 5.

Tableau 5-1: Modification du classement au barrage Théodore

<b>Section</b>	<b>Classement actuel</b>	<b>Classement révisé</b>
Aile droite	Non considérée	C
Partie centrale	D	C
Global	D	C

### 5.3 Révision du plan de gestion des eaux retenues

Comme mentionné à l'article 34 du Règlement sur la sécurité des barrages, un plan de gestion des eaux retenues doit être effectué pour tout barrage à l'exception de ceux de classe E. Le plan de gestion des eaux retenues par le barrage Théodore est donc requis et a été révisé dans le cadre de la présente étude. Un sommaire de ce plan est présenté à l'annexe 6.

### 5.4 Révision du plan de mesures d'urgence

Le niveau des conséquences du barrage Théodore est « moyen ». Selon l'article 40 du Règlement sur la sécurité des barrages, tous les barrages ayant un niveau des conséquences égal ou supérieur à « moyen » doivent avoir un plan des mesures d'urgence. Le plan de mesures d'urgence du barrage Théodore est donc requis et a été révisé dans le cadre de la présente étude et sera transmis aux intervenants concernés.

## 6 RECOMMANDATIONS

Les sections suivantes présentent certaines recommandations visant à assurer la sécurité structurale et fonctionnelle du barrage et à éviter sa détérioration accélérée.

### 6.1 Relatives à la sécurité

#### 6.1.1 Travaux d'entretien majeurs

Le barrage Théodore permet le maintien des niveaux d'eau du lac Théodore à des fins récréatives et de villégiature. Dans le but de poursuivre cet usage, des travaux doivent être entrepris pour assurer la conformité du barrage aux règles de l'art et aux normes minimales de sécurité prescrites par la Loi sur la sécurité des barrages (L.R.Q., c. S-3.1.01) et son Règlement sur la sécurité des barrages (S-3.1.01, r.1). Bien que jusqu'à présent le comportement de l'ouvrage soit satisfaisant, ces travaux devraient être réalisés à moyen terme, et ce, considérant le niveau des conséquences du barrage jugé « moyen ».

Les principaux travaux correctifs devant être réalisés seraient les suivants :

- améliorer la stabilité des murs de soutènement des culées droite et gauche;
- corriger l'affouillement sous les dalles en aval du déversoir fixe et sous le radier aval du déversoir à poutrelles;
- confirmer le caractère non érodable de la rive gauche.

D'une part, les murs de soutènement amont et aval des culées pourraient être stabilisés par la mise en place de matériaux offrant une butée structurale suffisante et durable. Un enrochement adéquat pourrait d'autant plus protéger la rive contre l'érosion. D'autre part, l'affouillement observé sous les dalles et le radier des déversoirs pourrait être corrigé par l'intervention de techniques d'injections permettant de combler les vides préjudiciables. Comme alternative à cette solution, les dalles et le radier en aval des déversoirs, dont le rôle n'est pas structural, pourraient complètement être remplacés par un enrochement adéquat et ce, parallèlement aux travaux de stabilisation des murs de soutènement. Par ailleurs, dans le cadre des travaux d'entretien majeurs, le caractère non érodable de la rive gauche devra être confirmé.

En résumé, la réalisation de ces travaux d'entretien majeurs, assurera la sécurité du barrage Théodore. Toutefois, lors de la réhabilitation de l'ouvrage, une attention particulière devra être portée à la fondation des structures principales des deux déversoirs. En effet, comme des mouvements différentiels sont observables entre les plots du déversoir fixe et que de l'affouillement important a été noté à l'aval du barrage, une validation des compétences des

fondations sur lesquels repose l'ouvrage devrait être effectuée. Ainsi, les travaux d'entretien majeurs devront prendre en considération les qualités suspectes de la fondation des structures principales.

### 6.1.2 Sécurité du public

Afin de restreindre l'accès au barrage, nous recommandons d'installer une barrière au début du chemin d'accès. L'installation de la barrière devra se faire en collaboration avec le propriétaire des lieux, art 53-54, afin de permettre le passage du propriétaire tout en limitant l'accès au public. Un quai orphelin n'appartenant pas au propriétaire des lieux a été aperçu à l'amont de la digue droite à proximité des déversoirs à poutrelles. Nous recommandons que celui-ci soit retiré pour assurer la sécurité des usagers et éviter qu'il se retrouve coincer dans les déversoirs.

## 6.2 Relatives à la maintenance

### 6.2.1 Entretien

Le barrage Théodore présente certaines détériorations et problématiques qui ne mettent pas directement en cause la stabilité de l'ouvrage mais qui peuvent nuire à sa pérennité ou constituer un risque d'accident. Afin de parer à de telles éventualités, nous recommandons la réalisation des travaux d'entretien présentés dans le Registre des demandes d'intervention préparé par le CEHQ relativement au gardiennage (catégorie D-3), au contrôle de la végétation (catégorie D-4) et à l'entretien et restauration des barrages et ouvrages connexes (catégorie G). Ces interventions sont détaillées à l'annexe 7.

De plus, des activités d'entretien supplémentaires devraient être entreprises. En effet, les fissures, les cavités, les zones d'éclatement et l'érosion repérés lors de l'inspection sous-marine, dont les détails sont présentés à l'annexe 3, devraient être réparées avec diligence selon leur importance.

Nous recommandons également que l'ensemble des activités relatives à la maintenance soit réalisé de concert avec les travaux d'entretien majeurs.

### 6.2.2 Surveillance

Le programme de surveillance du barrage Théodore doit se poursuivre conformément au Règlement et aux encadrements administratifs en vigueur au CEHQ. La fréquence et la nature des inspections doivent être rectifiées étant donné le changement de classe D à classe C. Lors des inspections, une attention particulière devrait être portée aux éléments qui figurent au Registre de la surveillance préparé par le CEHQ et présenté à l'annexe 7.

De plus, malgré les justifications relatives à l'absence d'un couvert de glace, nous recommandons que les inspections hivernales ultérieures intègrent un suivi permettant de s'assurer que l'épaisseur des glaces s'appuyant potentiellement sur le barrage soit toujours inférieure à 165 mm. Dans le cas contraire, des activités de morcellement du couvert de glace directement en amont de l'ouvrage devraient être entreprises.

**RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

1. ASSOCIATION CANADIENNE DES BARRAGES. 2007. *Recommandations de sécurité des barrages*.
2. BOBÉE, Bernard, FORTIN, Vincent, PERREAULT, Luc et PERRON, Hugues, 1999. *Hyfran 1.1, logiciel hydrologique : Chaire en hydrologie statistique CRNSG/Hydro-Québec/Alcan, INRS-Eau, Université du Québec, Québec*.
3. BOWLES, Joseph E., 1996. *Foundation Analysis and Design*, Fifth Edition, McGraw Hill Companies Inc. ISBN 978-0-07-912247-6, 1175 pages.
4. CANADIAN GEOTECHNICAL SOCIETY. 2006. *Canadian Foundation Engineering Manual*, Fourth Edition, Richmond, B.C., Canada, BiTech Publisher Ltd., ISBN 0-920505-28-7, 488 pages.
5. CEDERGREN, Harry R., 1989. *Seepage, Drainage, and Flow Nets*, Third Edition, Wiley, ISBN 047118053X, 496 pages.
6. FEDERAL ENERGY REGULATION COMMISSION (FERC), 1997. *Engineering Guidelines for Evaluation of Hydropower Projects – Chapter 3 Gravity Dams, Chapter 10 Other Dams*.
7. FREAD, D.L., 1998. *NWS FLDWAV model: Theoretical description*, Hydrologic Research Laboratory, Office of hydrology, National Weather Service (NWS), NOAA, Silver Spring, Maryland.
8. Groupe conseil Génivar. 2003. *Étude de réévaluation de la sécurité du barrage Théodore – X0004974*.
9. HOLTZ, Robert D. et William D. KOVACS, 1991. *Introduction à la géotechnique*, Éditions de l'École Polytechnique de Montréal, Canada, ISBN 2-553-00222-3, 808 pages.
10. ICOLD EUROPEAN CLUB. 2004. *Working Group on Sliding Safety of Existing Gravity Dams*.
11. INRS-ETE, 2002. *Analyse fréquentielle locale et régionale et cartographie des crues au Québec*, 268 pages.
12. LEWIS, J.M., 1998. *NWS FLDWAV model: User documentation*, Hydrologic Research Laboratory, Office of hydrology, National Weather Service (NWS), NOAA, Silver Spring, Maryland.

13. MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC, 2003. *Cahier des charges et devis généraux* : infrastructures routières : construction et réparation. Les Publications du Québec, ISBN 2-551-19602-7.
14. MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC, 1995. *Manuel de conception des ponceaux*, chapitre 3, hydrologie.
15. SMITH, C.M. *Hydraulic Structures*, University of Saskatchewan, 1995
16. SOCIÉTÉ D'ÉNERGIE DE LA BAIE-JAMES, 1997. *Dimensionnement du riprap*, Chapitre 4, Conception
17. QUÉBEC. *Loi sur la sécurité des barrages : LRQ, chapitre S-3.1.01, à jour au 1<sup>er</sup> août 2008*, [Québec], Éditeur officiel du Québec.
18. QUÉBEC. *Règlement adopté en vertu de la Loi sur la sécurité des barrages, c. S-3.1.01, r.1, à jour au 30 juillet 2008*, [Québec], Éditeur officiel du Québec.
19. VAN DIEM HOANG, 1977. *H.P-40 : Méthode d'estimation des débits journaliers de crue printanière des rivières du Québec méridional*, Gouvernement du Québec, Québec.

## **ANNEXES**



**ANNEXE 1 – « INFORMATIONS RELATIVES À LA SURVEILLANCE DES  
OUVRAGES » ET « ÉTAT DES OUVRAGES » (EXTRAIT DE L'ÉTUDE DU GROUPE CONSEIL  
GÉNIVAR - NOVEMBRE 2003)**



## **ANNEXE 2 – INSPECTION STATUTAIRE DU 23 JUILLET 2007**



## **ANNEXE 3 – INSPECTION SOUS-MARINE (AOÛT 2008)**



## **ANNEXE 4 – CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES**

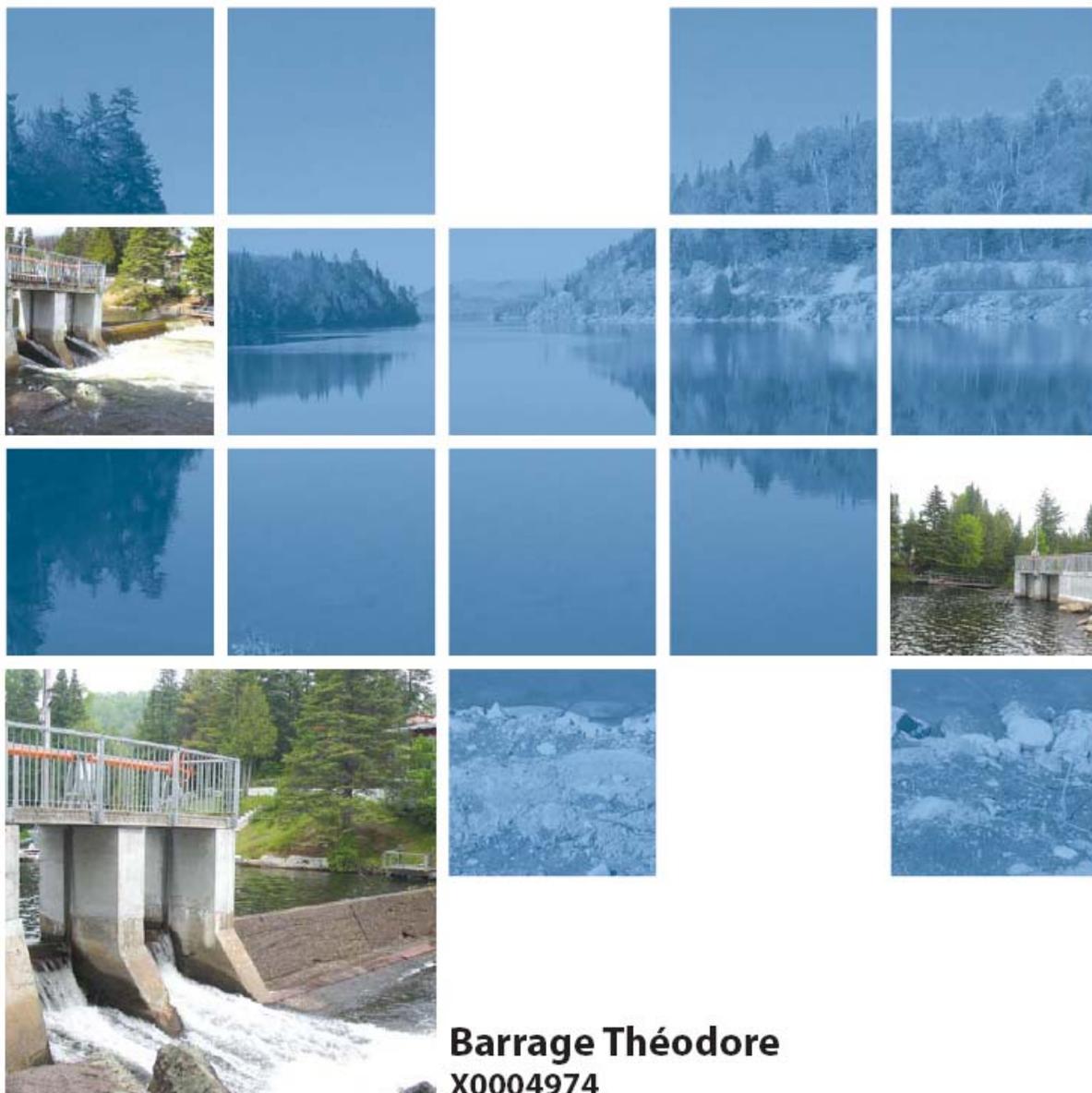


## **ANNEXE 5 – RÉVISION DU CLASSEMENT**



## **ANNEXE 6 – PLAN DE GESTION DES EAUX RETENUES**





**Barrage Théodore**  
X0004974

# Plan de gestion des eaux retenues



## TABLE DES MATIÈRES

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>LOCALISATION ET CARACTÉRISTIQUES DU BARRAGE</b> .....	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>GESTION DU BARRAGE THÉODORE</b> .....	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>CRUE DE SÉCURITÉ</b> .....	<b>9</b>
<b>5</b>	<b>EXPLOITATION DES EAUX DU LAC THÉODORE</b> .....	<b>10</b>
<b>5.1</b>	<b>Conditions d’exploitation</b> .....	<b>10</b>
<b>5.2</b>	<b>Contraintes d’exploitation</b> .....	<b>10</b>
<b>5.3</b>	<b>Cote de débordement du lac</b> .....	<b>11</b>
<b>5.4</b>	<b>Seuils d’inondation</b> .....	<b>11</b>
<b>5.5</b>	<b>Gestion des crues</b> .....	<b>11</b>
<b>5.6</b>	<b>Stratégie de communication</b> .....	<b>11</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>13</b>
<b>7</b>	<b>RÉFÉRENCES</b> .....	<b>14</b>
	<b>FIGURE 2.1 : BARRAGE THÉODORE - BASSIN VERSANT</b> .....	<b>3</b>
	<b>FIGURE 2.2 : BARRAGE THÉODORE - VUE DE L’AVAL</b> .....	<b>5</b>
	<b>TABLEAU 4.1 : CRUE DE SÉCURITÉ ET NIVEAU CORRESPONDANT</b> .....	<b>9</b>
	<b>TABLEAU 5. 1 : CONTRAINTES D’EXPLOITATION - LAC THÉODORE</b> .....	<b>10</b>



## 1 INTRODUCTION

Le barrage Théodore, qui appartient au gouvernement du Québec, est géré par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). Le CEHQ est une agence du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs dont le mandat consiste à gérer le régime hydrique du Québec en se préoccupant constamment de sécurité, d'équité et de développement durable. Dans le cadre de sa mission, le CEHQ a la responsabilité d'assurer la gestion, l'entretien et la surveillance de quelques 800 barrages publics répartis dans toute la province de Québec. Pour s'assurer que ces barrages répondent aux exigences les plus sévères en termes de sécurité, le CEHQ compte sur une équipe multidisciplinaire et sur la collaboration des centres de services établis dans plusieurs régions du Québec. De plus, il exploite un réseau de 250 stations de mesures de niveaux et de débits à travers le Québec dont plusieurs transmettent en temps réel l'information nécessaire à la gestion sécuritaire de ces ouvrages.

Depuis près de 30 ans, le CEHQ dispose d'un programme intégré de sécurité pour ses barrages qui permet d'assurer que ces ouvrages sont bien conçus, bien entretenus et bien gérés. En outre, le CEHQ a une équipe d'ingénieurs de garde qui effectue, 24 heures sur 24, 7 jours sur 7, le suivi des barrages nécessitant une gestion quotidienne.

Le barrage Théodore compte parmi les quelques 800 barrages publics du gouvernement du Québec gérés par le CEHQ et permet le maintien d'un plan d'eau pour la villégiature et la faune (annexe A). Le barrage Théodore fait l'objet d'une gestion quotidienne.

Le présent document constitue un sommaire du plan de gestion des eaux retenues par le barrage Théodore comme l'exigent la *Loi sur la sécurité des barrages* et son règlement. Il résume les mesures que doit prendre le propriétaire pour gérer d'une façon sécuritaire les eaux retenues par son barrage en période normale et en période de crue, notamment dans des situations susceptibles de compromettre la sécurité des personnes et des biens en amont ou en aval du barrage.

## **2 LOCALISATION ET CARACTÉRISTIQUES DU BARRAGE**

Le barrage Théodore a été érigé en 1964. Il est situé à l'extrémité aval du lac Théodore, dans la municipalité de Val-Morin laquelle fait partie de la MRC Les Laurentides (figure 2.1). Il s'agit d'un ouvrage constitué d'une section de type béton-gravité d'une hauteur de 3,70 m et d'une longueur de 36,47 m ainsi que d'une aile droite en terre d'une hauteur de 1,78 m et d'une longueur de 16,0 m. Les débits sont contrôlés par deux déversoirs à poutrelles et par un déversoir fixe d'une longueur de 1,83 m et 19,20 m, respectivement (photo 2.1). La figure 2.2 montre une coupe longitudinale du barrage vue de l'aval.



**Photo 2.1 : Barrage Théodore - Vue aval**

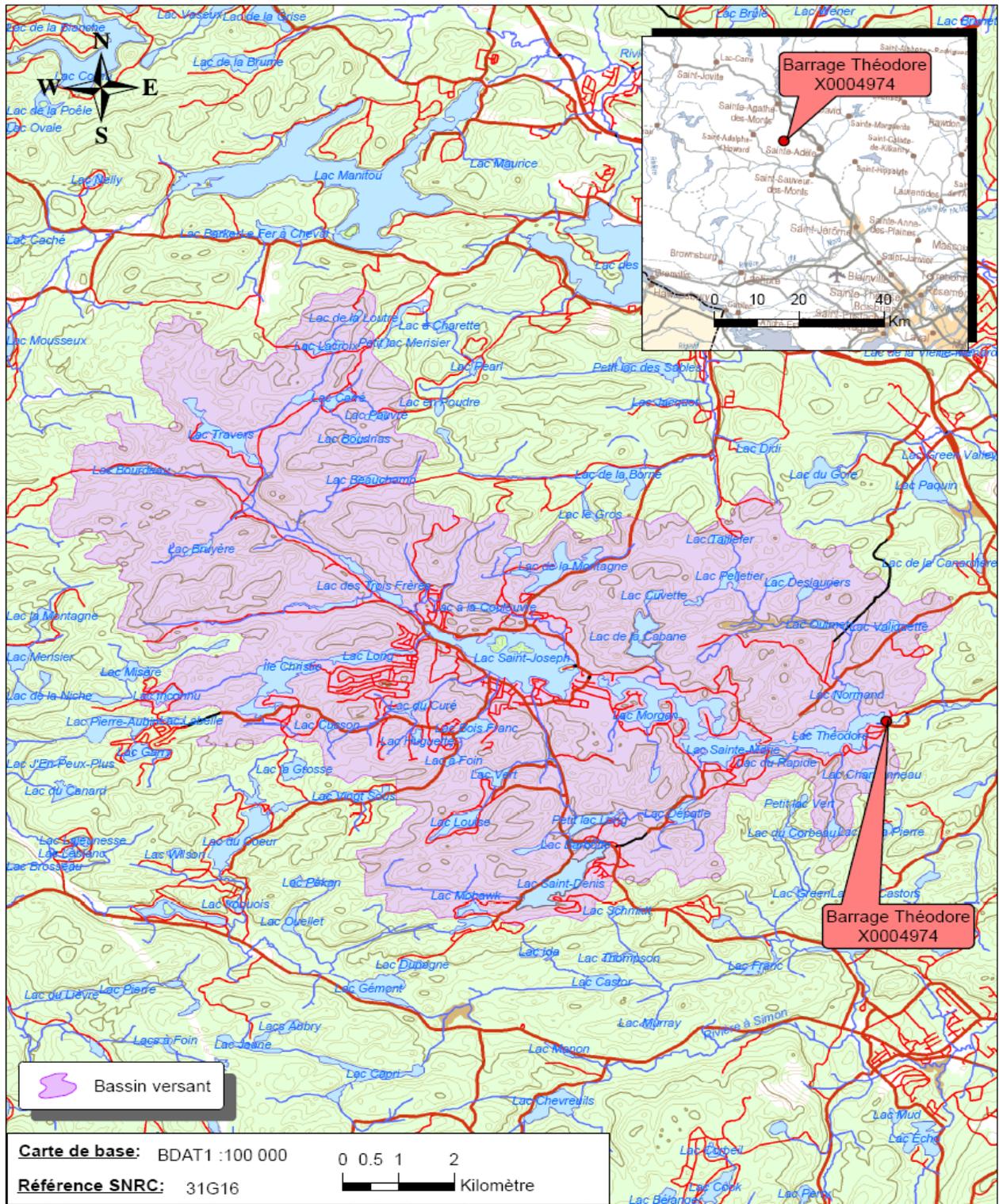


Figure 2.1 : Barrage Théodore - Bassin versant



**Figure 2.2 : Barrage Théodore - Vue de l'aval**



### 3 GESTION DU BARRAGE THÉODORE

La gestion des eaux retenues par le barrage Théodore est effectuée quotidiennement pour assurer la sécurité des personnes et des biens qui se trouvent en amont et en aval de cet ouvrage. Pour analyser et caractériser les conditions hydrologiques qui prévalent dans le bassin versant du barrage Théodore, le CEHQ utilise des données provenant de lignes à neige, de la station de niveau n° 040109, de la station de précipitations et de température n° 7032362. Les données de ces stations sont recueillies, en temps réel, selon un pas de temps d'une heure par modem téléphonique. La cueillette de cette information est réalisée par un système informatisé complexe en activité 24 heures sur 24, 7 jours sur 7. Il est d'ailleurs possible de consulter les données de certaines de ces stations de mesures via le site Internet du CEHQ à l'adresse suivante : <http://www.cehq.gouv.qc.ca/>

De plus, un suivi des conditions météorologiques est réalisé en continu sur le bassin versant du barrage Théodore. Le CEHQ a une entente contractuelle avec Environnement Canada pour obtenir des prévisions météorologiques, recevoir des alertes, des avertissements ou des bulletins de veilles météorologiques. De plus, en vertu de cette entente, le CEHQ bénéficie du soutien constant (24 heures sur 24, 7 jours sur 7) des météorologues d'Environnement Canada pour toute information complémentaire aux bulletins qu'il a déjà reçus. En outre, le CEHQ procède à des analyses météorologiques comparatives à chaque jour à partir des résultats de modèles météorologiques américains. Depuis 2003, il exploite également des systèmes informatiques de prévisions hydrologiques dans le but d'accroître la quantité et la qualité de l'information disponible pour prendre des décisions éclairées concernant la gestion des barrages situés sur la rivière du Nord. Durant la période de crue printanière, le CEHQ produit à tous les matins pour la rivière du Nord, une prévision principale pour une période relativement courte (un à six jours) basée sur la prévision météorologique d'Environnement Canada. Il est possible de consulter les résultats de la prévision hydrologique du bassin versant de la Du Nord via le site Internet du CEHQ à l'adresse <http://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/prevision>

La gestion quotidienne des eaux du barrage Théodore est effectuée par une équipe de cinq ingénieurs, spécialisés dans l'exploitation des barrages, basée à Québec, qui assure en continu, 24 heures sur 24, 7 jours sur 7, la surveillance du niveau du réservoir Théodore, des précipitations enregistrées et des prévisions météorologiques. Cette équipe a toute la latitude de prendre les décisions qui s'imposent et, au besoin, de déclencher les plans de mesures d'urgence. En outre, du personnel technique peut intervenir sur demande en tout temps à partir du centre de services de Mont-Laurier localisé à environ 125 km du barrage Théodore. Toutefois, les opérations au barrage

Théodore sont habituellement assurées par un gardien de barrage contractuel demeurant dans la région immédiate de l'ensemble des neufs barrages de la rivière du Nord appartenant au CEHQ.

#### 4 CRUE DE SÉCURITÉ

La crue de sécurité est celle qu'un barrage est en mesure de supporter dans des conditions exceptionnelles, tout en fonctionnant de façon sécuritaire. Quelques dommages au barrage et une réduction des coefficients de sécurité, jusqu'à la limite théorique de la rupture, sont acceptés.

Le point le plus bas de la crête de l'aile droite du barrage Théodore est à la cote 368,00 m, ce qui assurera une revanche de 70 cm. Par conséquent, le barrage possède actuellement une revanche de sécurité adéquate par rapport au niveau atteint au passage de la crue de sécurité 1 : 1000 ans, lequel est estimé à 367,30 m. La crue de sécurité du barrage Théodore et le niveau lors de son évacuation par le barrage sont indiqués au tableau 4.1.

**Tableau 4.1 : Crue de sécurité et niveau correspondant**

<b>Débit de crue entrant (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Niveau (m)</b>
77,5	367,30

## 5 EXPLOITATION DES EAUX DU LAC THÉODORE

### 5.1 Conditions d'exploitation

Cinq ingénieurs du CEHQ, qui effectuent à tour de rôle un suivi des conditions météorologiques, des débits et des niveaux dans le lac Théodore, assurent la gestion quotidienne des eaux du lac Théodore. Lorsque l'ingénieur de garde juge que des manœuvres à l'aide des appareils d'évacuation ou d'autres interventions au barrage sont nécessaires, il communique avec le personnel technique du centre de services Mont-Laurier pour lui donner les instructions appropriées. Ce centre est situé à environ 125 km au nord-ouest du barrage Théodore. Le barrage Théodore peut également être opéré au besoin par des ressources basées aux centres de services de Choinière et de Québec. L'ingénieur de garde dispose des outils nécessaires pour assurer une surveillance du barrage 24 heures sur 24, 7 jours sur 7. Par ailleurs, en dehors des heures ouvrables du centre de services, il est possible de communiquer en tout temps avec le personnel technique.

### 5.2 Contraintes d'exploitation

Le tableau 5.1 présente un résumé des contraintes d'exploitation relatives à la gestion des niveaux d'eau du lac Théodore en période normale et en période de crue. L'annexe B présente les définitions de chacun des critères utilisés.

**Tableau 5.1 : Contraintes d'exploitation - Lac Théodore**

<b>Critère</b>	
Niveau de vidange moyen du réservoir	365,86 m
Niveau normal d'exploitation	365,96 m
<b>Niveau maximal d'exploitation</b>	<b>366,06 m</b>

Au cours de la période estivale, le niveau du lac Théodore est maintenu à son niveau normal d'exploitation, et ce, afin de répondre aux besoins des villégiateurs. Au début du mois de mars, le niveau du lac est abaissé aux environs de 365,86 m. En mars, les pertuis à poutrelles sont ouverts progressivement au fur et à mesure que les apports augmentent, et ce, de façon à ce que le niveau maximal d'exploitation soit respecté.

En période d'étiage sévère, l'eau contenue dans le lac Théodore peut être mise à contribution afin de soutenir un débit de dilution suffisant sur la rivière du Nord. Cette situation limite la libre circulation des embarcations de plaisance à fort tirant d'eau.

### **5.3 Cote de débordement du lac**

Le niveau à partir duquel le lac est susceptible de déborder en son point le plus bas se situe sur les ailes du barrage Théodore, à l'élévation 368,00 m, soit 70 cm au-dessus du niveau atteint par la crue de sécurité de l'ouvrage.

### **5.4 Seuils d'inondation**

Sur le pourtour du lac Théodore ainsi qu'en aval du barrage du même nom, aucun débit et/ou niveau d'inondation mineur n'a encore été déterminé.

### **5.5 Gestion des crues**

En condition normale d'exploitation, les quatre poutrelles présentes dans chacun des deux pertuis sont habituellement maintenues en place.

La gestion des eaux en période de crue vise à minimiser les inondations en aval, tout en respectant la cote maximale d'exploitation du lac Théodore (366,06 m). Durant la période estivale, les poutrelles sont toutes maintenues afin de maintenir le niveau du lac au niveau normal d'exploitation établi à 365,96 m.

En hiver, environ trois poutrelles sont maintenues par pertuis. En mars, les poutrelles sont enlevées progressivement afin de vidanger le lac à la cote 365,86 m en prévision des crues printanières. Toutefois, si la quantité de neige au sol se situe au-dessus de la normale historique, la cote de vidange du lac est alors abaissée.

Selon l'historique des niveaux d'eau du lac Théodore, lesquels sont enregistrés depuis 1970, le niveau maximal a été atteint en février 1981 et se chiffrait à 366,56 m. Le débit maximal estimé atteint lors de cet événement se situait autour de 29,6 m<sup>3</sup>/s.

### **5.6 Stratégie de communication**

Le premier élément de la stratégie de communication des risques consiste à transmettre aux intervenants concernés le sommaire du plan de gestion et un sommaire du plan de mesures d'urgence illustrant, notamment le territoire susceptible de subir les effets d'une rupture du barrage.

En situation de crue, lorsqu'il y a un risque d'inondation en aval en raison de la gestion du barrage ou parce que le niveau maximal d'exploitation risque d'être dépassé, l'ingénieur de garde est en

communication constante avec Urgence-Environnement, le centre des opérations gouvernementales (COG) du ministère de la Sécurité publique et la municipalité de Val-Morin, et ce, tant et aussi longtemps que la situation l'exige.

## 6 CONCLUSION

Fort d'une expérience de près de 30 ans dans la gestion des barrages, le CEHQ est pleinement conscient que ses ouvrages constituent des risques potentiels pour les populations avoisinantes. Le CEHQ s'assure donc que ses barrages sont en bon état, sécuritaires et fiables. La gestion en continu du barrage des Sables permet ainsi de cerner rapidement les problèmes éventuels afin d'y remédier dans les plus brefs délais.

Le sommaire du plan de gestion des eaux retenues par le barrage Théodore répond à toutes les exigences du règlement sur la sécurité des barrages. L'information qui y est colligée vise, notamment à informer les intervenants concernés de certains risques reliés à la présence ainsi qu'à l'exploitation du barrage Théodore, et à permettre aux autorités locales et régionales d'adapter leur plan de mesures d'urgence afin d'assurer une meilleure protection de leurs citoyens.

Enfin, le personnel du CEHQ est disponible en tout temps pour répondre à toute question relative à ce document. On peut composer le 418 521-3886 ou écrire à l'adresse courriel suivante : [cehq@mddep.gouv.qc.ca](mailto:cehq@mddep.gouv.qc.ca)

Préparé par : \_\_\_\_\_  
Martin Ferland, ing., M.B.A.



## 7 RÉFÉRENCES

CEHQ (mars 2009). *Étude d'évaluation de la sécurité –Barrage Théodore, 79 pages et annexes.*





---

**BARRAGE THÉODORE**  
**FICHE TECHNIQUE**

---





[Ententes et documents administratifs](#) | [Produits et services tarifés](#) | [Foire aux questions](#) | [Le Coin de Rafale](#)

**NOM DU BARRAGE :** Théodore, Barrage  
**Numéro du barrage :** X0004974

#### LOCALISATION

**Région administrative :** Laurentides  
**Municipalité :** Val-Morin  
**MRC :** Les Laurentides  
**Coordonnées NAD83 :**  
Latitude : 45° 57'  
Longitude : -74° 14'  
**Nom du réservoir :** THEODORE  
**Territoire(s) :** —  
**Aménagement (s) :** —



#### HYDROGRAPHIE

Type	Numéro	Nom	Numéro	Nom du bassin primaire
Lac	01450	Théodore, Lac	04300000	Outaouais, Rivière des
Cours d'eau	04015000	Mulets, Rivière aux	04300000	Outaouais, Rivière des
Bassin	04015000	Mulets, Rivière aux	04300000	Outaouais, Rivière des

#### CARACTÉRISTIQUES

**Catégorie administrative :** Forte contenance

**Type(s) d'utilisation :** Récréatif et villégiature

**Hauteur du barrage :** 3,5 m

**Hauteur de la retenue :** 1,6 m

**Type de barrage :** Béton-gravité

**Classe :** D

**Capacité de retenue :** 5 574 600 m<sup>3</sup>

**Longueur de l'ouvrage :** 35,7 m

**Type de terrain de fondation :** Roc

**Niveau des conséquences :** ---

<b>Zone sismique :</b>	4	<b>Superficie du réservoir :</b>	342 ha
<b>Superficie du bassin versant :</b>	104,1 km <sup>2</sup>	<b>Longueur de refoulement :</b>	— m
<b>Année de construction :</b>	1964	<b>Année de modification :</b>	—

**PROPRIÉTAIRE(S) OU MANDATAIRE(S)**

**Nom :** Centre d'expertise  
hydrique du Québec

**Adresse :** 675, boulevard René-  
Lévesque Est Aile René-  
Lévesque, 2e étage - boîte  
28 Québec (Québec)

**Code postal :** G1R 5V7



---

**BARRAGE THÉODORE**  
**VOCABULAIRE**  
**DE L'EXPLOITATION DES BARRAGES**

---



## VOCABULAIRE TECHNIQUE

### NIVEAU MAXIMAL CRITIQUE

Le niveau maximal permettant d'assurer la stabilité de l'ouvrage.

■ Maximum water level

### NIVEAU MAXIMAL DE LA RETENUE

Le niveau maximal au-delà duquel l'ouvrage ne peut retenir l'eau et déverse.

### NIVEAU MAXIMAL D'EXPLOITATION

Le niveau maximal à ne pas dépasser en raison de nos droits et servitudes ou autres raisons similaires ou le niveau le plus élevé que peuvent atteindre les eaux retenues en exploitation normale.

■ Maximum operation level

### NIVEAU NORMAL D'EXPLOITATION

Le niveau maximal auquel un plan d'eau peut monter en exploitation normale.

■ La Commission internationale des grands barrages emploie plutôt le terme niveau normal de retenue.

■ Maximum normal operation level

### NIVEAU MINIMAL D'EXPLOITATION

Le niveau d'abaissement le plus bas d'un plan d'eau en exploitation normale.

■ Minimum operating level

### SEUIL MAJEUR D'INONDATION

Le débit à partir duquel des immeubles sont affectés par les eaux évacuées par le barrage.

### SEUIL MINEUR D'INONDATION

Le débit avant que les immeubles ne soient affectés par les eaux évacuées par le barrage.



**ANNEXE 7 – EXTRAIT DU REGISTRE DES DEMANDES D'INTERVENTION ET  
EXTRAIT DU REGISTRE DE SURVEILLANCE**