



Rapport de l'évaluation de la sécurité du barrage X0001518 du Lac Tourbillon

Municipalité du Lac-Beauport

No projet : 158100609

Juin 2025



**RAPPORT DE L'ÉVALUATION DE LA
SÉCURITÉ DU BARRAGE X0001518 DU
LAC TOURBILLON**

Rapport préliminaire

30 juin 2025

Préparé pour
Municipalité du Lac-Beauport

Préparé par
Stantec Experts-conseils ltée

Numéro de projet :
158100609

Registre d'approbation

Rapport de l'évaluation de la sécurité du barrage X0001518 du lac Tourbillon

Révision	Description	Auteur)		Vérification qualité		Revue indépendante	
A	Preliminaire	MBR/PH/CK	07/03/2025	AT	06/03/2025	SB	12/03/2025
B	Preliminaire	MBR/PH/CK	30/06/2025	AT	30/06/2025	SB	30/06/2025



Registre d'approbation

Rapport de l'évaluation de la sécurité du barrage X0001518 du lac Tourbillon

Remarques

Les conclusions du Rapport, intitulé Rapport d'évaluation de la sécurité du barrage X0001518 reflètent l'opinion professionnelle de Stantec au moment de la rédaction du Rapport et concernent la portée du mandat décrite dans le Rapport. Les opinions contenues dans ce document sont basées sur les conditions et les informations existantes au moment de la publication du document et ne tiennent compte d'aucune modification ultérieure. Le Rapport ne concerne que le projet pour lequel les services de Stantec ont été retenus et l'objectif énoncé pour lequel le Rapport a été préparé. Le Rapport ne doit pas être utilisé afin de modifier ou de prolonger le projet, ou à tout autre fin ou projet, et toute utilisation non autorisée par quiconque est aux risques de ce dernier.

Stantec a présumé que toutes les informations reçues de la Municipalité de Lac-Beauport (le « Client ») et de tierces parties pour la préparation du Rapport sont exactes. Bien que Stantec ait exercé un jugement et une diligence raisonnable dans l'utilisation de ces informations, Stantec n'assume aucune responsabilité quant aux conséquences découlant d'omissions ou d'erreurs qui pourraient être incluses dans lesdites informations.

Ce Rapport est destiné à l'usage exclusif du Client, en conformité avec le contrat conclu entre Stantec et le Client. Bien que le Rapport puisse être remis aux autorités compétentes applicables et autres parties envers lesquelles le Client est responsable, Stantec ne garantit les services à aucune tierce partie. Aucune autre partie ne pourra avoir recours au rapport sans le consentement exprès de Stantec, lequel sera accordé à l'entière discrétion de Stantec.

Lors de la préparation de ce rapport, Stantec a utilisé des informations et des données obtenues auprès du client, de sources publiques et de sources reconnues dans l'industrie. Stantec s'est fié à ces informations et données sans effectuer de vérification indépendante, sauf dans la mesure où une telle vérification était expressément incluse dans les Services.

L'état des installations tel que décrit dans le rapport est fondé sur les observations effectuées quant aux conditions du site dans les conditions habituelles d'opération et de niveau d'eau au moment de l'inspection, ainsi que sur les données dont disposait l'équipe d'inspection à la date de rédaction de ce rapport. Il est important de noter que l'état des installations dépend de nombreuses conditions internes et externes qui changent constamment et qu'ils sont de nature évolutive. Il serait faux de présumer que l'état actuel des installations continuera à être le même dans le futur. Seuls un entretien et une inspection continue pourraient permettre la découverte de conditions dangereuses.

Stantec n'assumera aucune responsabilité pour tous les défauts ou les vices cachés qui ne pouvaient être raisonnablement découverts selon les normes généralement acceptées de l'industrie ou qui auraient raisonnablement dû être découverts conformément à d'autres critères d'inspection applicables. Toute évaluation des installations qui est fournie est limitée quant à son exactitude au moment, à la portée et au but pour lesquels l'évaluation a été préparée.



Registre d'approbation

Rapport de l'évaluation de la sécurité du barrage X0001518 du lac Tourbillon

Signatures

Préparé par

Maxime Bouchard-Rochette, CPI.,
Hydrotechnique et sécurité de
Barrage, N OIQ 6056606 (Sous la
supervision de Carole Kabore)

Philippe Holas, Ing., M. Ing.
Hydrotechnique et sécurité de
Barrage, N OIQ 6031331

Carole Kabore, Ing., Msc
Hydrotechnique et sécurité de
Barrage, N OIQ 5067443

Révisé par

Ammar Taha, ing., Ph.D.
Hydrotechnique et sécurité de
Barrages, N OIQ 132910



Table des matières

SOMMAIRE EXECUTIF.....	V
ABREVIATIONS.....	VI
1 INTRODUCTION	1.1
1.1 BUT DU PROJET ET OBJECTIFS	1.1
1.2 DESCRIPTION DU SITE ET EMPLACEMENT	1.1
1.3 CLASSEMENT EN VIGUEUR	1.1
1.4 SYSTEMES ET RESEAUX GEODESIQUES.....	1.1
2 HISTORIQUE DU BARRAGE.....	2.1
3 REVUE DE LA DOCUMENTATION	3.1
4 INSPECTION.....	4.1
4.1 ÉROSION.....	4.1
4.1.1 AMONT DE LA DIGUE	4.1
4.1.2 AVAL DE LA DIGUE	4.3
4.2 SECURITE DES OPERATEURS/EQUIPE DE MAINTENANCE	4.4
4.3 INSTRUMENTATION	4.4
4.4 CONSTATATIONS GENERALES	4.5
4.5 RENCONTRE DES RIVERAINS	4.5
5 SYNTHÈSE DES ÉTUDES ANTÉRIEURES.....	5.7
6 RÉGIME DES CRUES.....	6.1
6.1 DETERMINATION DES APPORTS	6.1
6.2 DONNEES DE BASE A CONSIDERER	6.1
6.3 APPROCHE CONSIDEREE.....	6.1
6.3.1 DELIMITATION DES BASSINS VERSANTS	6.1
6.3.2 CHANGEMENTS CLIMATIQUES	6.3
6.3.3 APPORTS EN AMONT ET EN AVAL DU BARRAGE DU LAC TOURBILLON	6.3
6.3.4 APPORTS EN AVAL DU BARRAGE	6.7
6.3.5 APPORTS DE LA RIVIERE MONTMORENCY	6.8
6.3.6 DEBITS EN CONDITION HYDROLOGIQUE NORMALE	6.9
6.3.7 DEBITS DE BASES	6.9
6.3.8 DEVELOPPEMENT DES HYDROGRAMMES DE CRUES.....	6.9
6.3.9 LAMINAGE DES CRUES	6.11
7 DETERMINATION DU NIVEAU DE CONSEQUENCES ET DE LA CRUE DE	
SECURITE.....	7.13
7.1 DONNEES DE BASE	7.13
7.1.1 DEVELOPPEMENT D'UN MODELE HYDRAULIQUE.....	7.13
7.2 SCENARIOS CONSIDERES ET HYPOTHESES DE CALCULS	7.19
7.2.1 DEFINITION DE LA BRECHE	7.19
7.2.2 CONDITION HYDROLOGIQUE NORMALE	7.19
7.2.3 CONDITION DE CRUE.....	7.20
7.3 CARACTERISTIQUE DU TERRITOIRE AFFECTE.....	7.21
7.3.1 RUPTURE EN CONDITION HYDROLOGIQUE NORMALE.....	7.22



7.3.2	RUPTURE EN CONDITION DE CRUE	7.25
7.4	NIVEAU DES CONSEQUENCES EN CAS DE RUPTURE DU BARRAGE	7.29
7.5	CRUE DE SECURITE DE L'AMENAGEMENT	7.29
7.6	CARTES D'INONDATION.....	7.29
7.7	ÉTUDE DE VAGUES ET REVANCHE REQUISE.....	7.30
7.7.1	CHOIX DE LA STATION METEOROLOGIQUE.....	7.30
7.7.2	METHODE DU FETCH EFFECTIF	7.30
7.7.3	HAUTEURS DE VAGUES	7.31
7.7.4	ENROCHEMENT DE PROTECTION CONTRE LES VAGUES.....	7.32
7.7.5	REVANCHE REQUISE.....	7.32
8	ANALYSE DE FERMETURE AU POURTOUR DU RESERVOIR.....	8.1
9	DETERMINATION DU CLASSEMENT DU BARRAGE.....	9.1
9.1	ANNEE DE CONSTRUCTION ET ANNEE DE MODIFICATION.....	9.1
9.2	HAUTEUR DU BARRAGE	9.1
9.3	TYPE DE TERRAIN DE FONDATION	9.1
9.4	ÉTAT DU BARRAGE.....	9.1
9.5	FONCTIONNALITE ET FIABILITE DES APPAREILS D'EVACUATION	9.1
9.6	NIVEAU DE CONSEQUENCES.....	9.3
9.7	ZONE DE SEISMICITE.....	9.3
9.8	CLASSEMENT DU BARRAGE.....	9.4
10	STABILITE DU BARRAGE	10.5
11	PLAN DE MESURES D'URGENCE ET PLAN DE GESTION DES EAUX.....	11.1
11.1	PLAN DE GESTION DES EAUX.....	11.1
11.2	PLAN DE MESURES D'URGENCE.....	11.1
12	REVUE DES ACTIVITES DE SURVEILLANCE	12.1
13	CONCLUSION.....	13.1
14	RECOMMANDATIONS	14.1
15	REFERENCES	15.1

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3-1 : Documentation disponible	3.1
Tableau 12-1 : Activités de surveillance requises pour un barrage de classe « B »	12.1
Tableau 14-1 : Recommandations (sans les recommandations du rapport d'inspection structure)	14.1

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Localisation du barrage.....	1.2
Figure 2-1 : Vue du barrage X0001518	2.1
Figure 2-2 : Vue amont du barrage X0001518	2.1
Figure 2-3 : Vue aval du barrage X0001518.....	2.2
Figure 2-4 : Vue de la crête du barrage X0001518	2.2
Figure 4-1 : Pente amont avec des signes d'érosion, rive gauche du barrage.....	4.2
Figure 4-2 : Pente amont côté gauche. Muret de béton, zone d'érosion et zone végétalisée.....	4.2
Figure 4-3 : Pente amont côté droit. Muret de béton et partie protégée par des pierres empilées	4.2
Figure 4-4 : Érosion du côté gauche, à l'aval de la structure.....	4.3



Figure 4-5 : Érosion du côté gauche, à l'aval de la structure vue de face.....	4.3
Figure 4-6 : Arbre du côté gauche de la structure, à l'aval du barrage	4.4
Figure 4-7 : Échelle limnométrique à l'amont du Lac Tourbillon	4.5
Figure 4-8 : Emplacement des résidences des riverains rencontrés	4.6
Figure 4-9 : Niveau d'eau au niveau de la couronne d'un ponceau reliant le lac Tourbillon à un petit lac privé	4.7
Figure 6-1 : Bassin versant du barrage X0001518.....	6.2
Figure 6-2 : Bassin versant des entrées d'eau en aval du barrage.....	6.2
Figure 6-3 : Courbes IDF de la station Charlesbourg Parc Orléans	6.5
Figure 6-4 : Hydrogramme de crue à la station 051007	6.9
Figure 6-5 : Hydrogrammes des crues au barrage X0001518 pour les différentes récurrences.....	6.10
Figure 6-6 : Hydrogrammes des crues à l'entrée #1 en aval du barrage X0001518 pour les différentes récurrences	6.10
Figure 6-7 : Hydrogrammes des crues à l'entrée #2 en aval au barrage X0001518 pour les différentes récurrences	6.10
Figure 6-8 : Courbe d'évacuation du barrage X0001518	6.11
Figure 6-9 : Courbe d'emménagement du lac du barrage X0001518.....	6.12
Figure 7-1 : Structure en bloc de pierre PK 0+150m.....	7.14
Figure 7-2 : Structure en bloc de pierre PK 0+150m.....	7.14
Figure 7-3 : Pont acier-bois PK 2+270 m.....	7.14
Figure 7-4 : Pont acier-bois PK 2+270 m.....	7.14
Figure 7-5 : Amont ponceau au PK 2+450	7.15
Figure 7-6 : Aval ponceau PK 2+450	7.15
Figure 7-7 : Amont ponceaux PK 2+550	7.15
Figure 7-8 : Aval ponceaux PK 2+550.....	7.15
Figure 7-9 : Amont ponceau au PK 3+ 375	7.16
Figure 7-10 : Amont ponceau au PK 3+375	7.16
Figure 7-11 : Configuration du modèle hydraulique	7.17
Figure 7-12 : LL sur la face amont du barrage – 297,56 m	7.18
Figure 7-13 : Débit de brèche en condition hydrologique normale	7.20
Figure 7-14 : Débit de la brèche lors de la crue de récurrence 100 ans	7.21
Figure 7-15 : Résultat de la rupture en condition hydrologique normale entre le PK 0 et le PK 0+500..	7.23
Figure 7-16 : Résultat de la rupture en condition hydrologique normale entre le PK 0+500 et le PK 2+200	7.23
Figure 7-17 : Résultat de la rupture en condition hydrologique normale entre le PK 1+200 et le PK 1+825	7.24
Figure 7-18: Résultat de la rupture en condition hydrologique normale entre le PK 1+825 et le PK 2+875	7.24
Figure 7-19 : Résultat de la rupture en condition hydrologique normale entre le PK 2+875 et le PK 3+525	7.25
Figure 7-20 : Résultat de la rupture en condition de crue centennale entre le PK 0 et le PK 0+500.....	7.26
Figure 7-21 : Résultat de la rupture en condition de crue centennale entre le PK 0+500 et le PK 2+200	7.27
Figure 7-22 : Résultat de la rupture en condition de crue centennale entre le PK 1+200 et le PK 1+825	7.27
Figure 7-23 : Résultat de la rupture en condition de crue centennale entre le PK 1+825 et le PK 2+875	7.28
Figure 7-24 : Résultat de la rupture en condition de crue centennale entre le PK 2+875 et le PK 3+525	7.28
Figure 7-25 : Localisation de la station météorologique	7.30
Figure 7-26 : Fetchs directs pour le site à l'étude	7.31
Figure 8-1 : Fermeture du réservoir.....	8.1



Figure 9-1 : Zone de sismicité du barrage X0001518	9.3
--	-----

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A PLAN DU BARRAGE.....	A-1
--------------------------------------	------------

ANNEXE B CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES DE LA RIVIÈRE MONTMORENCY	B-1
---	------------

ANNEXE C PLAN DE GESTION DES EAUX.....	C-1
---	------------

ANNEXE D RAPPORT D'INSPECTION DU BARRAGE X0001518 – STANTEC 2024	D-1
---	------------



Sommaire exécutif

La municipalité de Lac-Beauport, propriétaire du barrage du Lac Tourbillon (X0001518), a mandaté Stantec pour effectuer la première étude d'évaluation de sécurité (ÉÉS) du barrage.

Le barrage du Lac Tourbillon (X0001518), situé sur le ruisseau Lamothe dans la municipalité de Lac-Beauport, a été construit en 1990 selon la fiche technique publiée par le MELCCFP. C'est un écran de béton à l'amont d'une digue en terre de 7 m de longueur et 3,54 m de hauteur, muni d'un ouvrage d'évacuation. L'organe d'évacuation est un seuil à poutrelles de 2,26 m de largeur qui se déverse dans une chambre à parois de bois et à fond de béton. L'ouvrage est fondé sur du roc. Le lac en amont du barrage a une vocation récréative et de villégiature.

La fiche technique du MELCCFP classifie le barrage du Lac Tourbillon dans la catégorie « forte contenance » avec une classe « D » et cette fiche ne mentionne pas le niveau de conséquences du barrage. La même fiche indique une fondation du barrage sur du roc. Le classement, le niveau de conséquences et le type de fondation du barrage ont été révisés dans le cadre de la présente ÉÉS et cette étude attribue une classe « E » au barrage, un niveau de conséquences « **Minimal** » et une **fondation sur du Till**. La crue de récurrence 100 ans a été retenue comme crue de sécurité du barrage.

La rupture du barrage X0001518 en condition normale et en crue demeure confinée au chenal du ruisseau Lamothe. Des infrastructures ou services de faible importance sont affectés. La conséquence incrémentale en condition hydrologique normale consiste à 3 chemins privés d'accès aux ressources et la conséquence en crue centennale est un chemin privé d'accès aux ressources.

Étant donné que le barrage X0001518 a un niveau de conséquence « minimal », la vérification de la stabilité n'est pas requise par le règlement de la sécurité des barrages. Cependant, par précaution, la stabilité du barrage a été vérifiée et présentée dans le rapport.

L'ÉÉS a permis de constater que le barrage est en bon état général. Quelques détériorations mineures, qui ne mettent pas en danger le barrage et le bon fonctionnement de son appareil d'évacuation, ont été observées. Le Barrage X0001518 a une cote d'état « **Bon** ». Un perré d'enrochement de protection devra être mis en place sur la face amont du barrage afin de protéger la digue contre l'érosion. La revanche disponible respecte bien la revanche requise déterminée par l'étude des vagues, mais également la crête du barrage n'est pas susceptible à l'érosion.



Abréviations

ACB	Association canadienne des Barrages
CC	Changement Climatique
CEHQ	Centre d'Expertise hydrique du Québec (maintenant intégré au MELCCFP)
CPI	Candidat(e) à la Profession d'ingénieur
DSB	Direction de la Sécurité des barrages du MELCCFP
ÉÉS	Étude d'Évaluation de la Sécurité du barrage
GRHQ	Géobase du réseau hydrographique du Québec
IDF	L'Intensité, la Durée et la Fréquence des chutes de pluie de courte durée
LL	Limite Littoral
LSB	Loi sur la Sécurité des barrages
MELCCFP	Ministère de l'Environnement et de la Lutte aux Changements climatiques de la Faune et des Parcs
MCP	Manuel de Conception des ponceaux
MPSAL	Municipalité de la Paroisse de Saint-Anne-des-Lacs
MTMD	Ministère des Transports et de la Mobilité Durable
NNO	Niveau normal d'opération
PGER	Plan de Gestion des Eaux retenues
PK	Point kilométrage
PMU	Plan de mesures d'urgence
RSB	Règlement sur la Sécurité des barrages



1 Introduction

1.1 But du projet et objectifs

La municipalité de Lac-Beauport (le client) est propriétaire du barrage du Lac Tourbillon (X0001518). Le client a mandaté Stantec pour réaliser la première ÉÉS pour ce barrage, afin de se conformer à la loi sur la sécurité des barrages (LSB). Les services professionnels requis consistent à procéder à la réalisation de l'étude de sécurité ainsi que la stabilité géotechnique du barrage, le plan de gestion des eaux retenue (PGER) et le plan de mesures d'urgence (PMU).

1.2 Description du site et emplacement

Le barrage à l'étude est à approximativement 17 km au nord de la ville de Québec. Le Lac Tourbillon est retenu par le barrage à l'étude (X0001518). Les coordonnées du barrage sont la latitude 46° 57' 42" N et la longitude 71° 14' 27" O.

Nom du barrage utilisé pour cette étude :	Barrage du Lac Tourbillon
Numéro répertoire du barrage :	X0001518
Latitude :	46° 57' 42" N
Longitude :	71° 14' 27" O
Municipalité :	Lac-Beauport
MRC :	La Jacques-Cartier
Nom et adresse du propriétaire :	Municipalité de Lac-Beauport 65, chemin du Tour-du-des-Lac, Lac-Beauport (Québec) G3B 0A1
Nom et fonction de la personne responsable de la sécurité de barrage	Directeur du service des travaux publics et infrastructures
Nom et adresse de l'ingénieur responsable de l'évaluation de la sécurité	Carole Kabore 6535 Des Alpes, Trois-Rivières, G9C 0L8





Figure 1-1 : Localisation du barrage

1.3 Classement en vigueur

Selon la fiche technique du MELCCFP, le barrage X0001518 est classifié dans la catégorie « **forte contenance** », a un classement D et un niveau des conséquences « **non spécifié** ». Le niveau des conséquences et le classement du barrage ont été révisés dans le cadre de cette ÉÉS respectivement à la section 7.4 et à la section 9.

1.4 Systèmes et réseaux géodésiques

Le système de référence géodésique utilisé pour ces analyses est le NAD83 CSRS MTM zone 7. Le système de référence altimétrique du lidar est le CGVD28.



2 Historique du barrage

Le barrage du Lac Tourbillon (X0001518) a été construit en 1990 et se déverse dans le ruisseau Lamothe, selon les cartes du GRHQ. Selon la fiche technique du barrage X0001518 du CEHQ, l'ouvrage a une longueur de 7 m et une hauteur de 3,54 m, dont 2,4 m de hauteur de retenue. Il consiste en un déversoir à poutrelles de 2,26 m de largeur. Le barrage X0001518 est de type écran de béton à l'amont d'une digue en terre. Le barrage se vide dans une chambre composée de murs en bois et d'un fond en béton et l'écoulement se poursuit jusqu'au ruisseau Lamothe. Un seuil est présent entre la fin de la chambre et le ruisseau Lamothe, ce seuil crée une chute où le niveau d'écoulement baisse soudainement d'environ 1,2 m. Le barrage ne comporte pas de grille à débris ni de déflecteur pour dévier ceux-ci.

La crête du barrage a une élévation variable. L'élévation moyenne est 298,19 m. Le dessus des poutrelles a été relevé lors de la visite à une élévation de 297,29 m.

Des modifications sur l'ouvrage ont été réalisées en 1998 selon la fiche technique du barrage. Cependant, la nature de ces modifications n'est pas connue. Le système de levage et les poutrelles du barrage ont été remplacés en 2022 par la municipalité. Le plan du barrage est présenté à l'annexe A. La Figure 2-1, la Figure 2-2, la Figure 2-3 et la Figure 2-4 présentent les différentes parties du barrage X0001518.



Figure 2-1 : Vue du barrage X0001518



Figure 2-2 : Vue amont du barrage X0001518



Figure 2-3 : Vue aval du barrage X0001518



Figure 2-4 : Vue de la crête du barrage X0001518

3 Revue de la documentation

Le tableau suivant résume la documentation pertinente qui a été revue avant de débiter l'étude.

Tableau 3-1 : Documentation disponible

Auteur, Année	Titre	Description
Bureau d'écologie appliqué, 2020	Diagnose du Lac Tourbillon	Étude environnementale du Lac Tourbillon. Un relevé bathymétrique a été réalisé pour cette étude.
Ministère de l'Environnement, 1994	Cartographie des zones inondables : Rivière Montmorency du Rapide des Trois-Sauts jusqu'à l'île Enchanteresse	Analyse des débits et bassin versant de la rivière Montmorency près de la jonction avec le ruisseau Lamothe. Ce rapport indique que le bassin versant de la rivière Montmorency au site à l'étude (près de l'île Enchanteresse) est approximativement 7% inférieur au bassin versant de la station hydrométrique 051001.
CEHQ, N/A	Fiche technique du barrage X0001518	Dimensions du barrage, capacité de retenue, type de barrage, terrain de fondation, superficie du réservoir et du bassin, zone sismique, année de construction et de modification.
MTMD, 2022	Fiche d'inspection du ponceau 16861, à l'exutoire du ruisseau Lamothe dans la rivière Montmorency.	Dimensions du ponceau, année de construction, type d'ouvrage, DJMA, coordonnées.
Les métaux presses Québec inc, 2022	Plan du barrage	Plan du nouveau système de levage des poutrelles
Municipalité de Lac-Beauport, 2024	Questionnaire de l'opérateur de barrage	Formulaire sur le mode d'opération du barrage complétée par la municipalité de Lac-Beauport à la demande de Stantec
Municipalité de Lac-Beauport, 2024	Bathymétrie du Lac Tourbillon	Bathymétrie du Lac Tourbillon réalisée en 2023.



4 Inspection

L'inspection du barrage par Stantec a été réalisée lors de la visite du site le 27 septembre 2024. Le personnel de Stantec lors de cette visite d'inspection était :

Inspection hydraulique

- Carole Kabore, ing., MSc, Hydrotechnique et barrage
- Maxime Bouchard-Rochette, CPI, Hydrotechnique et barrage

Inspection géotechnique

- Hugo Desrochers, CPI, Géotechnique

Arpentage

- Farid Khelladi, Technicien en arpentage

Les remarques de l'inspection hydraulique se trouvent aux sections suivantes. Le rapport d'inspection géotechnique se trouve à l'Annexe D.

4.1 Érosion

4.1.1 Amont de la digue

L'extrémité amont de la digue est en partie protégée par un muret de béton. Dans sa partie non bétonnée, la pente amont comporte un recouvrement de pierres en guise de protection contre l'érosion et comporte une portion non protégée.

Des signes d'érosion ont été notés pendant la visite. En rive gauche (en regardant vers l'aval), il y a une érosion modérée. Le drainage de la route peut également contribuer à l'érosion. Plusieurs arbustes, herbacées et arbres sont présents sur la pente amont de la digue. Voir la Figure 4-1, la Figure 4-2 et la Figure 4-3 pour une représentation graphique.





Figure 4-1 : Pente amont avec des signes d'érosion, rive gauche du barrage



Figure 4-2 : Pente amont côté gauche. Muret de béton, zone d'érosion et zone végétalisée



Figure 4-3 : Pente amont côté droit. Muret de béton et partie protégée par des pierres empilées

4.1.2 Aval de la digue

Du côté aval de la digue, le talus est presque entièrement végétalisé et est constitué de grosses pierres, ce qui en protège la majorité de l'érosion. Cependant, la portion du talus située du côté gauche de la structure montre des signes d'érosion potentielle. Cette érosion semble cependant avoir été causée par le drainage de la route dans le ruisseau ou encore par le passage répété de personnes à cet endroit. La Figure 4-4 et Figure 4-5 montrent l'érosion observée à l'aval.



Figure 4-4 : Érosion du côté gauche, à l'aval de la structure



Figure 4-5 : Érosion du côté gauche, à l'aval de la structure vue de face

Un arbre de dimension importante est présent à l'aval du barrage. Les racines de celui-ci peuvent causer une instabilité à la digue, vu sa proximité importante avec le muret de bois gauche. La Figure 4-6 présente l'arbre à proximité du muret.



Figure 4-6 : Arbre du côté gauche de la structure, à l'aval du barrage

4.2 Sécurité des opérateurs/équipe de maintenance

Le barrage n'est pas équipé d'une estacade ni d'une grille à débris. Il est donc recommandé de mettre en place une estacade en diagonale avec le barrage ou une grille à l'entrée de celui-ci pour que les débris (parcelles de terre flottantes) soient dirigés vers une rive en amont ou simplement empêchés de pénétrer dans le barrage. Il est recommandé de s'assurer que la végétation soit coupée aux environs du barrage pour faciliter l'accès et pour permettre les inspections.

4.3 Instrumentation

Le barrage ne dispose pas d'instrumentation à l'exception d'une règle limnimétrique installée dans le lac. Celle-ci permet de lire le niveau d'eau du lac. Il est à noter que la profondeur à laquelle la règle est enfoncée est inconnue. Par conséquent, il est recommandé d'y adjoindre un niveau géodésique de référence de façon à connaître l'élévation associée aux marques de la règle. La Figure 4-7 montre l'échelle limnimétrique sur le Lac Tourbillon.



Figure 4-7 : Échelle limnométrique à l'amont du Lac Tourbillon

Selon la visite de site réalisée par Stantec, le niveau 74 sur l'échelle limnimétrique correspond à l'élévation géodésique 297,48 m.

4.4 Constatations générales

Plusieurs constatations ont été réalisées lors de l'inspection. Celles-ci sont énumérées ci-dessous :

- Des fissures et des ornières sont observées sur la chaussée au-dessus et près de la structure;
- Aucune trace de débordement n'a été observée sur le pavage ou sur les berges de la digue;
- Aucun débris n'a été observé lors de la visite, mais des mesures de prévention de l'accumulation de débris sont tout de même recommandées;
- Aucun signe d'animal n'a été observé (signes de castors, terriers, ou autres);
- Les poutres de bois constituant la façade du muret à l'amont du barrage ont subi des déplacements visibles, celles-ci n'ont plus un alignement optimal.

4.5 Rencontre des riverains

Lors de la visite, trois riverains ont été rencontrés. La Figure 4-8 montre l'emplacement de leurs résidences respectives.



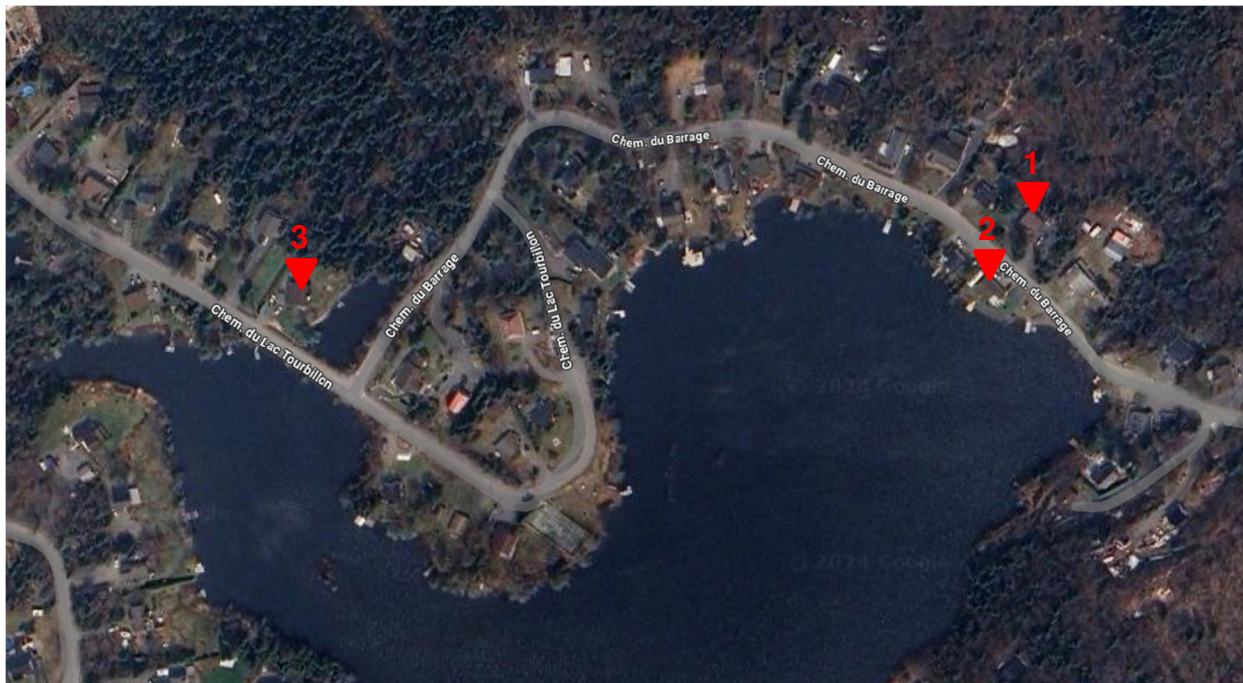


Figure 4-8 : Emplacement des résidences des riverains rencontrés

Les informations collectées auprès des riverains sont présentées ci-dessous.

Riverain 1. réside au 27 chemin du barrage depuis 28 ans :

Le résident n'a jamais observé de débordement du lac sur la route ou sur les terrains avoisinants au site à l'étude ou près de celui-ci. En hiver, il se forme de la glace à l'amont du barrage. Cependant, la glace n'obstrue pas le déversoir.

Il mentionne également que des accumulations de bois et de terre se forment à la structure à l'étude et que la ville procède au nettoyage de ces accumulations. Le résident dit ne jamais avoir observé de castors ou de traces de ceux-ci.

Riverain 2. réside au 26 chemin du barrage depuis 40 ans :

L'eau, à son niveau maximal, monte environ 5 cm plus haut que l'eau du jour lors de la visite.

Riverain 3. réside au 17 chemin du Lac Tourbillon depuis 37 ans :

Selon ce résident, le niveau du lac est monté jusqu'au niveau du pavage en face de sa résidence il y a environ deux ans sans déborder. Le chemin du Lac Tourbillon et le ponton reliant son lac privé au Lac Tourbillon à côté de sa résidence ont été refaites il y a 17-18 ans. À noter que lors de la visite, le niveau de l'eau accotait la couronne de ce ponton. La Figure 4-9 présente ce ponton et le niveau de l'eau.



Figure 4-9 : Niveau d'eau au niveau de la couronne d'un ponceau reliant le lac Tourbillon à un petit lac privé

5 SYNTHÈSE DES ÉTUDES ANTÉRIEURES

Aucune étude de sécurité n'a été réalisée pour ce barrage. La présente étude est donc la première étude de sécurité du barrage du Lac Tourbillon.

6 RÉGIME DES CRUES

6.1 Détermination des apports

La zone d'étude se situe dans la région hydrologique 5. Le ruisseau Lamothe coule dans la région des Laurentides. Elle prend sa source à l'embouchure du Lac Tourbillon sur environ 2 km avant de se connecter au ruisseau Euclide. Ce dernier se déverse dans la rivière Montmorency.

6.2 Données de base à considérer

Les données de base pour réaliser l'analyse du régime sont :

- La superficie du bassin versant en amont;
- L'hydrogramme d'apport au Lac Tourbillon;
- Les superficies des bassins versants en aval pour l'estimation des apports en aval. Ces apports sont importants dans l'évaluation du niveau des conséquences;
- Le volume d'emmagasinement et la capacité d'évacuation du Barrage X00015 (discutés à la section 6.3.9).

6.3 Approche considérée

L'hydrologie a été réalisée en comparant les résultats de crue obtenus par la méthode rationnelle avec ceux obtenus par la méthode de transposition des stations hydrométriques. La méthode rationnelle est généralement utilisée pour les bassins versants de plus petites superficies. La méthode de transposition est généralement la meilleure méthode lorsque des données historiques sont disponibles à proximité du site du projet.

6.3.1 Délimitation des bassins versants

Les modèles numériques de terrain (Lidar) du site Forêts Ouvertes (21L14NE et 21L14NO) ont été téléchargé. Ce lidar a été utilisé pour délimiter les bassins versants. Les caractéristiques des bassins versants ont été déterminées à l'aide du logiciel HEC-HMS, développé et distribué par le « US Army Corps of Engineers ». Le bassin versant du barrage du lac Tourbillon a une superficie de 3,37 km². Les bassins versants de la zone en aval du barrage du Lac Tourbillon ont également été analysés pour mieux représenter les conditions d'écoulement en aval du barrage. Ces bassins ont une superficie de 3,06 km² et de 4,12 km² respectivement de l'amont (#1) vers l'aval (#2). La Figure 6-1 présente le bassin versant du barrage et la Figure 6-2 présente les bassins versants des apports d'eau insérés en aval du barrage.



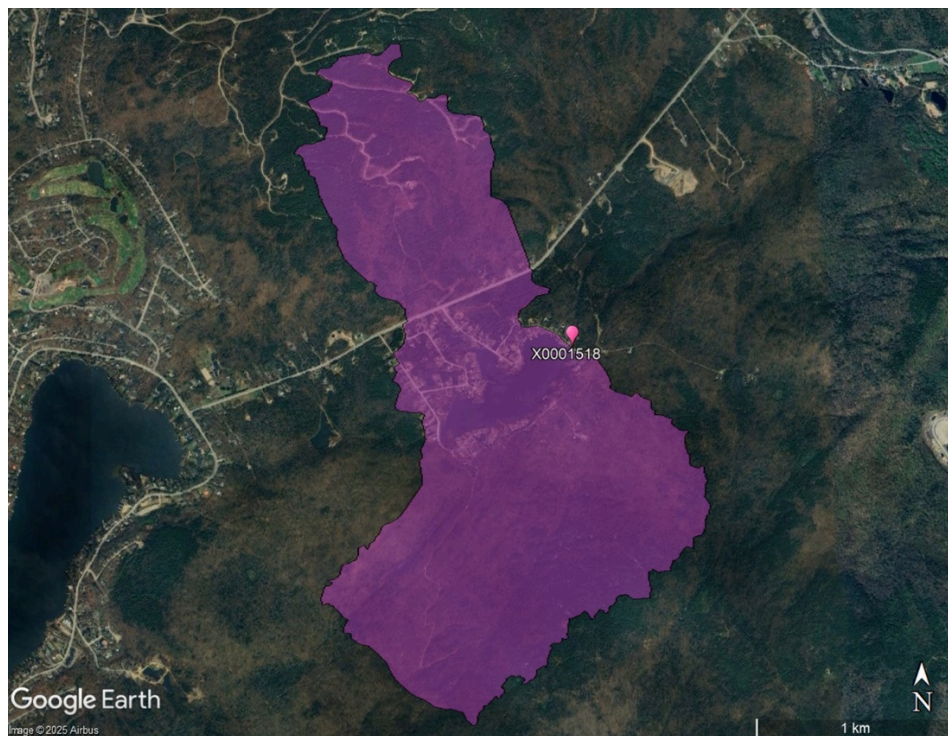


Figure 6-1 : Bassin versant du barrage X0001518



Figure 6-2 : Bassin versant des entrées d'eau en aval du barrage



6.3.2 Changements climatiques

L'Info-Structures no. T2024-20, le tableau 2.1-1 et le tableau 2.1-2 du chapitre 2 du Tome III des Ouvrages d'art donnent des indications pour la majoration pour tenir compte des changements climatiques de certains ouvrages d'art n'incluant pas les barrages. Selon une communication faite avec la DSB, la majoration pour les changements climatiques pour les études de sécurité des barrages relève de la décision de l'ingénieur chargée de cette étude. En tenant compte de l'info-structures no. T2024-20 et des tableaux du tome III, la majoration de débits pour les bassins versants de moins de 60 km² et de plus de 100 km à la région de l'étude devra être de l'ordre de 20% pour être conservateur. Les apports (débits) en amont et en aval du barrage ont donc été majorés par 20%.

6.3.3 Apports en amont et en aval du barrage du Lac Tourbillon

6.3.3.1 Estimation des apports par la méthode rationnelle

Selon le manuel de conception des ponceaux (MCP) du ministère des Transports et de la Mobilité Durable (MTMD), la méthode rationnelle devrait être utilisée pour déterminer les débits de récurrence lorsque le bassin versant est inférieur à 60 km². Puisque le bassin versant à l'étude a une superficie de 3,37 km², la méthode rationnelle est utilisée pour déterminer les débits pour chaque récurrence.

6.3.3.1.1 Sols

Classification hydrologique des sols

Les cartes pédologiques de l'IRDA (cartes 21L14201 et 21L14202) n'avaient aucune donnée sur le classement des sols de la zone de l'étude. Les cartes de dépôt de surface de la carte écoforestière disponible sur le portail *Forêt Ouverte* ont donc été utilisées pour déterminer les types de sols constituant la pédologie du bassin versant. À partir des données présentées au *Manuel de Conception des Ponceaux* (MTMD, 2024), il a été possible de déterminer la classification des sols.

Utilisation des sols

Le bassin versant du barrage à l'étude est majoritairement en zone boisée, mais comprend également d'autres zones spécifiées dans le tableau suivant. Le Tableau 6-1 présente la superficie de chaque surface d'utilisation de sols pour le bassin versant. Il présente également les coefficients de ruissellements pondérés (C_p) associés avec ce type de sol. Le C_p a été déterminé en utilisant les valeurs moyennes du MCP.



Tableau 6-1 Coefficient de ruissellement (C_p) utilisé pour le bassin versant

Utilisation de sol	Superficie	C_p	C_p final retenu
Zone résidentielle unifamiliale	18,36	0,4	0,27
Lac	16,68	0,95	
Boisé*			
Sol de type A	99,89	0,11	
Sol de type B	177,18	0,26	
Sol de type C	13,64	0,43	
Sol de type D	8,32	0,51	

*Avec une pente

6.3.3.1.2 Pente moyenne du bassin versant

La pente moyenne du bassin versant a été calculée à partir du modèle numérique du terrain (données topographiques) obtenu du site *Forêt Ouverte* en utilisant le logiciel HEC-HMS. La pente moyenne du bassin versant du barrage X0001518 est 9,3 %.

6.3.3.1.3 Temps de concentration

Pour le barrage X0001518, le coefficient C_p est de 0,27 (inférieur à 0,4), donc l'équation suivante s'applique pour le calcul du temps de concentration, t_c . La pente du cours d'eau S_c a été calculée à 9,7 % et la longueur L_c est de 2782,01 m. Le calcul du temps de concentration donne une valeur de 67,35 minutes, soit 1,12 heures.

$$t_c = \frac{3.26 (1.1 - C_p) L_c^{0.5}}{S_c^{0.33}}$$

où t_c Temps de concentration (min)

C_p Coefficient de ruissellement

L_c Longueur du cours d'eau (m)

S_c Pente « 85-10 » du cours d'eau (%)

6.3.3.1.4 Intensité de précipitation

Les courbes IDF de la station pluviométrique Charlesbourg Parc Orléans (7011309) ont été utilisées, puisque la station est proche du barrage X0001518 (soit à une distance de 10,75 km). Ses données représentent donc bien les conditions pluviales du bassin versant à l'étude. Les données de cette station ont été utilisées à la place de celles de Courville de Poissy (701A9E0), car la station Charlesbourg Parc



Orléans a plus de données disponibles. La figure 6-3 présente la courbe IDF de cette station pluviométrique.

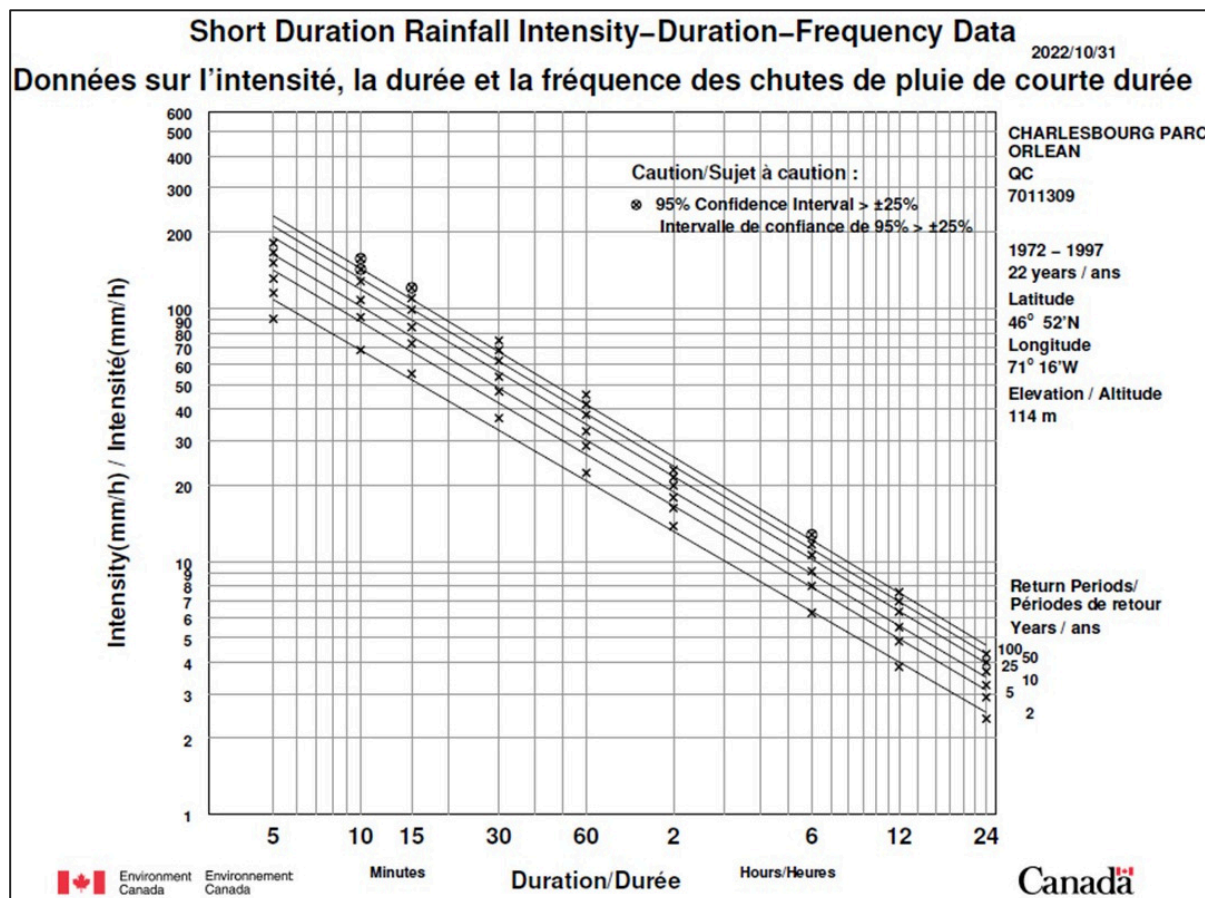


Figure 6-3 : Courbes IDF de la station Charlesbourg Parc Orléans

6.3.3.1.5 Débits de la méthode rationnelle

Le débit de pointe est calculé avec la méthode rationnelle, définie par l'équation suivante :

$$Q = \frac{C_p F_L I A_b}{360}$$

En considérant la superficie du bassin versant (A_b en hectares), le coefficient de ruissellement (C_p) et l'intensité de la précipitation (I) (figure 6-3) pour les différentes récurrences, les débits de pointe (Q , m^3/s) ont été calculés, et sont présentés au Tableau 6-2. À noter que le facteur de laminage, F_L , n'a pas été considéré dans les calculs, car les débits seront laminés par le modèle de HEC-RAS.



Tableau 6-2 Débits en amont du Lac Tourbillon par la méthode rationnelle

Récurrences (ans)	Débit (m ³ /s)	Débit majoré 20 % pour les changements climatiques (m ³ /s)
2	5,89	7,06
5	7,49	8,99
10	8,54	10,24
20	9,48	11,37
40	10,51	12,62
100	11,81	14,17
1 000	15,33	18,40
10 000	18,78	22,53

6.3.3.2 Estimation des apports par la méthode de transposition

Une deuxième méthode de détermination de débit hydrologique a été réalisée selon la méthode de transposition de stations hydrométriques. Cette méthode consiste à réaliser l'analyse statistique sur une station hydrométrique ayant un bassin versant similaire au bassin versant du site à l'étude et de transposer les débits statistiques vers le bassin versant objet de l'étude.

Aucune station hydrométrique n'est présente sur le ruisseau Lamothe. Les stations avoisinantes du bassin versant à l'étude ont été comparées station par station selon les critères suivants :

- Aire du bassin versant (rapport d'aires entre 0,5 à 2);
- Similarité des caractéristiques des bassins versants (agricole, boisé, montagneux, etc.);
- Disponibilité des données.

Les stations avoisinantes avec une superficie similaire au bassin versant à l'étude étaient au minimum à 32 km du barrage X0001518. Les stations considérées sont présentées au Tableau 6-3.

Tableau 6-3 Stations comparées pour la transposition de bassins versants

Distance du barrage (km)	# Station (Québec)	Nom de la station	Lat.	Long.	Superficie du bassin versant (km ²)	Nombre d'années de données	De	À
32,33	050813	Décharge du lac Clair (à 500 m à l'aval du lac Clair)	46°57'52"	-71°40'5"	2,20	36	1988	2024
34,54	051002	Des Eaux Volées	47°16'18"	-71°9'41"	3,80	59	1965	2024
36,48	051004	Des Aulnaies (À 0,2 km en amont du chemin du Belvédère)	47°17'22"	-71°9'42"	1,10	58	1966	2024
34,63	051007	Des Aulnaies (À 30 m du ruisseau des Eaux Volées)	47°16'21"	-71°9'39"	3,70	53	1971	2024



La station retenue pour l'analyse est la station 051007, puisque la superficie de son bassin versant est la plus similaire à celui du site à l'étude, avec un rapport d'aires de $0,5 \leq 0,91 \leq 2$. Une analyse de débit de pointe n'a pas été réalisée, car l'utilisation du débit de pointe n'est généralement pas nécessaire pour les études en lien avec les barrages. La raison est que tout débit supplémentaire ajouté à partir d'un facteur de pointe est laminé par le réservoir du barrage et n'atteint donc pas la structure du barrage. Les débits moyens journaliers ont été utilisés pour l'analyse fréquentielle.

Le Tableau 6-4 présente les débits de la station 051007 transposés au site du barrage X0001518.

Tableau 6-4 Résultats de l'analyse fréquentielle des débits de la station 051007

Réurrence (ans)	Débit transposé au barrage X0001518 (m³/s)	Débit transposé au barrage X0001518 avec CC (m³/s)
2	1,14	1,37
5	1,71	2,05
10	2,10	2,52
20	2,50	3,00
40	2,90	3,48
100	3,44	4,13
1 000	4,93	5,91
10 000	6,61	7,93

6.3.3.3 Débits sélectionnés pour l'étude

Il est communément admis que les débits obtenus par la méthode rationnelle sont souvent surestimés et, bien que cela signifie que l'analyse pourrait être plus conservatrice, elle pourrait également donner des résultats irréalistes. Dans le présent cas, les débits de la méthode rationnelle sont environ 3 à 5 fois plus importants que ceux de la transposition de station. La calibration du modèle hydraulique a été impossible avec les débits de la méthode rationnelle. Il a donc été décidé d'utiliser les débits de la méthode de transposition de station, soit ceux présentés au Tableau 6-4, car la calibration avec ces débits s'est résulté par des niveaux d'eau quasi-identiques aux marques relevées.

6.3.4 Apports en aval du barrage

Les apports des bassins versants en aval du barrage sont déterminés en utilisant la méthode de transposition. Le rapport d'aires des bassins des entrées d'eaux #1 et #2 en aval du barrage sont respectivement de $0,5 \leq 0,83 \leq 2$ et de $0,5 \leq 1,12 \leq 2$.



Tableau 6-5 : Apports en aval du barrage du Lac Tourbillon

Réurrence (ans)	Débit transposé à l'entrée #1 en aval du barrage (m³/s)	Débit transposé à l'entrée #2 en aval du barrage (m³/s)
2	1,25	1,68
5	1,86	2,51
10	2,30	3,09
20	2,73	3,67
40	3,16	4,26
100	3,76	5,06
1 000	5,38	7,24
10 000	7,22	9,71

6.3.5 Apports de la rivière Montmorency

Le débit de la rivière Montmorency doit être calculé pour bien analyser les impacts de rupture du barrage X0001518. Une analyse statistique de débits a donc été réalisée selon la méthode de transposition de débits à partir de la station hydrométrique 051001. Cette station a un bassin versant 1107 km² et se trouve à l'aval de la zone à l'étude, sur la rivière Montmorency. À la page 7 de l'étude « Cartographie des zones inondables : Rivière Montmorency du Rapide des Trois-Sauts jusqu'à l'île Enchanteresse » (Mai 1994), la superficie du bassin versant de la rivière Montmorency à l'île Enchanteresse est de 1032 km², soit 7% inférieure à la superficie du bassin de la station 051001. L'étude utilisée est présentée à l'annexe B.

Les débits instantanés des années 1995 à 2024 ont été calculés et utilisés pour ajouter aux débits de l'étude de 1994. L'étude de 1994 avait déterminé les débits instantanés. Le Tableau 6-6 présente les débits instantanés de la rivière Montmorency transposés à l'exutoire du ruisseau Lamothe, soit à l'emplacement de l'île Enchanteresse.

Tableau 6-6 Débits de crue de la rivière Montmorency à l'endroit de l'île Enchanteresse

Réurrence (ans)	Débit instantané transposé (m³/s)	Débit instantané transposé avec CC (m³/s)
2	423,94	508,73
5	531,59	637,90
10	590,30	708,36
20	639,40	767,28
40	682,08	818,49
50	694,75	833,70
100	731,43	877,72
1000	831,62	997,94
10000	909,30	1091,16



6.3.6 Débits en condition hydrologique normale

Les débits en conditions normales utilisés pour l'étude correspondent au débit interannuel avec majoration pour les changements climatiques. En conditions normales, un débit constant de $0,134 \text{ m}^3/\text{s}$ est inséré en amont du barrage pour les conditions normales.

6.3.7 Débits de bases

Le débit de base utilisé pour toutes les simulations a été déterminé par le calcul de la moyenne des débits annuels moyens à la station 051007, transposés au barrage X0001518. Le débit de base constant dans le modèle avant l'arrivée de l'onde de crue est $0,112 \text{ m}^3/\text{s}$.

6.3.8 Développement des hydrogrammes de crues

Afin de développer un hydrogramme représentatif pour une crue au barrage X0001518, les données de débit instantané pour la station 051007 ont été analysées pour les années de 1995 à 2024.

L'hydrogramme choisi s'étend du 11 novembre 1995 au 14 novembre 1995. Durant cette période, un débit instantané de pointe de $7,96 \text{ m}^3/\text{s}$ a été enregistré à la station. Cet hydrogramme est illustré à la Figure 6-4.

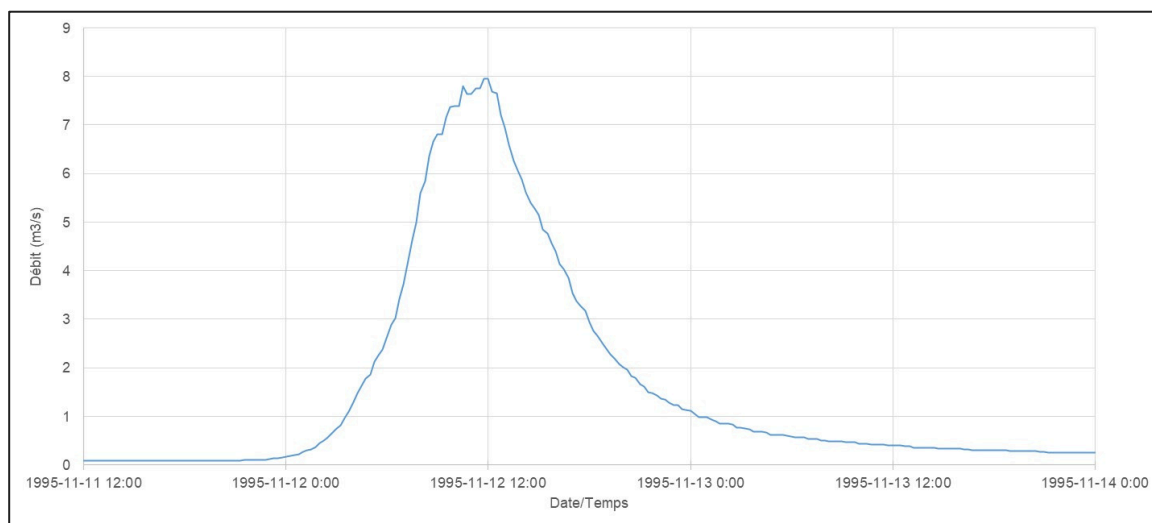


Figure 6-4 : Hydrogramme de crue à la station 051007

La forme de cet hydrogramme a ensuite été appliquée aux débits retenus pour les différentes récurrences. Les hydrogrammes des crues de récurrence 2, 5, 20, 40, 100 et 1000 ans, avec majoration pour les changements climatiques, insérés dans le Lac Tourbillon, en amont du barrage, sont illustrés dans la Figure 6-5. Les hydrogrammes insérés à l'entrée d'eau #1 en aval du barrage sont présentés à la Figure 6-6 et celui pour l'entrée #2 est présenté à la Figure 6-7.



Rapport de l'évaluation de la sécurité du barrage X0001518 du lac Tourbillon

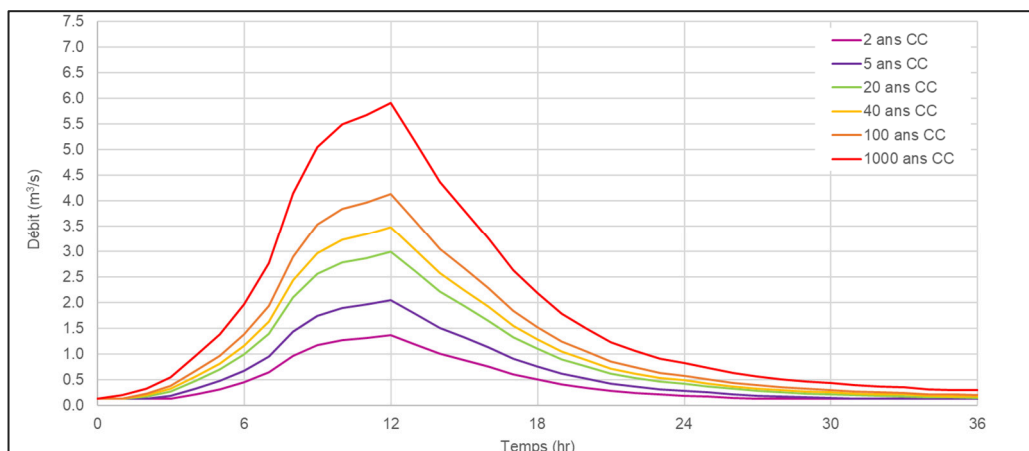


Figure 6-5 : Hydrogrammes des crues au barrage X0001518 pour les différentes récurrences

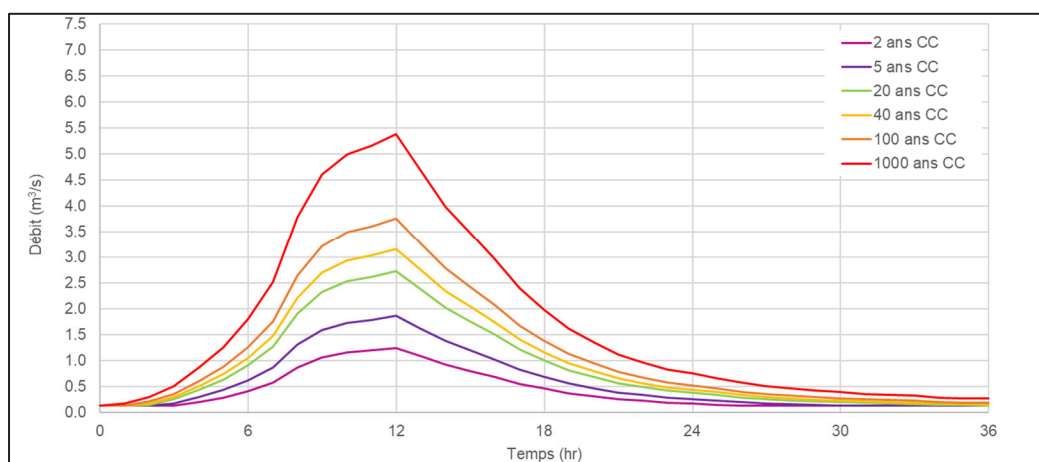


Figure 6-6 : Hydrogrammes des crues à l'entrée #1 en aval du barrage X0001518 pour les différentes récurrences

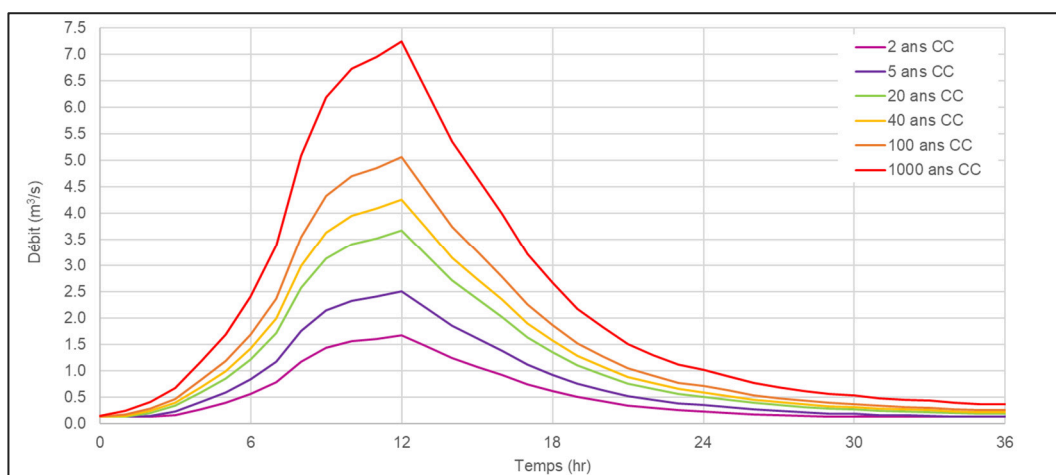


Figure 6-7 : Hydrogrammes des crues à l'entrée #2 en aval du barrage X0001518 pour les différentes récurrences



6.3.9 Laminage des crues

L'hydrogramme de la Figure 6-5. Présentée ci-dessus représente le débit non laminé qui entre dans le lac. Le modèle HEC-RAS, présenté dans la section 7 est un modèle 2D intégrant la bathymétrie. Le modèle hydraulique intègre donc la courbe d'emménagement, par conséquent, le laminage est directement interprété par le modèle.

6.3.9.1 Courbe d'évacuation du barrage

La formule d'un déversoir à l'écoulement libre est la suivante :

$$Q = C_d b H^{3/2} \sqrt{2g}$$

Où: C_d est le coefficient du déversoir,
 b est la longueur du déversoir en mètres,
 H est la hauteur de l'eau au-dessus du déversoir.

Le C_d utilisé pour l'écoulement au niveau du seuil est de 1,67 pour représenter un déversoir à seuil épais. La capacité d'évacuation a été calculée en utilisant la courbe A de la figure 9-68 (version 3 du document Design of Small Dams, USBR, 1987) avec un contrôle à l'entrée.

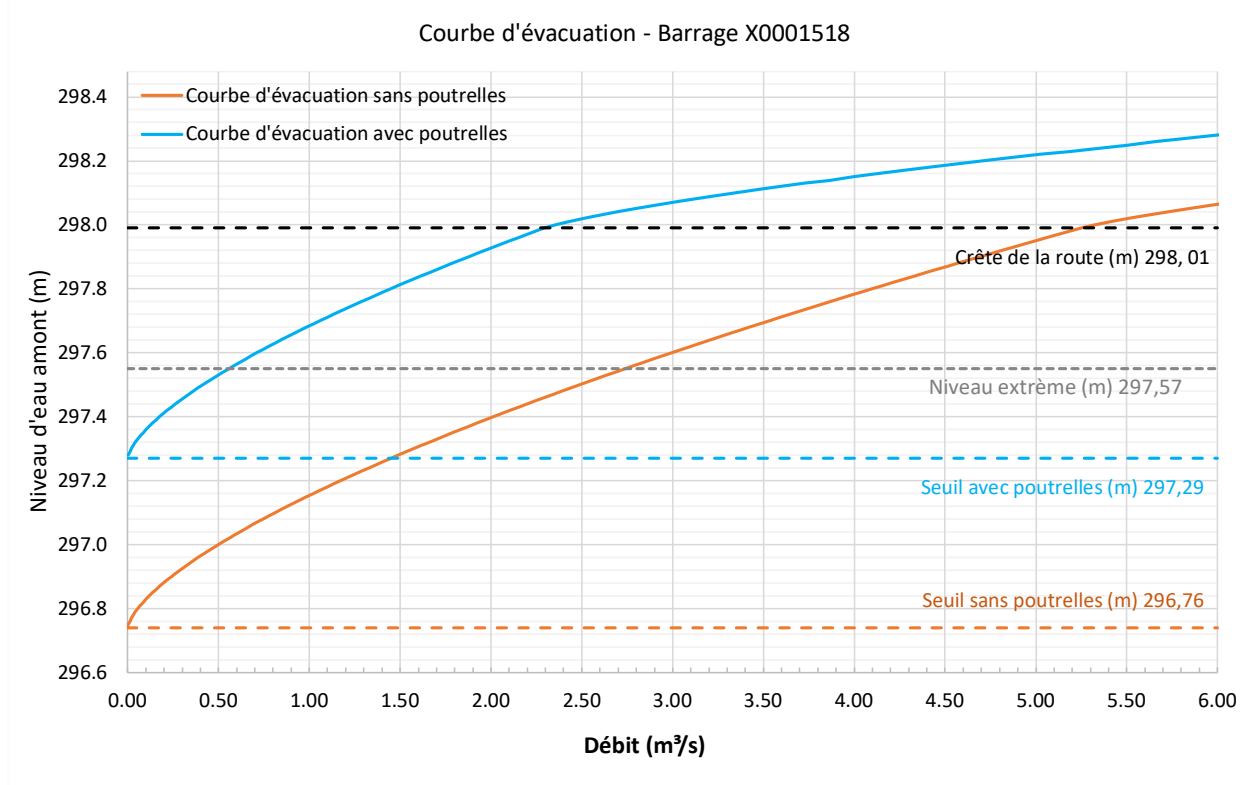


Figure 6-8 : Courbe d'évacuation du barrage X0001518



6.3.9.2 Courbe d'emmagasinement

La courbe d'emmagasinement du Lac Tourbillon a été extraite du modèle HEC-RAS contenant la bathymétrie la plus à jour (soit celle de 2023), puisque le logiciel calcule automatiquement celle-ci selon la bathymétrie du lac. Celle-ci est montrée à la Figure 6-9.

Le volume de rétention du barrage X0001518 est de 385 000 m³ selon la fiche technique publiée par le MELCCFP et le CEHQ. Le volume de la retenue révisée a été estimé conformément à l'article 3 du RSB, soit le volume retenu entre l'élévation du point bas du terrain naturel au pied aval du barrage (él. 294,64 m) et le niveau maximal d'exploitation (él. 297,39 m), soit le niveau le plus élevé atteint en exploitation normale (toutes les poutrelles en place en condition normale). Le volume actualisé au niveau maximal d'exploitation en excluant le volume d'eau entre le niveau du pied aval et le fond du lac est d'environ 260 000 m³.

Si on calcule le volume de rétention au niveau de la crête du barrage, celui-ci est d'une valeur de 390 000 m³, ce qui est similaire à l'emmagasinement montré au répertoire des barrages.

La différence observée entre les volumes de rétention extraits du modèle hydraulique et celui tiré du répertoire des barrages peut être occasionnée par deux facteurs, soit l'utilisation de la bathymétrie qui est plus précise et le niveau d'eau en condition normale.

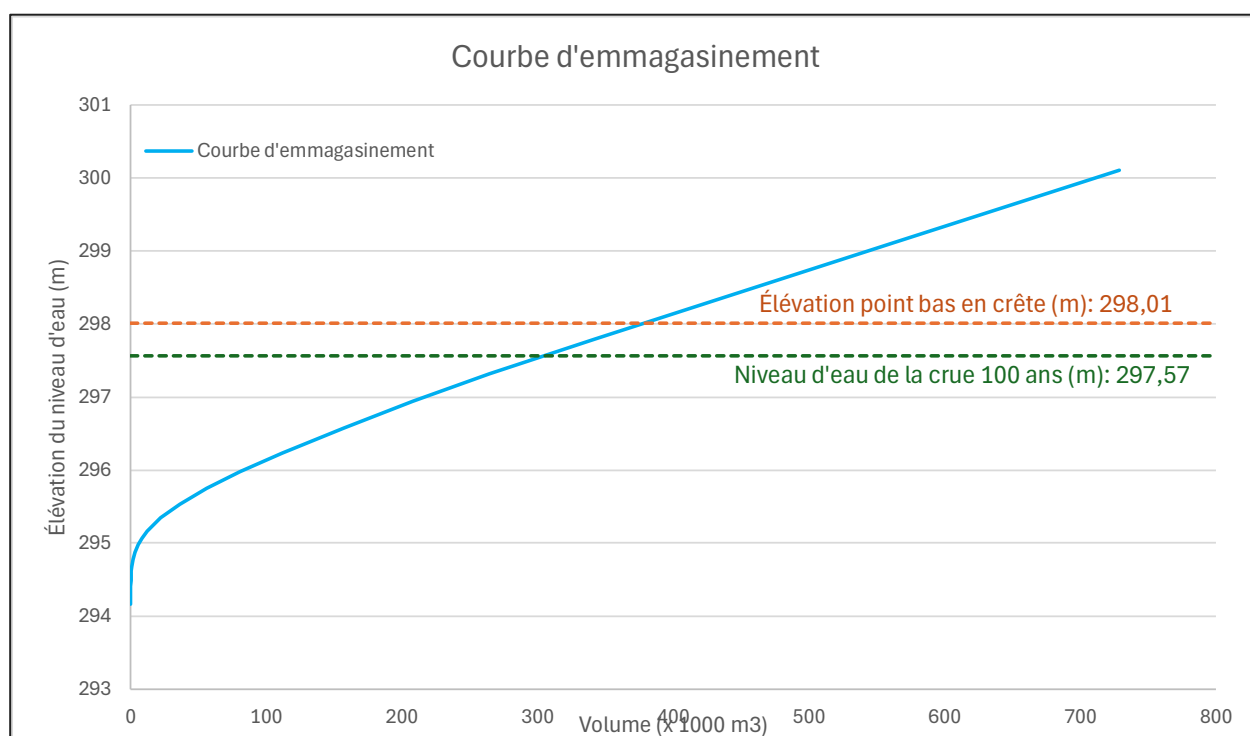


Figure 6-9 : Courbe d'emmagasinement du lac du barrage X0001518



6.3.9.3 Résultats du laminage

En crue centennale, le débit de pointe de l'hydrogramme sortant du barrage est de 2,35 m³/s alors que le débit de pointe de l'hydrogramme entrant au lac est de 4,13 m³/s. Il y a donc un effet de laminage.

7 Détermination du niveau de conséquences et de la crue de sécurité

Dans la présente analyse, le niveau des conséquences de la rupture est déterminé selon les caractéristiques du territoire affecté en aval du barrage et en considérant, parmi les scénarios de rupture, celui qui entraîne le niveau des conséquences le plus important.

7.1 Données de base

7.1.1 Développement d'un modèle hydraulique

7.1.1.1 Présentation et étendue du modèle hydraulique

Les modélisations nécessaires à l'étude de rupture ont été effectuées à l'aide du logiciel HEC-RAS 6.5, développé par le *United States Army Corps of Engineers* (USACE). Considérant la disponibilité de données numériques de terrain, l'utilisation d'un modèle bidimensionnel (2D) régime transitoire a permis de mieux représenter, les patrons d'écoulement, la variation des débits ainsi que la fluctuation du niveau d'eau lors du passage de l'hydrogramme de la crue et mieux caractériser les impacts et la propagation de l'onde de rupture.

La géométrie du modèle hydraulique du Barrage X0001518 comprend les éléments suivants :

- Une zone d'écoulement 2D représentant le barrage X0005020, et la plaine inondable autour du lac ainsi que la zone aval du barrage jusqu'à la rivière Montmorency. Le maillage comprend 52 677 cellules.
- Plusieurs structures sont représentées en aval. Des blocs de pierre en aval du barrage, un ponton piéton-bois, 3 ponceaux sur des chemins privés d'accès aux ressources sont également représentés en SA/2D.

Les figures Figure 7-1 à Figure 7-10 présentent les structures en aval.





Figure 7-1 : Structure en bloc de pierre PK 0+150m



Figure 7-2 : Structure en bloc de pierre PK 0+150m



Figure 7-3 : Pont acier-bois PK 2+270 m

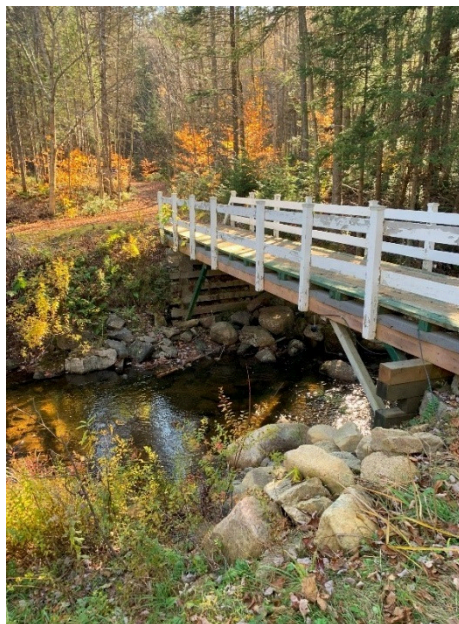


Figure 7-4 : Pont acier-bois PK 2+270 m



Figure 7-5 : Amont ponceau au PK 2+450



Figure 7-6 : Aval ponceau PK 2+450



Figure 7-7 : Amont ponceaux PK 2+550



Figure 7-8 : Aval ponceaux PK 2+550



Figure 7-9 : Amont ponceau au PK 3+ 375



Figure 7-10 : Amont ponceau au PK 3+375

Le Tableau 7-1 présente quelques caractéristiques des infrastructures de traverse en aval du barrage

Tableau 7-1 Données infrastructures de traverses en aval du barrage

Localisation	Diamètre/Ouverture (mm)	Soffite/couronne (m)	Source
Structure en bloc de pierre	3600	-	Relevé Stantec lors de la visite
Pont-piéton-Bois	7100	213,63	Relevé Stantec lors de la visite
Ponceau	1900	209,00	Relevé Stantec lors de la visite
Ponceau (3 ponceaux)	1500/600/600	205,9/204,8/203,65	Relevé Stantec lors de la visite
Ponceau	7100/4000	183,40 m	Relevé Stantec lors de la visite

7.1.1.2 Topographie et bathymétrie

Comme décrit à la section 6.3.1, un modèle numérique de terrain (Lidar) a été téléchargé du site Forêt Ouverte (21L14NE et 21L14NO) en guise de topographie du site à l'étude.

Les données bathymétriques proviennent de la bathymétrie réalisée en 2023 par le bureau de l'écologie appliquée pour le compte de la municipalité. Ces données ont été transmises sous un format raster par la municipalité. Stantec a également effectué un relevé de la bathymétrie à l'amont et à l'aval immédiat du barrage. Les données bathymétriques et topographiques ont été fusionnées aux données Lidar téléchargées pour former un modèle numérique de terrain complet.



À noter qu'un relevé des différents ouvrages de traverse entre le barrage du Lac Tourbillon et la rivière Montmorency a été également relevé. Ces données ont également été intégrées dans le modèle hydraulique. Ce relevé a permis d'ajuster localement la bathymétrie du ruisseau Lamothe à l'emplacement de ces ouvrages.

7.1.1.3 Conditions aux frontières

Les conditions aux frontières utilisées dans le modèle hydraulique sont les suivantes :

- Une condition à la frontière amont du modèle représentant les hydrogrammes des bassins versants à l'entrée du lac en amont du barrage X0001518;
- Une condition à la frontière représentant l'hydrogramme de chaque sous-bassin versant en aval du barrage;
- À la frontière aval, le ruisseau Lamothe se déverse dans la rivière Montmorency du modèle. Le tronçon de la rivière Montmorency modélisé est d'une longueur de 850 m, sa condition amont est une pente normale de 0,5% et sa condition aval est une pente normale de 0,4%. Ces pentes ont été calculées à l'aide du LIDAR à l'endroit concerné.

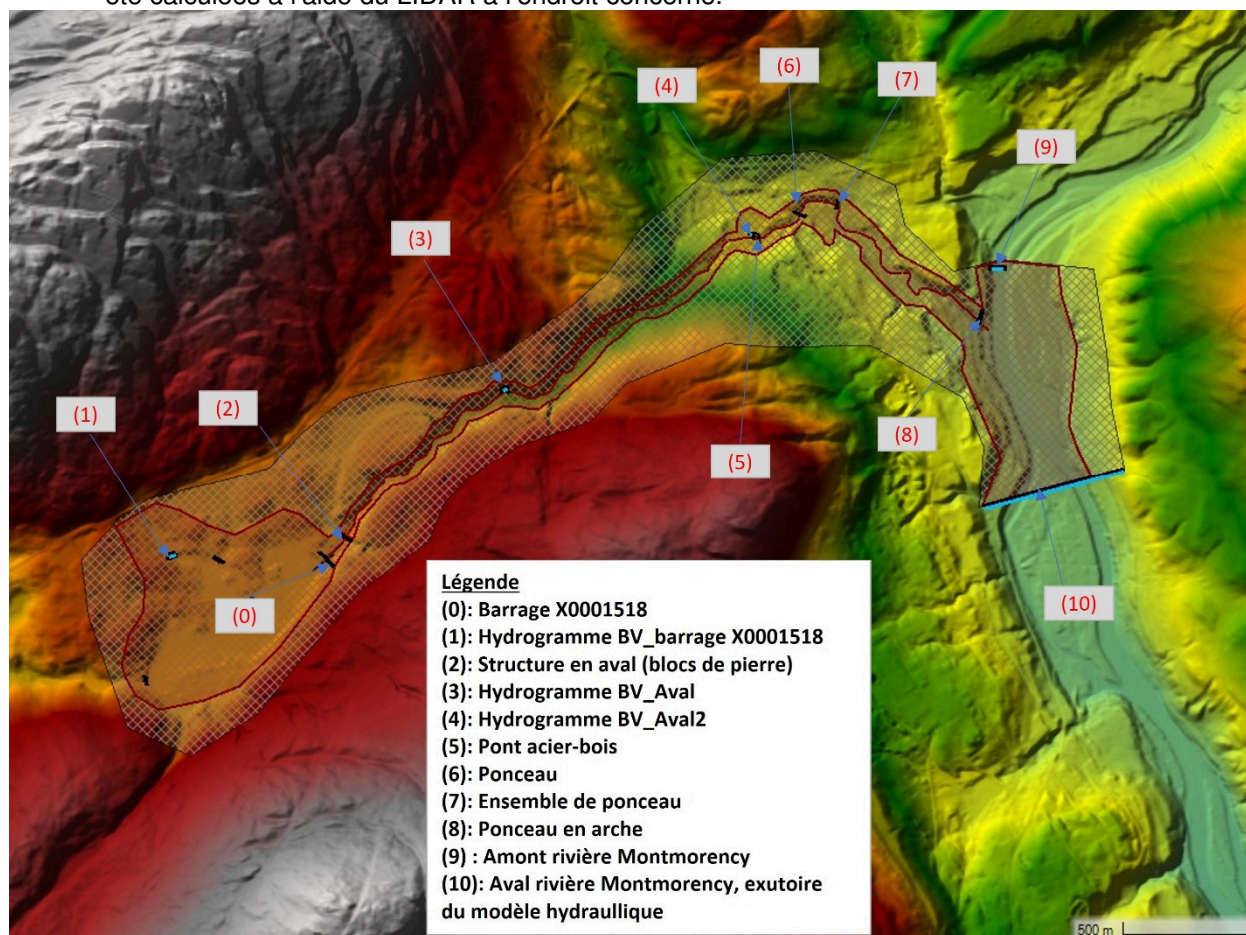


Figure 7-11 : Configuration du modèle hydraulique

7.1.1.4 Calibration du modèle

Lors de la visite de Stantec en septembre 2024, une trace du niveau des hautes eaux sur le muret de bois a été identifiée à environ 75 mm au-dessus du niveau de l'eau du jour. Ceci a été considéré comme la limite littoral (LL) dans le lac. L'eau du jour ayant été relevée à l'élévation 297,485 m, la LL observée et relevée sur le site est à l'élévation 297,56 m. La marque de la LL identifiée est présentée à la Figure 7-12.



Figure 7-12 : LL sur la face amont du barrage – 297,56 m

Des traces de la LL ont également été relevées sur les différentes structures à l'aval du barrage X0001518.

Le modèle HEC-RAS a été calibré à partir de la LL du lac. Le modèle est considéré comme étant calibré lorsque le passage de l'hydrogramme de la crue 2 ans sans majoration pour les changements climatiques génèrent un niveau d'eau dans le lac ayant un différentiel de 1 cm ou moins avec le niveau de la LL relevé. Le coefficient de rugosité Manning utilisé pour la rivière à l'étude est 0,04. Le coefficient pour les berges est de 0,055.

Le passage de la crue de récurrence 2 ans dans le modèle hydraulique génère une élévation du niveau d'eau dans le Lac Tourbillon d'exactly 297,56 m, le modèle est donc calibré et ses résultats sont considérés comme fiables.



7.2 Scénarios considérés et hypothèses de calculs

7.2.1 Définition de la brèche

Le guide « Barrages, crue de rupture et protection civile » (Marche, 2008) indique qu'un barrage en béton doit avoir une brèche rectangulaire (parois latérales verticales d'une pente de 0H:1V), une largeur équivalente à quatre fois la hauteur de l'ouvrage et un temps de formation de 0,1 heure. Un barrage en remblai doit avoir une brèche trapézoïdale (parois latérales d'une pente de 1H:1V), une largeur équivalente à quatre fois la hauteur de l'ouvrage et un temps de formation de 0,5 heure. Le barrage X0001518 étant de type écran de béton à l'amont d'une digue en terre, la rupture d'un barrage en remblai a été considérée pour la présente étude. Le barrage X0001518 a été rupturé au niveau maximum obtenu dans le réservoir. Les caractéristiques des brèches sont présentées au Tableau 7-2.

Tableau 7-2 Paramètres de rupture du barrage X0001518

	Condition normale (m)	Condition de crue (m)
Élévation du niveau d'eau	297,39	297,57
Élévation moyenne de la crête	298,190	298,190
Élévation de la base de la brèche	294,649	294,649
Largeur de la base de la brèche (m)	14,16	14,16
Débit de la brèche (m ³ /s)	43,53	50,49
Pentes des parois latérales	1H:1V	1H:1V
Temps de formation de la brèche (minutes)	30	30

7.2.2 Condition hydrologique normale

Dans cette étude, la condition hydrologique normale correspond au débit interannuel avec majoration pour les changements climatiques. Afin d'analyser les conséquences de la rupture du barrage en condition hydrologique normale, les deux scénarios suivants ont été analysés :

- Scénario 1 : Condition hydrologique normale avec changements climatiques et sans rupture du barrage;
- Scénario 2 : Condition hydrologique normale avec changements climatiques et avec la rupture du Barrage.

Selon le mode de gestion du barrage, en condition hydrologique normale, toutes les poutrelles sont en place. Par conséquent, dans les deux scénarios présentés ci-dessus, toutes les poutrelles sont en place. La Figure 7-13 présente le débit de la brèche en condition hydrologique normale.



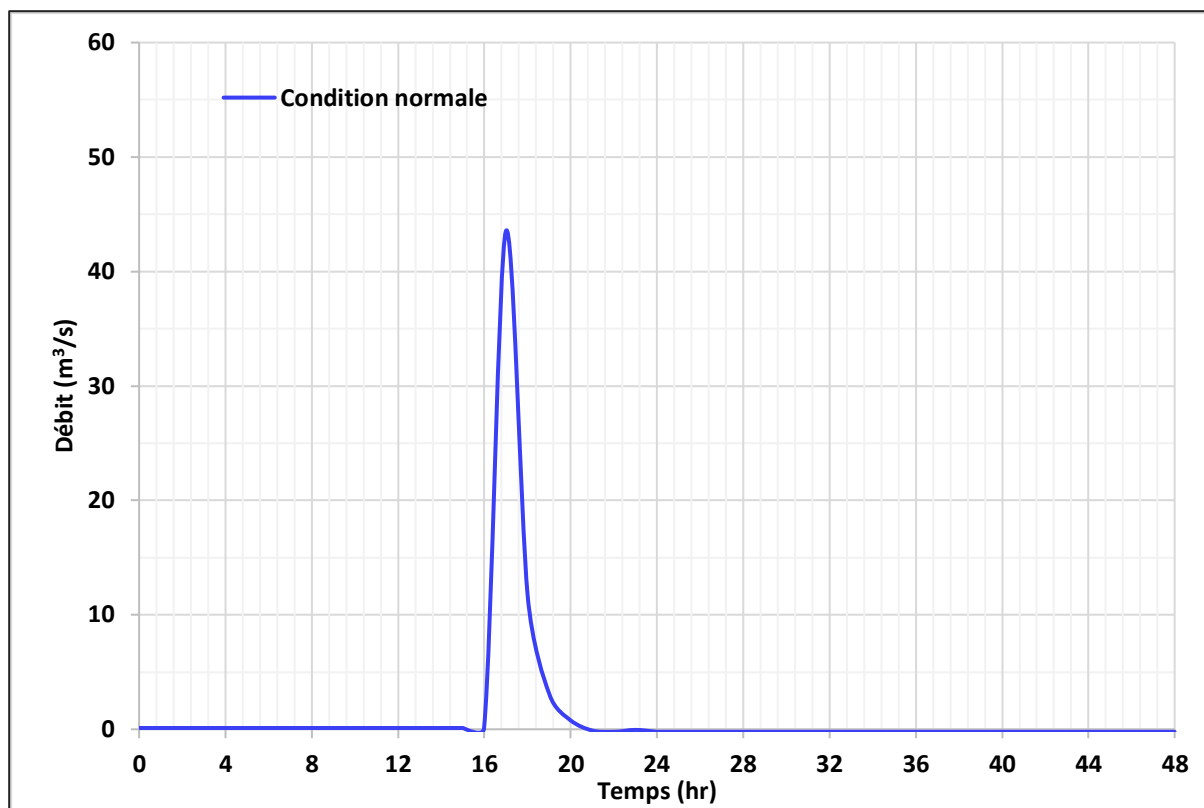


Figure 7-13 : Débit de brèche en condition hydrologique normale

7.2.3 Condition de crue

Dans cette étude, la crue de récurrence 100 ans a été analysée. Selon l'association des résidents du Lac Tourbillon lorsque le niveau d'eau atteint 80 sur la règle limnimétrique soit l'élévation géodésique 297,54 m, certains résidents sont à risque d'inondation. Aussi, selon la municipalité, le niveau trop haut du lac pourrait conduire à une contamination du lac par les fosses septiques et une contamination des puits.

Une analyse de sensibilité a été réalisée en variant l'ouverture des poutrelles au passage de la crue centennale sans aucune rupture du barrage pour évaluer le comportement du réservoir.

Tableau 7-3 : Analyse de sensibilité

Scénario analyse de sensibilité	Niveau d'eau du réservoir (m)	Niveau bas en crête (m)
Crue 100 ans CC*, une poutrelle retirée, aucune rupture du barrage	297,87	298,01
Crue 100 ans CC*, toutes les poutrelles retirées, aucune rupture du barrage	297,57	298,01

*CC Changements Climatiques



Au passage de la crue centennale, pour éviter la contamination du lac et les risques d'inondation, le scénario de la crue centennale avec les changements climatiques et toutes les poutrelles retirées a été retenu pour les analyses en condition de crue.

Afin d'analyser les conséquences de la rupture du barrage en condition de crue, les deux scénarios suivants ont été analysés :

- Scénario 1 : Crue 100 ans avec changements climatiques et sans la rupture du Barrage ;
- Scénario 2 : Crue 100 ans avec changements climatiques et avec la rupture du Barrage.

La Figure 7-14 présente le débit de la brèche pour une crue centennale.

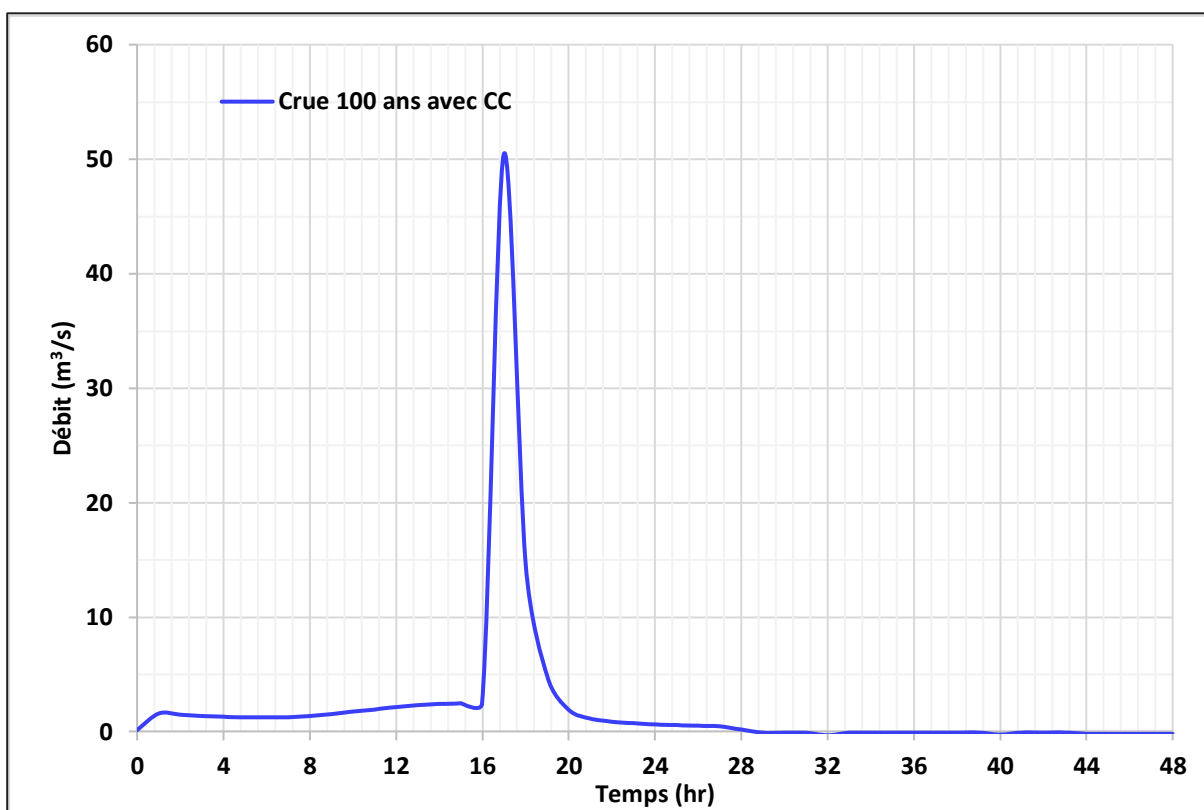


Figure 7-14 : Débit de la brèche lors de la crue de récurrence 100 ans

7.3 Caractéristique du territoire affecté

Selon l'article 18 du RSB, le territoire affecté correspond au territoire dont l'inondation est exclusivement attribuable à la rupture du barrage. Les sections 7.3.1 et 7.3.2 présentent le territoire affecté par la rupture du barrage en condition hydrologique normale et en condition de crue.



7.3.1 Rupture en condition hydrologique normale

Les résultats des simulations du scénario en condition normale sont présentés dans le Tableau 7-4 et le Tableau 7-5.

Tableau 7-4 : Résultats de la rupture en condition hydrologique normale pour le lac

Résultats		Condition hydrologique normale
Niveau d'eau max dans le lac (m)		297,39
Élévation du point bas en crête		298,01
Niveau d'eau max en aval du barrage, à l'exutoire du ponceau (m)	Sans rupture	295,22
	Avec rupture	296,29
Débit de la brèche (m ³ /s)		43,53
Revanche disponible du barrage (m)		0,62

Tableau 7-5 : Résultats de la rupture en condition hydrologique normale

Description	Type	Niveau d'eau sans la rupture	Niveau d'eau avec la rupture	Rehaussement du niveau d'eau	Niveau de la route	Vitesse sans la rupture	Vitesse avec la rupture
		(m)	(m)	(m)	(m)	m/s	m/s
Km 0+10	Aval du barrage	295,22	296,29	1,07	-	0,47	3,17
Km 0+075	Cabanon	294,53	295,8	1,27	-	0,13	3,64
Km 2+270	Pont piéton-bois	212,74	213,99	1,25	214,00	1,37	6,45
Km 2+450	Ponceau	207,99	210,3	2,31	209,33	1,61	1,86
Km 2+550	Triple ponceau	205,7	206,39	0,69	205,94	0,64	4,09
Km 3+375	Ponceau en arche	180	183,53	3,53	186,96	1,31	2,65

En condition normale hydrologique normale sans rupture incluant les changements climatiques, aucun point d'intérêt n'est affecté. La rupture du barrage X0001518 incluant les changements climatiques affecte 3 chemins privés d'accès aux ressources situé respectivement au km 2+450, au km 2+270 et au km 2+550. L'avenue Sainte-Brigitte (km 3+375) n'est pas affectée par la rupture du barrage. Néanmoins, le ponceau sur cette avenue pourrait entrer en charge. Les conséquences incrémentales liées à la rupture du barrage X0001518 sont 3 chemins privés d'accès aux ressources.



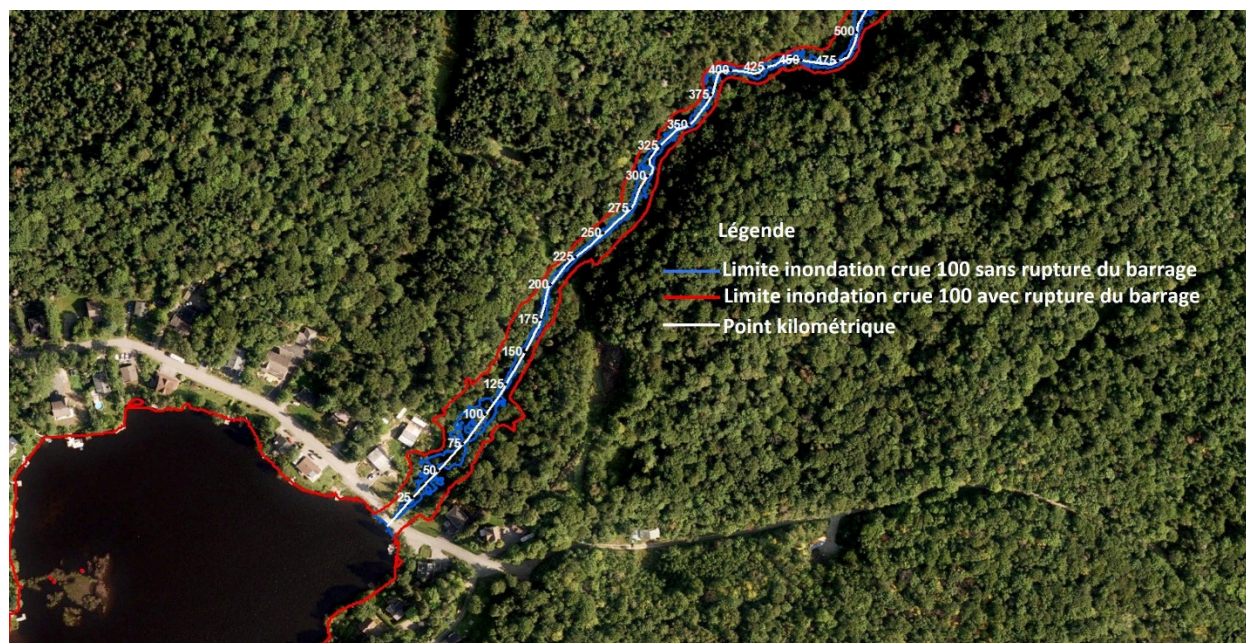


Figure 7-15 : Résultat de la rupture en condition hydrologique normale entre le PK 0 et le PK 0+500

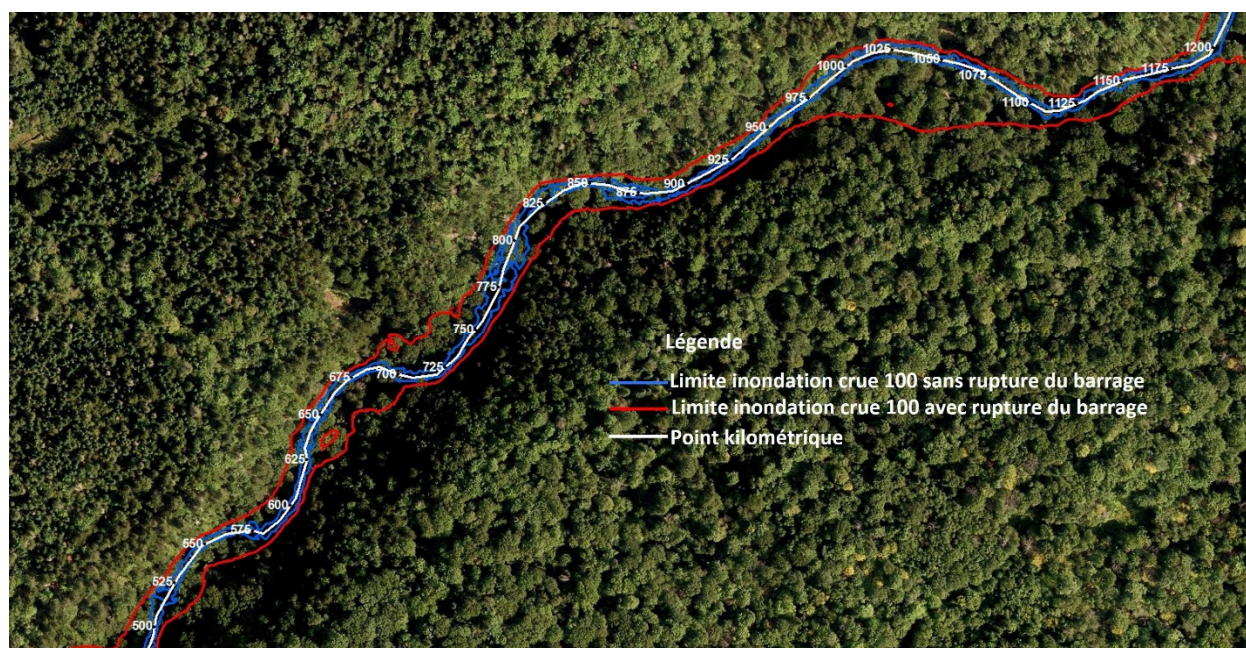


Figure 7-16 : Résultat de la rupture en condition hydrologique normale entre le PK 0+500 et le PK 2+200

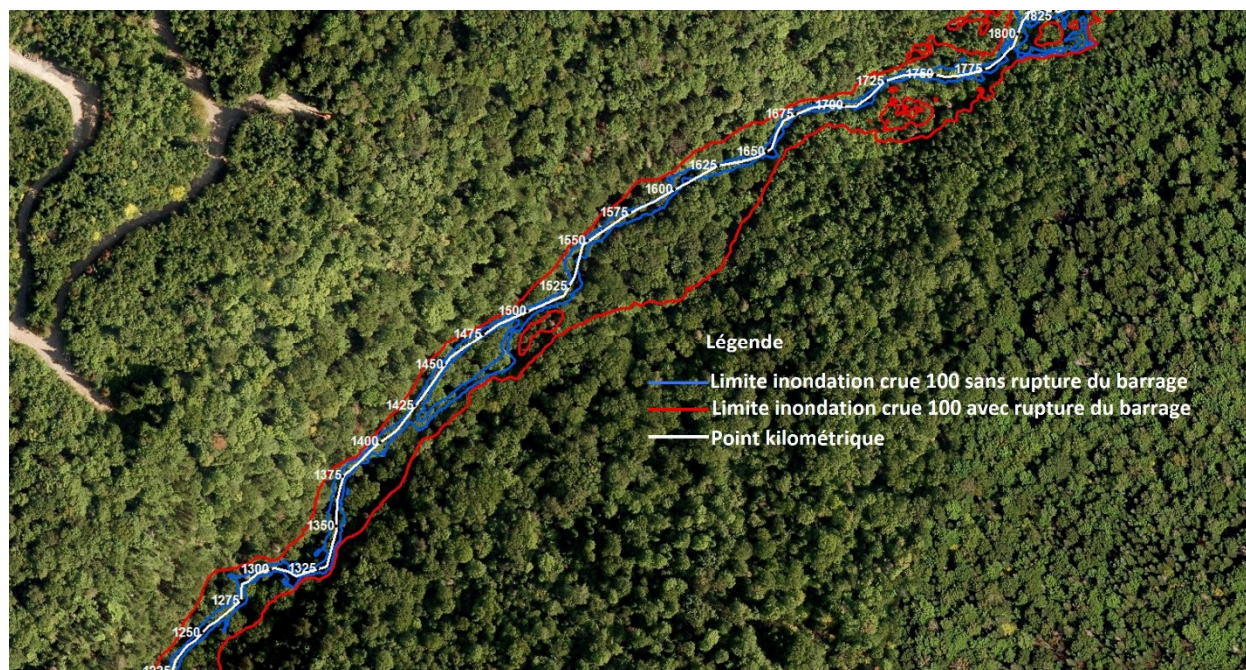


Figure 7-17 : Résultat de la rupture en condition hydrologique normale entre le PK 1+200 et le PK 1+825

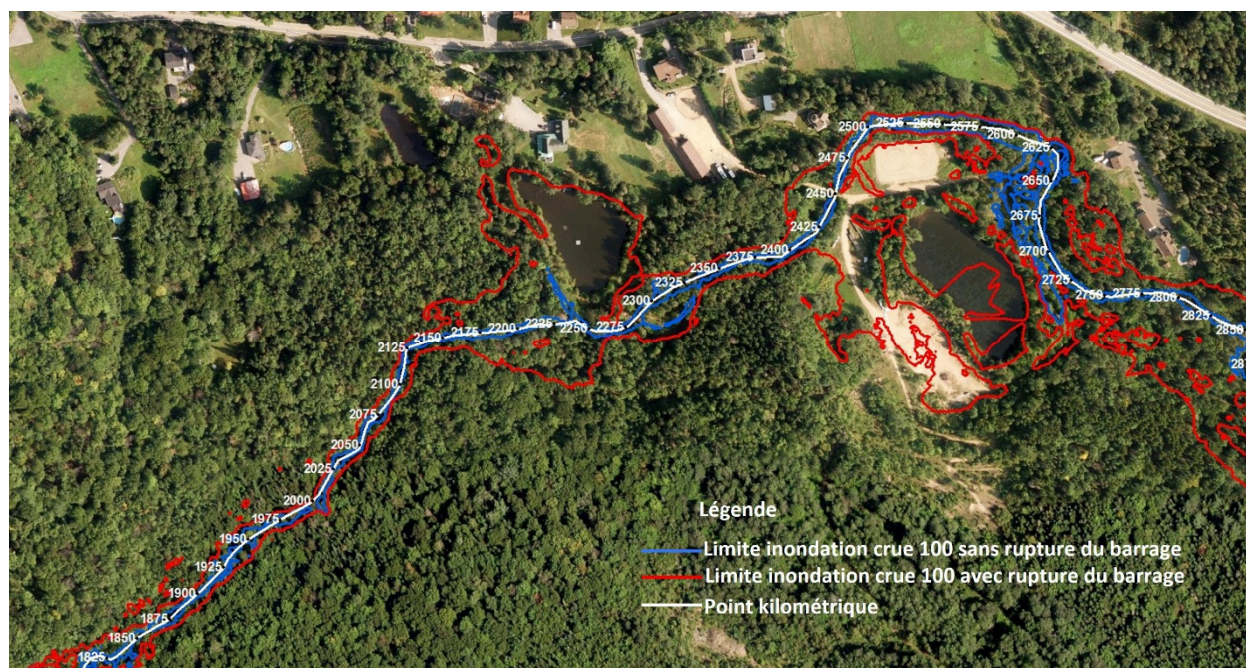


Figure 7-18: Résultat de la rupture en condition hydrologique normale entre le PK 1+825 et le PK 2+875

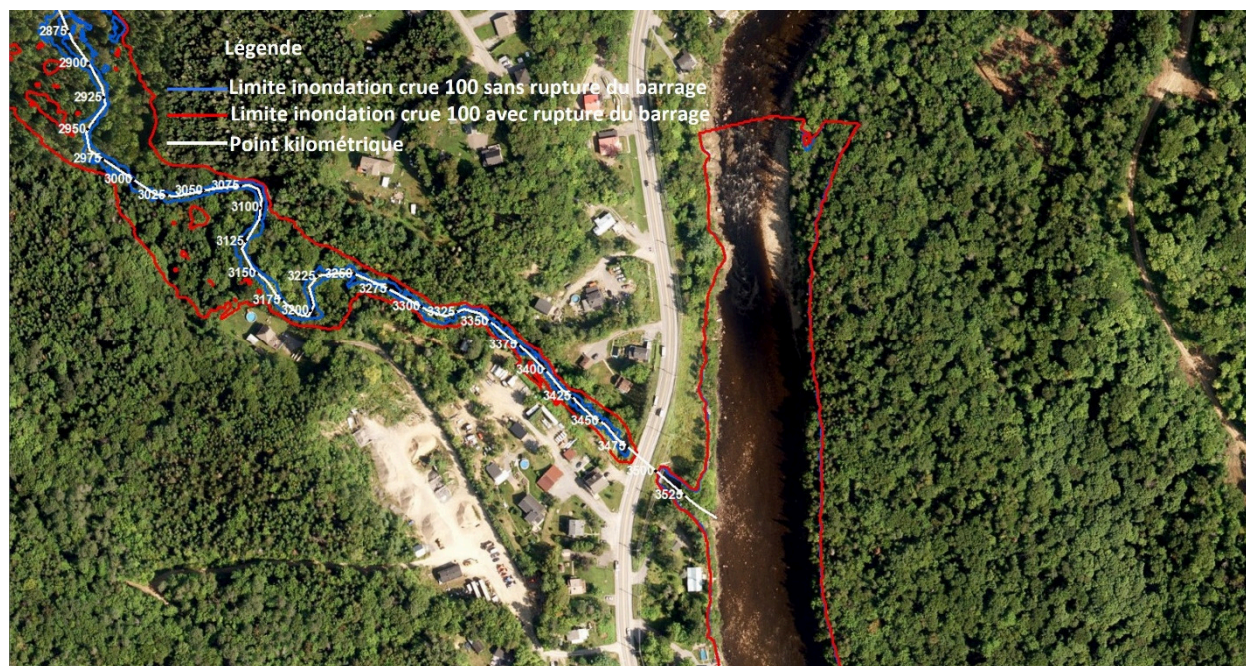


Figure 7-19 : Résultat de la rupture en condition hydrologique normale entre le PK 2+875 et le PK 3+525

7.3.2 Rupture en condition de crue

Les résultats des simulations du scénario lors de la crue centennale sont présentés dans le Tableau 7-6 et le Tableau 7-6

Tableau 7-6 : Résultats de la rupture en condition de crue centennale pour le lac

Résultats		100 ans avec CC
Niveau d'eau max dans le lac (m)		297,57
Élévation de la crête du barrage		298,01
Niveau d'eau max en aval du barrage, à l'exutoire du ponceau (m)	Sans rupture	295,48
	Avec rupture	296,75
Débit de la brèche (m ³ /s)		50,49
Revanche disponible du barrage (m)		0,44

Rapport de l'évaluation de la sécurité du barrage X0001518 du lac Tourbillon

Tableau 7-7 : Résultats de la rupture en condition en condition de crue centennale pour le lac

Description	Type	Niveau d'eau sans la rupture	Niveau d'eau avec la rupture	Rehaussement du niveau d'eau	Niveau de la route	Vitesse sans la rupture	Vitesse avec la rupture
		(m)	(m)	(m)	(m)	m/s	m/s
Km 0+10	Aval du barrage	295,48	296,75	1,27	-	3,27	3,31
Km 0+075	Cabanon	294,73	296,63	1,90	-	1,34	3,7
Km 2+270	Pont piéton-bois	213,15	214,03	0,88	214	4,47	6,52
Km 2+450	Ponceau	209,62	210,33	0,71	209,33	1,56	1,87
Km 2+550	Triple ponceau	206,02	206,41	0,39	205,94	7,41	9,7
Km 3+375	Ponceau en arche	180,65	183,50	2,85	186,96	1,92	2,16

En condition de crue 100 ans sans rupture incluant les changements climatiques, 2 chemins privés d'accès aux ressources situés respectivement au km 2+450 et au km 2+550 sont affectés. La rupture du barrage X0001518 incluant les changements climatiques affecte 3 chemins privés d'accès aux ressources situés respectivement au km 2+450, au km 2+270 et au km 2+550. Un cabanon situé au km 0+075 m est affecté. L'avenue Sainte-Brigitte (km 3+375) n'est pas affectée par la rupture du barrage. Néanmoins, le ponceau sur cette avenue pourrait entrer en charge. Les conséquences incrémentales liées à la rupture du barrage X0001518 en crue sont 1 chemin privé d'accès aux ressources. Le cabanon n'est pas considéré comme une conséquence incrémentale.

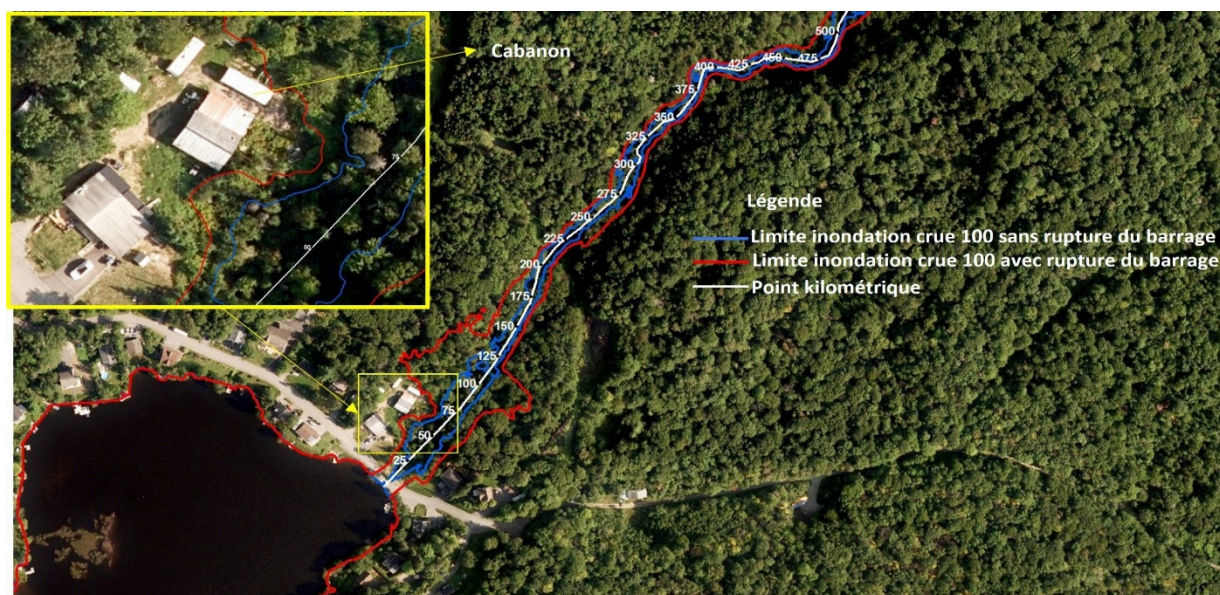


Figure 7-20 : Résultat de la rupture en condition de crue centennale entre le PK 0 et le PK 0+500



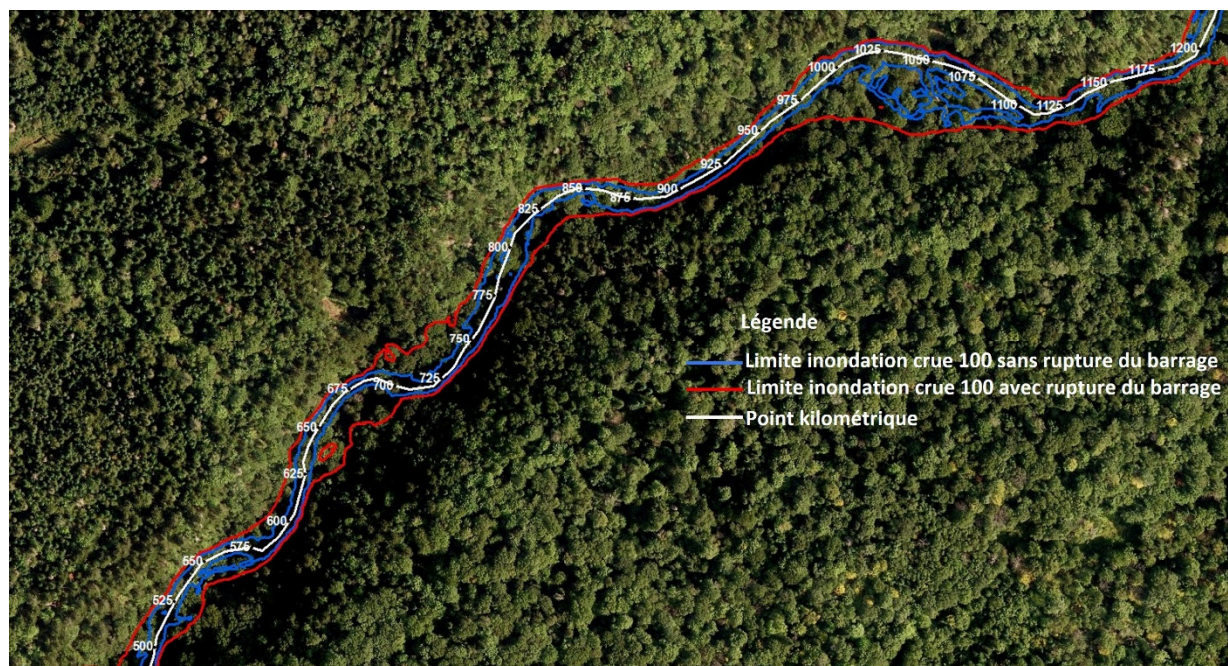


Figure 7-21 : Résultat de la rupture en condition de crue centennale entre le PK 0+500 et le PK 2+200

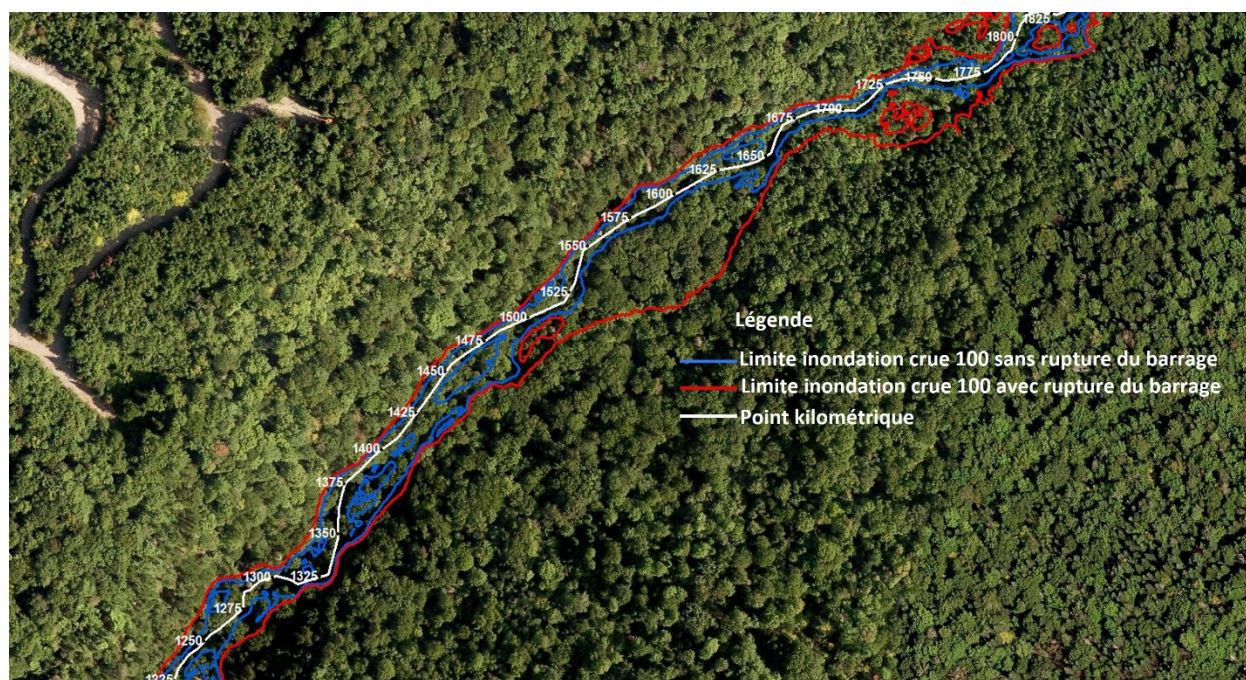


Figure 7-22 : Résultat de la rupture en condition de crue centennale entre le PK 1+200 et le PK 1+825

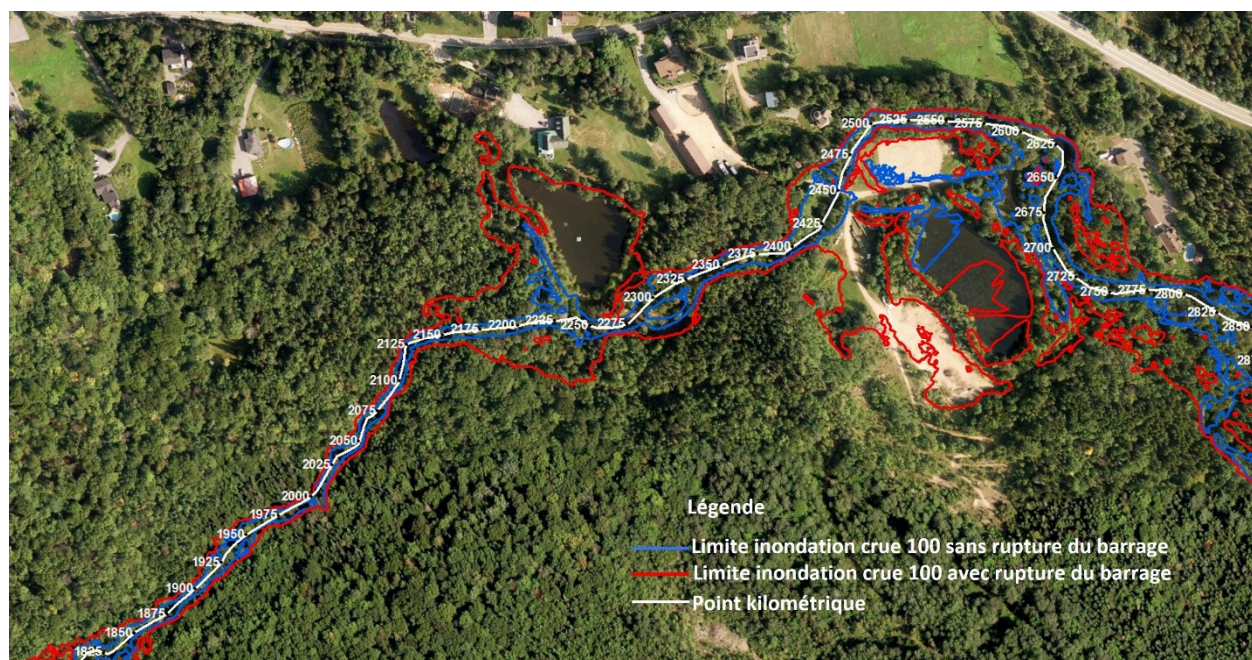


Figure 7-23 : Résultat de la rupture en condition de crue centennale entre le PK 1+825 et le PK 2+875

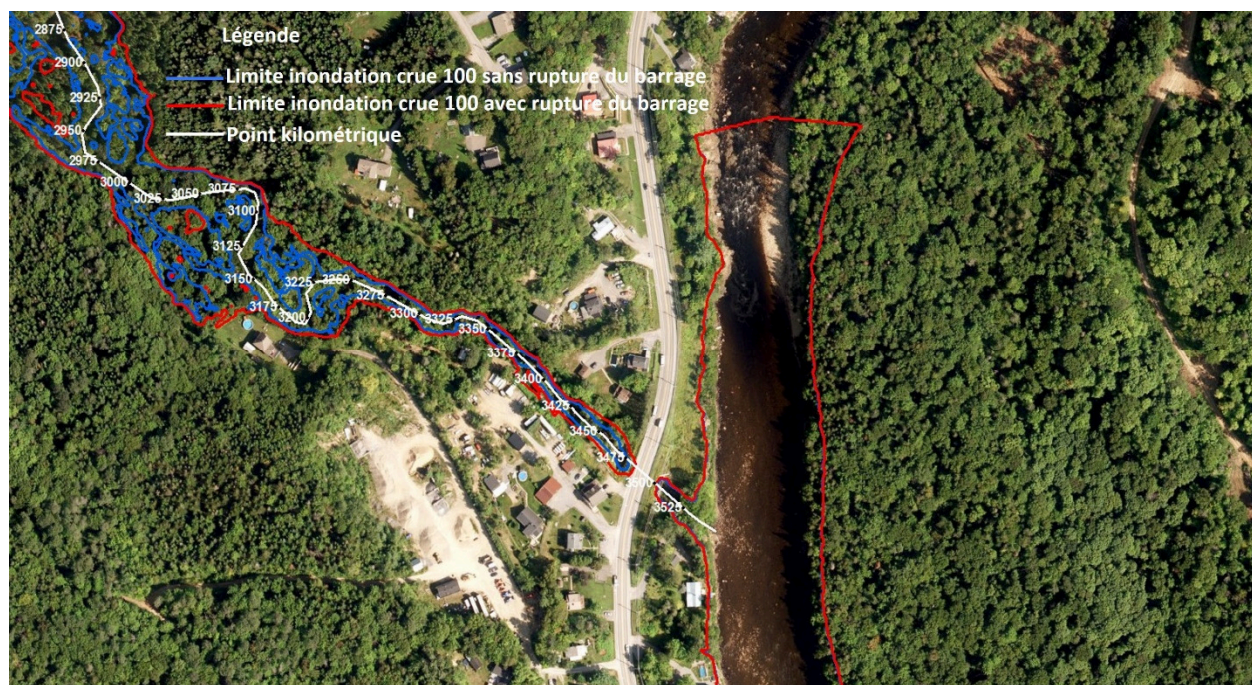


Figure 7-24 : Résultat de la rupture en condition de crue centennale entre le PK 2+875 et le PK 3+525

7.4 Niveau des conséquences en cas de rupture du barrage

En condition normale, 3 chemins privés d'accès aux ressources sont affectés par l'incrément lié à la rupture. Le niveau des conséquences est donc « **Minimal** », selon les caractéristiques du territoire affecté de l'annexe V du RSB. Le Tableau 7-8 présente les infrastructures affectées par la rupture du Barrage X0001518 en condition hydrologique normale.

Tableau 7-8 Synthèse des infrastructures affectées en condition hydrologique normale

Nombre total d'infrastructures affectées	Rupture du Barrage X0001518
Chemin privé d'accès aux ressources	3

En période de crue, 1 chemin privé d'accès aux ressources est affecté par l'incrément lié à la rupture, le niveau des conséquences est donc « **Minimal** », selon l'annexe V du RSB. Le Tableau 7-9 présente les infrastructures affectées par la rupture du Barrage X0005020 en condition de crue.

Tableau 7-9 Synthèse des infrastructures affectées en condition de crue centennale

Nombre total d'infrastructures affectées	Rupture du Barrage X0005020
Chemin d'accès aux ressources	1

Le niveau des conséquences en condition hydrologique normale est « **Minimal** » et en condition de crue centennale est également « **Minimal** ». Le niveau des conséquences retenu pour le barrage est donc « **Minimal** ».

7.5 Crue de sécurité de l'aménagement

Le niveau des conséquences en cas de rupture en période de crue pour le Barrage X0001518 a été établi à « **Minimal** », conformément à l'annexe V de l'article 17 de la RBS. Selon l'article 21 du RSB, la **crue de sécurité** correspondant à ce niveau des conséquences est la **crue centennale**.

7.6 Cartes d'inondation

Selon l'article 18 du RSB, seule une caractérisation du territoire qui serait affecté par la rupture est requise lorsque le niveau des conséquences est « **Minimal** » ou « **Faible** ». Par conséquent, les cartes d'inondation ne sont pas requises.



7.7 Étude de vagues et revanche requise

7.7.1 Choix de la station météorologique

La station météorologique d'Environnement Canada enregistrant des vitesses horaires de vent, étant située à proximité du site à l'étude et présentant une situation géographique similaire est celle de Valcartier A (No. 7018574). Celle-ci est située à 21,1 km du site et a des données de direction et de vitesse de vent ainsi que de température de l'air disponibles entre 1978 et 2024. Cette station a donc été sélectionnée et ses données ont été téléchargées pour la période disponible. La Figure 7-25 montre l'emplacement du barrage X0001518 par rapport à l'emplacement de la station Valcartier A.

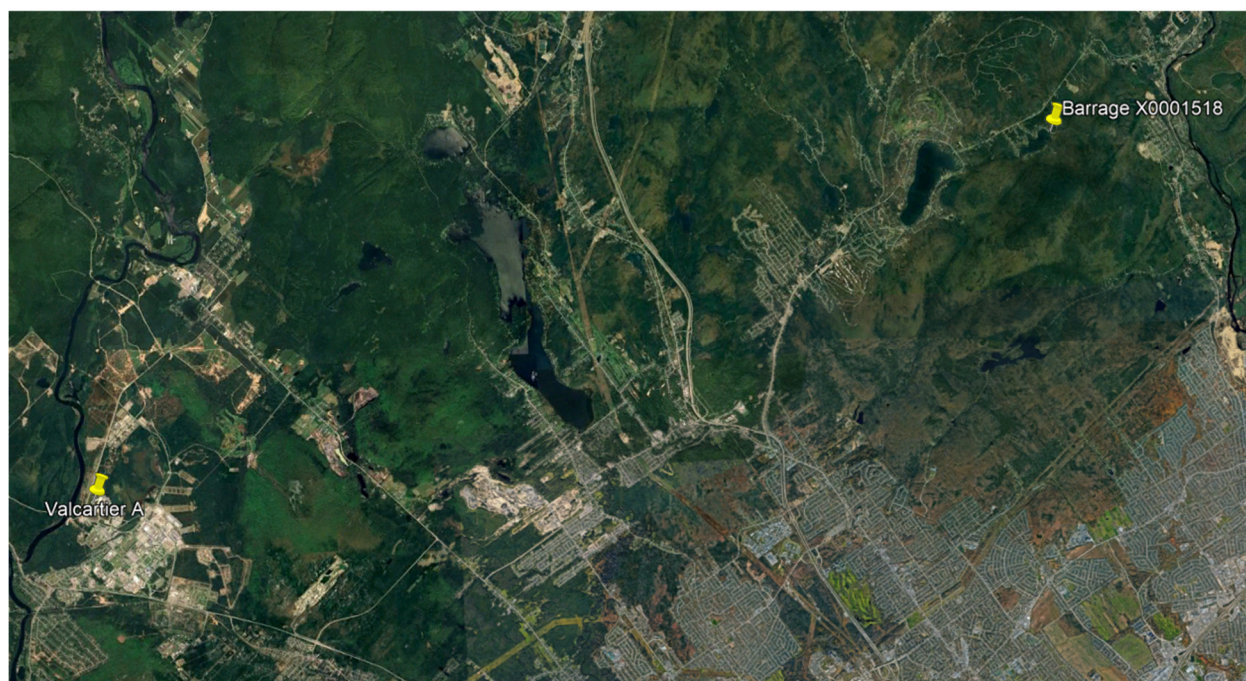


Figure 7-25 : Localisation de la station météorologique

7.7.2 Méthode du fetch effectif

Le point offrant les plus longues distances ininterrompues de fetchs a été choisi pour la présente subdivision comme foyer à partir duquel des distances de fetchs ont été tracées sur des surfaces d'eau continues, tel que montré sur la Figure 7-26. La longueur et l'angle de chaque ligne (fetchs directs) sont utilisés dans les calculs des vagues. Le *Shore Protection Manual (USACE (1984))* est utilisé pour déterminer la hauteur des vagues et le *Highways in the Coastal Environment, 3rd edition (FHWA [2020])* est utilisé pour dimensionner les enrochements de protection. Les vents soufflant dans les 8 directions sont utilisés dans cette méthode. La Figure 7-26 montre les fetchs utilisés pour le site à l'étude.



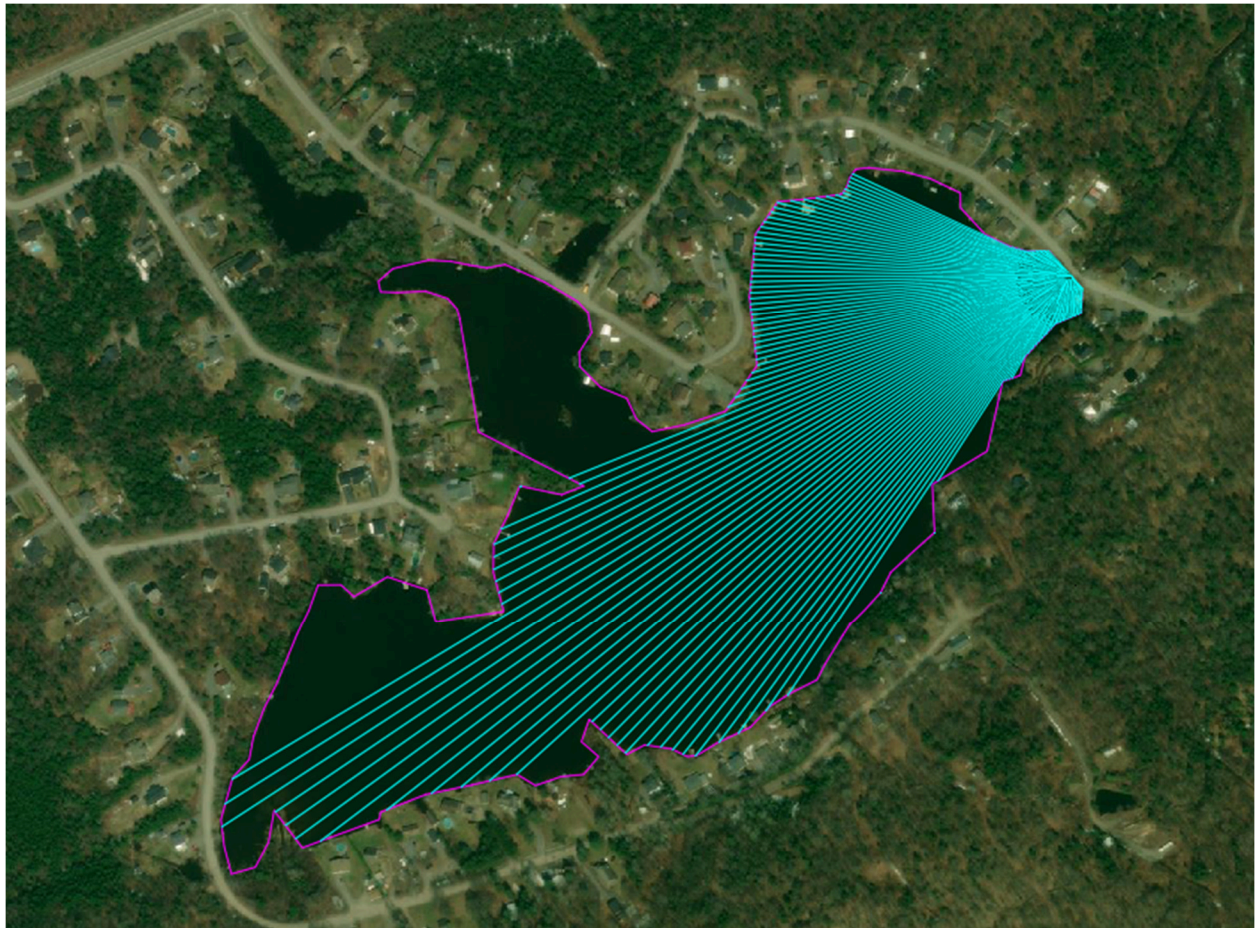


Figure 7-26 : Fetchs directs pour le site à l'étude

7.7.3 Hauteurs de vagues

Le vent soufflant continuellement avec la même direction sur le plan d'eau occasionne une surélévation de ce dernier (Wind Setup), tandis que l'inclinaison de la berge occasionne une certaine remontée des vagues (Wave Runup). Ces deux hauteurs, la surélévation du plan d'eau et la remontée des vagues sont combinées pour former la remontée maximale de l'eau. Pour le calcul de la surélévation du plan d'eau, une profondeur d'eau moyenne de 1,73 mètres est utilisée pour le lac tel que présenté dans la carte bathymétrique du lac. Les caractéristiques principales des vagues calculées selon la méthode ci-dessus sont présentées au Tableau 7-10.

Tableau 7-10 : Vagues au site à l'étude

Réurrence	Hauteur 95 % des vagues (H _{5%}) (m)
2 ans	0,11
10 ans	0,14
100 ans	0,17
1000 ans	0,19

7.7.4 Enrochement de protection contre les vagues

L'ouvrage *Highways in the Coastal Environment, 3rd edition (FHWA, 2020)* est utilisé pour déterminer les enrochements de protection. Le Tableau 7-11 présente les enrochements nécessaires selon la hauteur de vague de conception de 0,17 m.

Tableau 7-11 : Enrochement de protection pour le barrage du Lac Tourbillon – Pente de talus (2,7H : 1V)

Dimension maximale D _{max} (mm)	Dimension minimale D _{min} (mm)	D ₅₀ (mm)	Épaisseur (mm)
200	100	150	300

Le calibre standard 100-200 mm (D₅₀ de 150 mm), normalisé par le ministère des Transports et de la mobilité durable, est recommandé.

Il est important de mentionner que la densité des pierres utilisées pour les calculs est de 2650 kg/m³. Si une pierre ayant une densité inférieure est utilisée, le calcul de dimensionnement des pierres devrait être refait avec la nouvelle densité.

7.7.5 Revanche requise

La revanche requise est la hauteur nécessaire entre le niveau d'eau et le point bas de la crête de la digue. Cette revanche sert à s'assurer qu'aucun débordement par-dessus la digue ne se produit par les vagues. La revanche minimale requise correspond à l'élévation maximale entre :

- Niveau maximum d'exploitation additionnée de la surélévation du plan d'eau et remontée des vagues d'une tempête de récurrence 1:1000 ans;
- Niveau d'eau de la crue de sécurité additionnée de la surélévation du plan d'eau et remontée des vagues d'une tempête de récurrence 1:10 ans.

Les revanches requises sont présentées au Tableau 7-12.



Tableau 7-12 Niveau minimal de la crête pour respecter la revanche requise

Niveau minimal de la crête (m)		
Hauteur de la vague (Récurrence 1:1000 ans) (m)	0,19	297,58
Niveau du Lac Tourbillon (Conditions normales) (m)	297,39	
Hauteur de la vague (Récurrence 1:10 ans) (m)	0,14	297,71
Niveau du lac Tourbillon (Conditions de crue de sécurité, récurrence 1:100 ans) (m)	297,57	

En conditions normales, la revanche correspond à la hauteur des vagues de récurrence 1000 ans, soit 0,19 m. Le niveau minimal du dessus de la digue correspond donc au niveau d'eau normal (297,39 m) additionné de la revanche requise (0,19 m). Le niveau minimal du dessus de la digue est donc de 297,58 m.

En conditions de crue de sécurité, la revanche correspond à la hauteur des vagues de récurrence 10 ans, soit 0,14 m. Le niveau minimal du dessus de la digue correspond au niveau d'eau de récurrence 100 ans (297,57 m) additionné de la revanche requise (0,14 m). Le niveau minimal du dessus de la digue est donc de 297,71 m. Ce niveau est plus élevé que celui requis en conditions normales, il est donc recommandé.

Actuellement, le niveau le plus bas de la digue est de 298,01 m soit 30 cm plus haut que le niveau de la revanche requise. Le niveau de la digue est donc conforme et la digue ne sera pas submergée par les vagues.



8 Analyse de fermeture au pourtour du réservoir

Selon l'article 49.0.1 du RSB, dans le cadre d'une ÉÉS, il est important d'examiner la fermeture du lac et d'évaluer s'il existe des endroits par lesquels un déversement pourrait se produire lors du passage de la crue de sécurité. La fermeture du lac a été vérifiée à l'aide des données Lidar. Le niveau d'eau correspondant à la crue de sécurité est 297,57 m et montre qu'il n'y a pas de déversement sur le pourtour du lac. La Figure 8-1 présente la fermeture du lac.

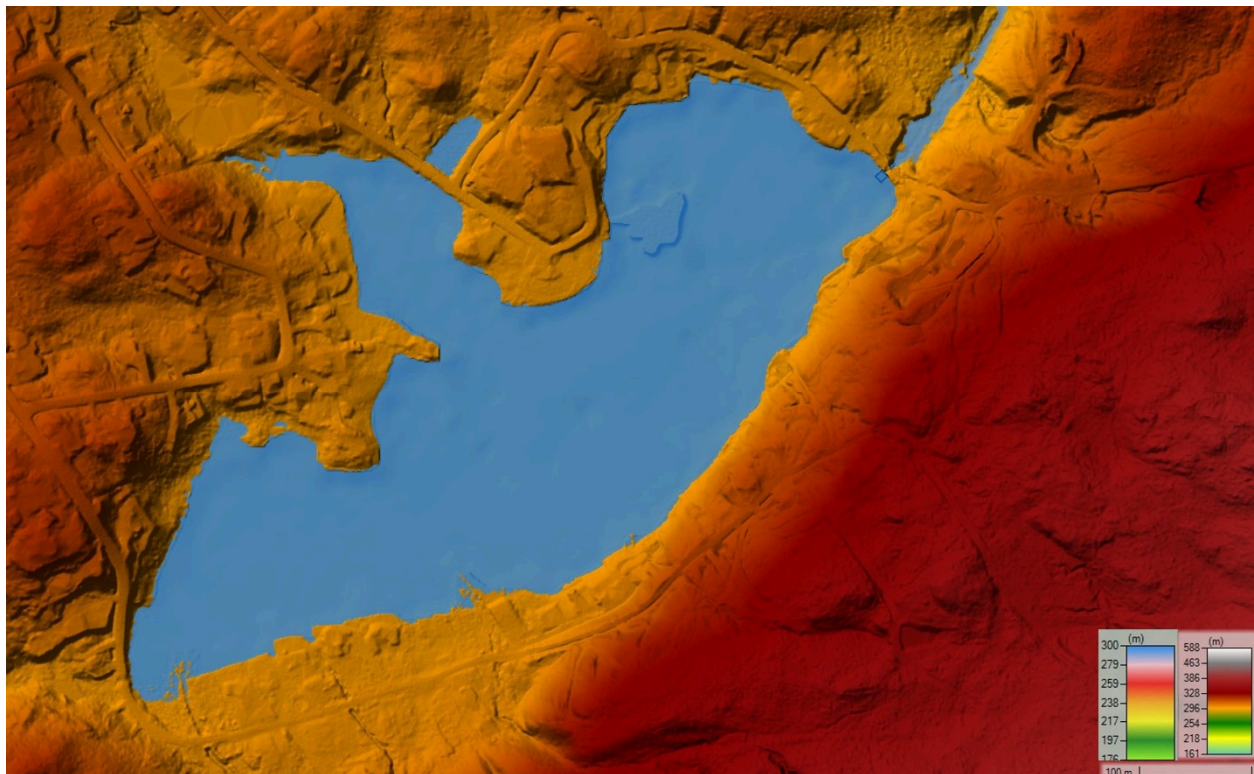


Figure 8-1 : Fermeture du réservoir

9 Détermination du classement du barrage

9.1 Année de construction et année de modification

Selon le répertoire de barrage du MELCCFP, le barrage X0001518 a été construit en 1990 et a subi des modifications en 1998, l'ouvrage a donc 34 ans. Selon l'annexe III du RSB, la mesure de la vulnérabilité d'un barrage en remblai âgé de 30 ans est de 2,5 points, alors que celle d'un barrage en remblai de 40 ans est de 2 points. L'attribution des points en fonction de l'âge étant linéaire, le barrage X0001518 obtient un pointage de 2,25.

9.2 Hauteur du barrage

Selon le répertoire des barrages du MELCCFP, le barrage est d'une hauteur de 3,54 m et l'annexe II du RSB indique que le nombre de points est de 1 pour un barrage entre les hauteurs de 0 à 5 m.

9.3 Type de terrain de fondation

Selon le répertoire des barrages du MELCCFP, le barrage a été construit sur un terrain de type « Till », ce qui équivaut à 4 points selon l'annexe II du RSB.

9.4 État du barrage

L'état du barrage X0005020 et son dispositif d'évacuation sont considérés « Acceptable » suite aux observations lors de l'inspection hydraulique et géotechnique.

9.5 Fonctionnalité et fiabilité des appareils d'évacuation

L'analyse de la fonctionnalité et de la fiabilité de l'appareil d'évacuation a été faite en se basant sur le guide sur l'évaluation de la fiabilité des appareils d'évacuation (DSB, 2010). Ce guide identifie différents critères ainsi que l'évaluation qualitative de ces critères en vue de définir la fiabilité des appareils d'évacuation ne nécessitant pas une gestion. Le Tableau 9-1 présente une synthèse des critères d'évaluation.



Rapport de l'évaluation de la sécurité du barrage X0001518 du lac Tourbillon

Tableau 9-1 : Vérification des critères permettant l'évaluation de la fiabilité des appareils d'évacuation dont la gestion est requise

Critères	Évaluation qualitative des critères			Résultats	
	Adéquate	Acceptable	Inadéquate	Barrage X0001518	Justification
Présence d'un appareil de levage manuel	Présent	Aucune fonctionnel	Aucun fonctionnel ni disponible	Adéquat	Présent et neuf. En bon état de fonctionnement.
Historique d'entretien et de fonctionnement en période de crue	Disponible	Aucun	Aucun	Acceptable	La gestion des poutrelles du barrage est faite selon les prévisions météorologiques et les observations.
Données et prévisions hydrologiques	Disponible	Aucun	Aucun	Acceptable	Pas de prévision hydrologique. Toutefois, le responsable de la gestion anticipe l'opération à réaliser en fonction de la prévision météorologique.
Présence d'un gardien sur le site. Accessibilité au site pour la gestion des barrages en temps de crue	Gardien présent sur le site. Accès facile au site	Aucun gardien sur le site. Site accessible en tout temps par le responsable.	Aucun gardien sur le site. Site qui est difficilement accessible.	Acceptable	Aucun gardien du barrage. Le site est facilement accessible par tous et en tout temps.
Accessibilité de l'appareil d'évacuation	Accessible	Accessible par une passerelle	Inaccessible	Adéquat	Très accessible.
Accessibilité à une source d'énergie supplémentaire	Redondance de sources	Absent ou à proximité	Non disponible	Adéquat	Pas de source d'énergie supplémentaire. Cependant, aucune alimentation électrique n'est nécessaire au barrage.
Système de déglace	Disponible ou en place	Mesure préventive	Aucun	Acceptable	La sécurité publique de la municipalité retire les appareils de levage durant l'hiver.
Temps requis pour accéder au site et ouvrir l'appareil d'évacuation	Inférieur au temps de montée de la crue	-	-	-	Variable
Gestion du barrage	Automatisée	-	-	-	Manuelle.

Comme le montre le Tableau 9-1, 1 critère de la fiabilité des appareils d'évacuation est jugé inadéquat, 3 autres critères sont jugés adéquats et 3 critères sont jugés acceptables. La fiabilité des appareils d'évacuation est jugée dans son ensemble acceptable.



9.6 Niveau de conséquences

Le niveau de conséquence a été déterminé selon le RSB, comme expliqué à la section 10. Le niveau de conséquence est « Minimal » avec une crue de sécurité centennale.

9.7 Zone de sismicité

Selon l'annexe 1 du Règlement de la sécurité des barrages, le barrage est situé en zone 4, ce qui équivaut à 6 points selon l'annexe II du RSB.

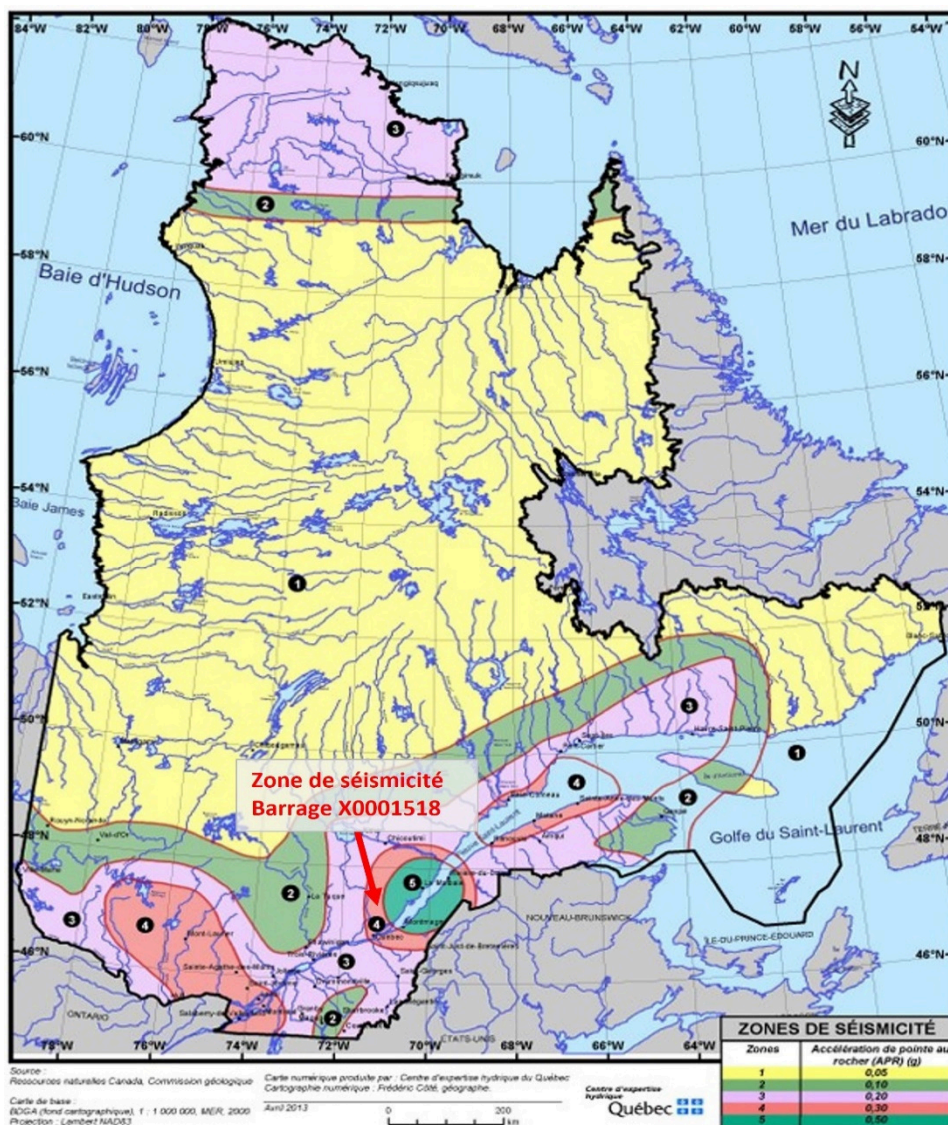


Figure 9-1 : Zone de sismicité du barrage X0001518

(Source : Centre d'expertise hydrique du Québec, Carte_Seismique)



9.8 Classement du barrage

Les caractéristiques du barrage ont été évaluées en même temps que la conséquence associée. Le classement du barrage X0001518 à forte contenance est présenté dans le tableau suivant. Le niveau de conséquences du barrage est « Minimal » avec une classe de « E ».

Tableau 9-2 : Sommaire de la classification du barrage

CLASSEMENT DU BARRAGE X0001518
Barrage du lac Tourbillon
selon le chapitre III du règlement sur la sécurité des barrages
Loi sur la sécurité des barrages
06 Mar 2025

Nom du barrage	Barrage du lac Tourbillon
Numéro	X0001518
Type de structure	Barrage en remblai
Catégorie administrative	Forte contenance
Année de construction	1990
Année de modification	-

			Points	Points
Paramètres physiques constants (PPC)	hauteur du barrage	3.54 m	1	4.0
	type de barrage	Terre	10	
	capacité de retenue	0.3 hm³	1.00	
	type de terrain de fondation	Till	4	
			Moyenne =	
Paramètres variables (PV)	âge du barrage	35 ans	2.25	4.6
	zone de sismicité	4	6	
	état du barrage	Acceptable	5	
	fiabilité des appareils d'évacuation	Acceptable	5	
			Moyenne =	
Vulnérabilité	= moyenne PPC x moyenne PV =			18.25
Conséquences	Niveau des conséquences	Minimal		1
Risque	= Vulnérabilité x Conséquences =			18.25
Classe du barrage				E



10 Stabilité du barrage

Selon l'article 48 du RSB, la vérification de la stabilité du barrage et du terrain de fondation est requise pour les barrages dont le niveau de conséquence est égal ou supérieur à « moyen ». Étant donné que le barrage X0001518, objet de cette étude, a un niveau de conséquence « minimal », l'analyse de la stabilité n'est pas requise. Toutefois, par précaution, la vérification de la stabilité a été réalisée dans le cadre de ce mandat et est présentée à l'annexe D.



11 Plan de mesures d'urgence et plan de gestion des eaux

11.1 Plan de gestion des eaux

Selon l'article 30 du RSB, le plan de gestion des eaux retenues (PGER) n'est pas nécessaire pour un barrage dont le niveau de conséquence est « **minimal** » ou « **faible** ». Cependant, vu qu'au passage de la crue centennale il est requis d'enlever les poutrelles, Stantec a préparé un plan de gestion des eaux.

11.2 Plan de mesures d'urgence

Selon l'article 35 du RSB, le plan de mesure d'urgence est seulement requis lorsque le niveau des conséquences d'une rupture est égal ou supérieur à « **moyen** ». Par conséquent, le plan de mesure d'urgence n'est pas requis.



12 Revue des activités de surveillance

Le classement du barrage X0001518 révisé est la classe « E » avec un niveau de conséquences « Minimal ». Comme décrit à l'article 41 du RSB, des activités de surveillance suivantes sont requises.

Tableau 12-1 : Activités de surveillance requises pour un barrage de classe « B »

	Fréquence	Personne habilitée
Visite de reconnaissance : Une visite de reconnaissance vise à dresser un portrait sommaire de l'état du barrage et, si une anomalie mineure a été constatée lors d'une visite antérieure, à suivre l'évolution de celle-ci.	Une (1) visite par année	Une personne possédant une expérience technique dans le domaine des barrages
Inspection : Une inspection vise à vérifier, sous tous ses aspects, l'état du barrage et à en surveiller le comportement. Elle peut comprendre la prise et l'analyse de mesures.	Une (1) visite à chaque 10 ans	Ingénieur

L'équipe de Stantec en charge de la présente ÉES a réalisé une inspection le 27 septembre 2024. Les personnes ayant réalisé l'inspection étaient 1 ingénieur et un CPI ayant une expertise technique dans les barrages. L'inspection réalisée par Stantec dans le cadre de cette ÉES est considérée comme une inspection, donc la prochaine inspection devra avoir lieu en 2034. La Municipalité de Lac-Beauport doit s'engager à continuer les activités de surveillance conformément à l'article 41 du RSB.

À titre informatif, la prochaine étude d'évaluation de la sécurité du barrage devra être réalisée dans 15 ans (soit en 2039) selon l'article 50 du RSB actuellement en vigueur, pour un barrage ayant un niveau de conséquence « Minimal » ou « Faible ».



13 Conclusion

Le barrage du Lac Tourbillon (X0001518) a été construit en 1990 et se situe sur le ruisseau Lamothe (05100021), selon le répertoire des barrages. Il est approximativement à 17 km au nord de la ville de Québec. Le barrage X0001518 consiste d'un écran en béton à l'amont d'une digue en terre avec une hauteur de 3,54 m.

Dans le cadre de ce mandat, une inspection structurale et hydraulique du barrage a été réalisée le 27 septembre 2024, suivie d'une étude de la sécurité du barrage.

Dans cette étude, l'analyse hydrologique a été réalisée en utilisant la méthode rationnelle et la méthode de transposition des bassins versants (approche fréquentielle).

L'analyse hydrologique a été réalisée en comparant les résultats de crue obtenus par la méthode rationnelle avec ceux obtenus par la méthode de transposition des stations hydrométriques. Les débits de la méthode de transposition ont été retenus, car ces derniers corroborent et permettent une estimation adéquate des débits entrants dans le lac.

L'analyse hydraulique du barrage a été réalisée en utilisant la version 6.5 du logiciel HEC-RAS. Les scénarios en conditions normales et en temps de crue 100 ans (avec majoration pour les changements climatiques de 20%) ont été analysés avec et sans rupture. La crue de débit de pointe 4,13 m³/s (incluant la majoration pour les changements climatiques) a été retenue comme crue de sécurité de récurrence centennale (100 ans).

Au passage de la crue de sécurité centennale (incluant la majoration pour les changements climatiques), le niveau maximal d'eau atteint dans le Lac Tourbillon en considérant la structure en place et le mode de gestion actuel est à l'élévation de 297,57 m.

Les caractéristiques du barrage ont été évaluées en même temps que la conséquence associée. Le classement du barrage X0001518 a été réalisé en utilisant les Lois et Règlements sur la sécurité des barrages du MELCCFP. Le barrage est considéré « **Forte contenance** » avec un niveau de conséquences de « **Minimal** » et une classe de « **E** ».

Étant donné que le barrage X0001518 objet de cette étude a un niveau de conséquence « Minimal », la vérification de la stabilité n'est pas requise. Le barrage a une côte d'état bon.

La revanche disponible est de 44 cm au passage de la crue centennale avec toutes les poutrelles retirées, soit 30 cm de plus que la revanche requise en cas de crue de sécurité. La revanche minimale requise est donc respectée.



14 Recommandations

Les recommandations sont séparées selon les recommandations en sécurité de barrage, les travaux correctifs en entretien général et les études, investigations et suivis.

L'ordre de priorité qui est présenté dans les tableaux correspond normalement aux intervalles suivants :

- Haute : Action à prendre sans délai, à réaliser à l'intérieur de 12 mois.
- Moyenne : Action à prendre à moyen terme, à réaliser dans une période de 1 à 3 ans.
- Faible : Action à prendre à long terme, à réaliser dans une période de 3 à 5 ans.

Tableau 14-1 : Recommandations (sans les recommandations du rapport d'inspection structure)

Section	Recommandation	Priorité
Recommandations en sécurité de barrage		
4.1	Protéger la portion de la face amont non protégée avec de l'enrochement	Moyenne
4.2	Mettre en place une estacade en diagonale avec le barrage pour que les débris soient dirigés vers une rive en amont du barrage et non coincés au milieu du lac.	Faible
Travaux d'entretien (pas une problématique de sécurité de barrage)		
4.1	Faire un suivi de la digue X0001518 pour détecter les érosions.	En continu
4.2	S'assurer que les végétations soient coupées pour faciliter l'accès et pour permettre les inspections.	En continu
4.2	S'assurer que le seuil est libre de débris (parcelles de terre).	En continu
Recommandations en études, investigations et suivis		
12	Une inspection tous les 10 ans, et une visite de reconnaissance par année doivent être réalisées dans le respect de LSB et du RSB.	En continu
12	Une étude d'évaluation de la sécurité du barrage devra être réalisée chaque 15 ans (soit la prochaine en 2039) et devra être faite dans le respect de la version la plus récente de la LSB et du RSB en vigueur au moment de l'étude.	En continu



15 Références

Faucher-Gour, B., A. Lachance, M. Ricard et D. Leclair, 2020. *Diagnose du Lac Tourbillon*. Bureau d'écologie appliquée pour la Municipalité de Lac-Beauport et la Ville de Québec, 64 p. + 13 annexes

Design of Small Dams, Ministère de l'Intérieur des États-Unis. Bureau de Réclamation. 3^e édition.

Guide sur l'évaluation de la fiabilité des appareils d'évacuation, Direction de la Sécurité des barrages, Québec.

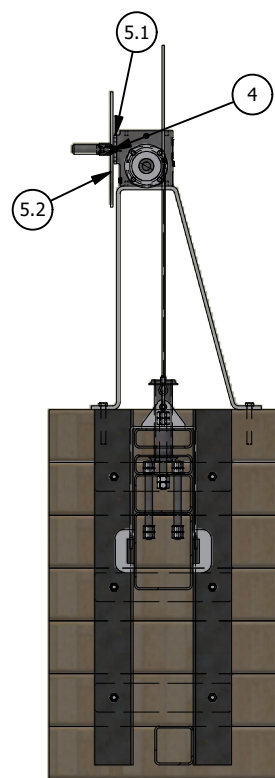
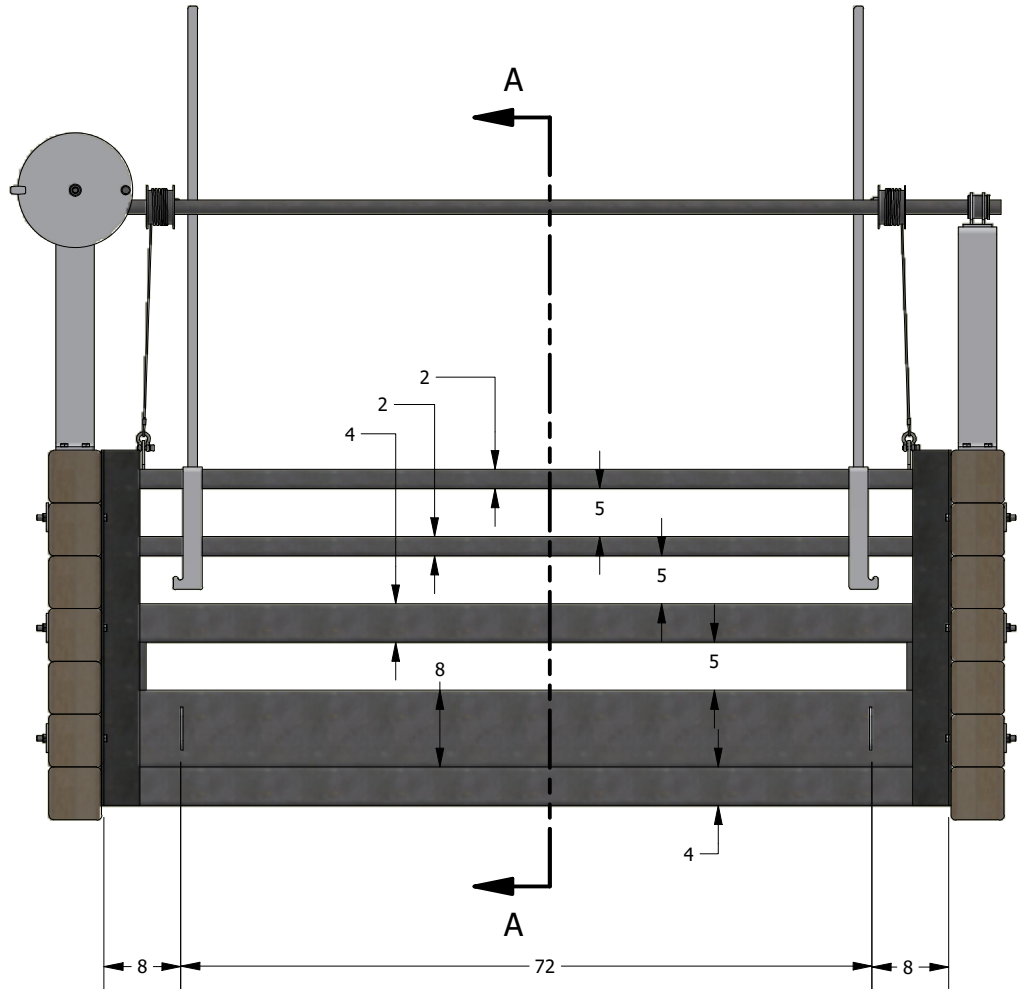
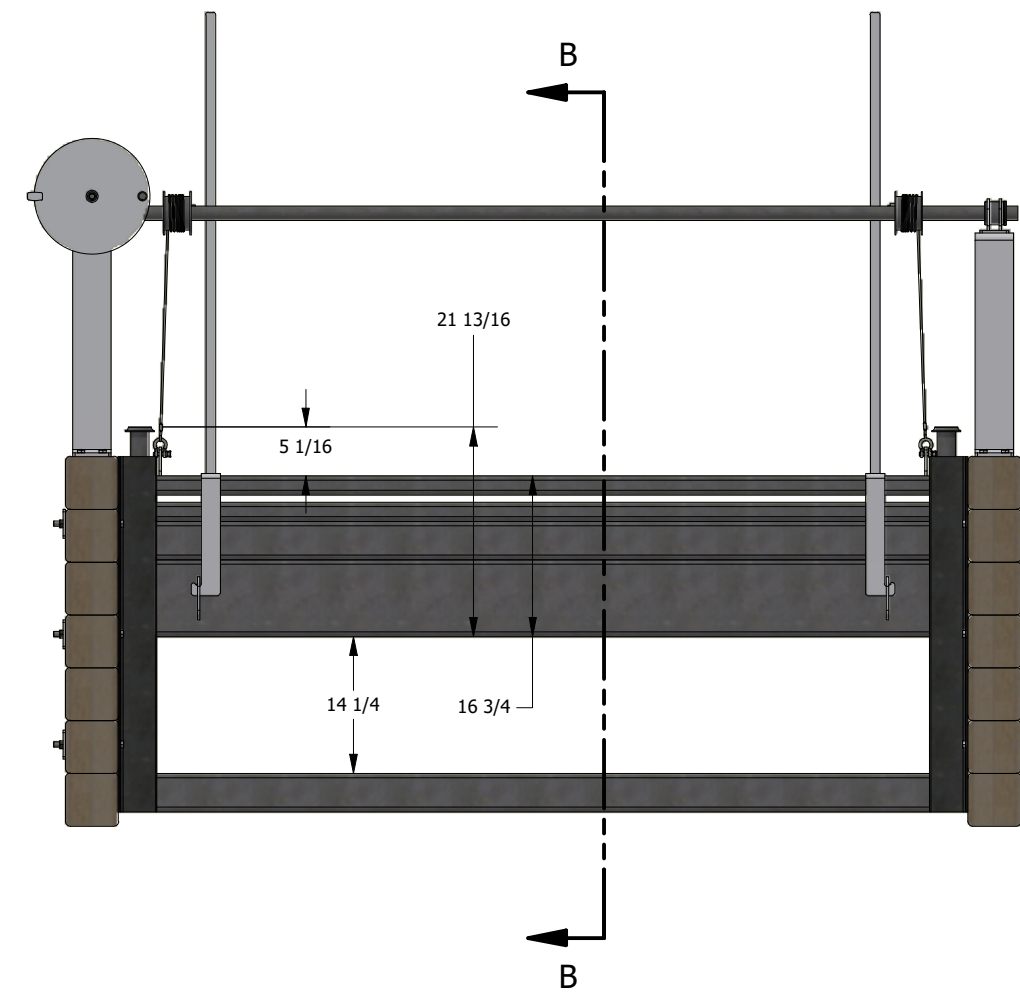
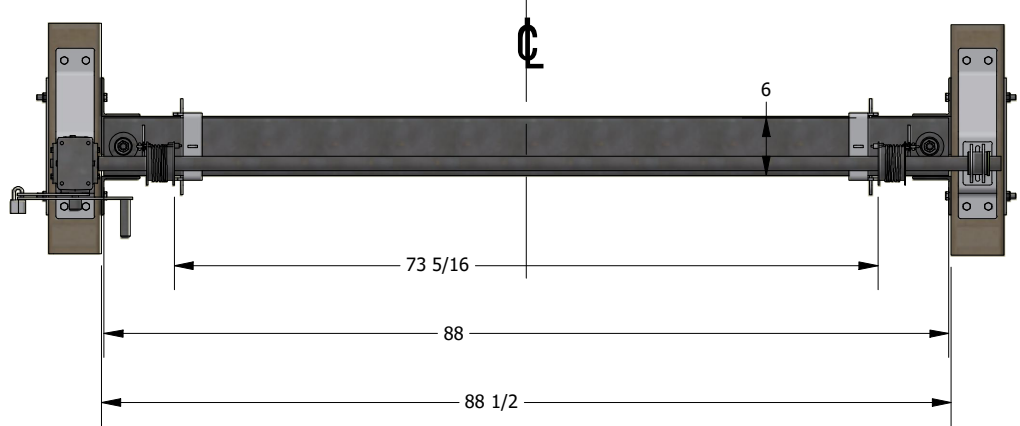
Marche, 2008 : Barrages; crues de rupture et protection civile; 2e édition, Presses internationales polytechniques, 448 p.

Sécurité des barrages: Lois et Règlements. MELCCFP. Loi mise à jour le 1^{er} avril 2024 et Règlement mis à jour le 31 mars 2024.

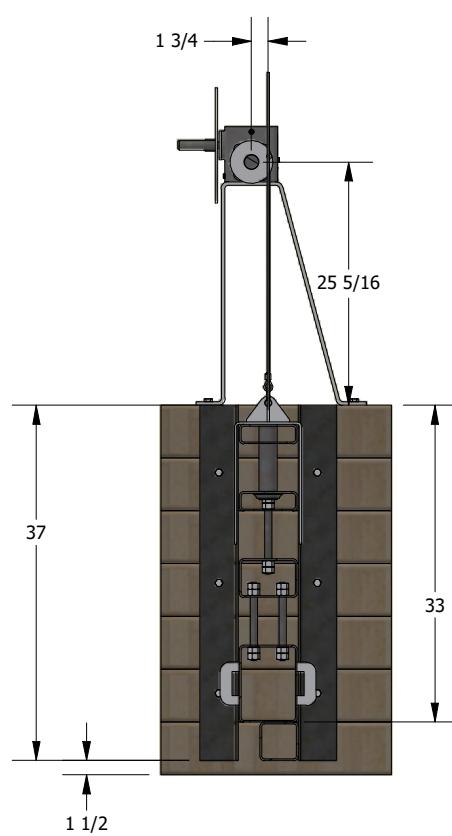


Annexe A Plan du barrage

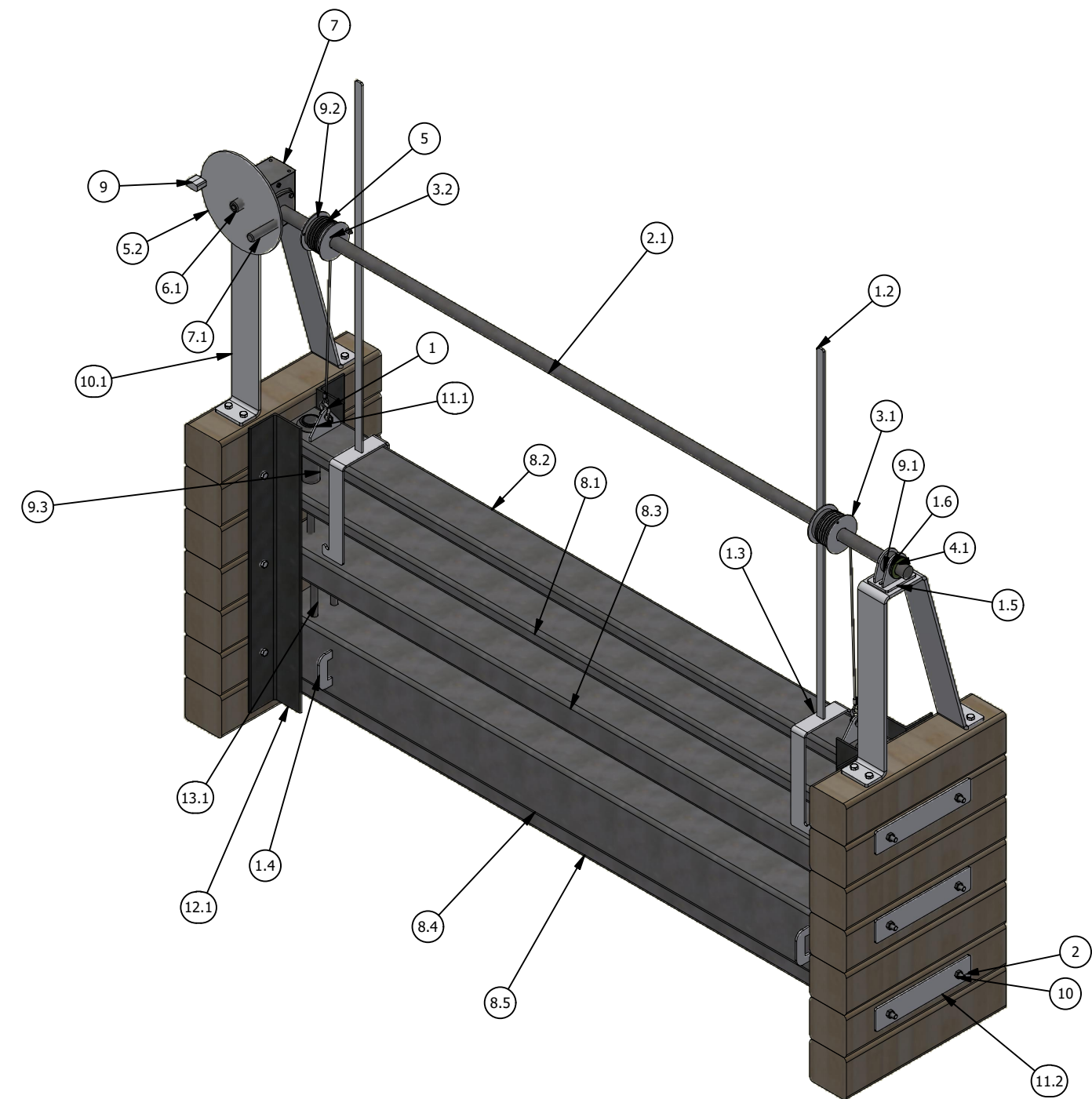
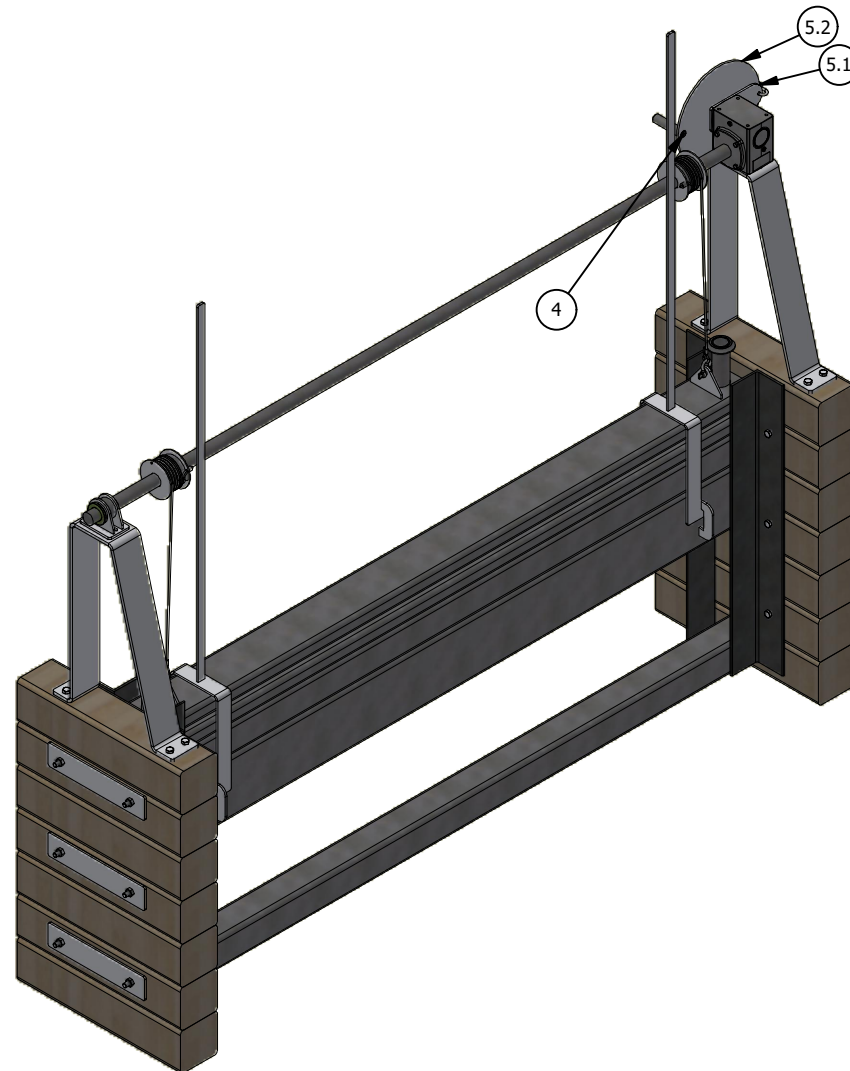




COUPE B-B
SCALE 1 : 20



COUPE A-A
SCALE 1 : 20



L'ACIER EST
GALVANISÉ À CHAUD

NOMENCLATURE					
ITEM	MATÉRIEL	EP.in. ou DESCRIPT.	LASER ou COUPE in. ou No:	QTE	POIDS .PAGE
1	A.GALV.	SHACKLES 3/8	McMASTER #3558T47	2	.17 lb 1
2	A.GALV.	BOULON HEX. 1/2-13	7" LG	12	.46 lb
3	A.INOX.	BAGUE DE RESERVOIR	1 1/2 PIPE McMaster #1145K57	4	.39 lb
4	A.INOX.	BOULON F.H. 3/8-16	1" LG	1	.04 lb
5	A.INOX.	CABLE Ø1/4		1	.60 lb
6	A.INOX.304 M.F.	ECROUS 3/4" NC		24	.13 lb
7	FORGE	REDUCTEUR 10:1		1	37.05 lb
8	PRUCHE	6" X 6" NOMINAL	PAR AUTRE	14	.00 lb
9	ACIER	CADENAS	PAR AUTRE	1	.00 lb
10	ACIER	WELL NUT 1/2-13	#SPA-HN-202	12	.05 lb
11	A.GALV.	TIRE FOND 1/2	4" LG	8	.28 lb 1
1.1	A.INOX.304L-MF	1/4" EP.	LASER # 287304-1-1	2	.03 lb
1.2	A.INOX.304L-MF	1/4" EP.	LASER # 287304-1-2	2	3.47 lb
1.3	A.INOX.304L-MF	1/4" EP.	LASER # 287304-1-3	2	4.75 lb
1.4	A.INOX.304L-MF	1/4" EP.	LASER # 287304-1-4	4	.48 lb
1.5	A.INOX.304L-MF	1/4" EP.	LASER # 287304-1-5	1	.91 lb
1.6	A.INOX.304L-MF	1/4" EP.	LASER # 287304-1-6	2	.42 lb
2.1	A.INOX.304L-MF	Ø1 1/2"	99" LG	1	48.88 lb
3.1	A.INOX.304L-MF	1/8" EP.	LASER # 287304-3-1	4	.51 lb
3.2	A.INOX.304L-MF	1/8" EP.	LASER # 287304-3-2	4	.20 lb
4.1	NYLOIL	ROND Ø2 1/16" X 2 1/4" LG	USINAGE # 287304-4-1	1	.13 lb
5.1	ALUM.#5052-H32	1/4" EP.	LASER # 287304-5-1	1	.50 lb
5.2	ALUM.#5052-H32	1/4" EP.	LASER # 287304-5-2	1	2.72 lb
6.1	ALUM.#6061-T6	Ø1 1/4"	1 1/4" LG	1	.11 lb
7.1	ALUM.#6061-T6	Ø1"	4" LG	1	.30 lb
8.1	ACIER 44W	TUBE 6" X 2" X 3/16" EP	88" LG	1	68.12 lb
8.2	ACIER 44W	TUBE 6" X 2" X 3/16" EP	88" LG	1	67.84 lb
8.3	ACIER 44W	TUBE 6" X 4" X 3/16" EP	88" LG	1	87.14 lb
8.4	ACIER 44W	TUBE 6" X 8" X 3/16" EP	88" LG	1	124.70 lb
8.5	ACIER 44W	TUBE 4" X 4" X 3/16" EP	88 1/2" LG	1	68.90 lb
9.1	A.INOX.304 M.F.	PIPE 2" CED #40	2" LG	1	.62 lb
9.2	A.INOX.304L-MF	PIPE 3" CED #40	USINAGE # 287304-9-2 2 5/8" LG	2	1.69 lb
9.3	A.INOX.	PIPE 1 1/2 CED #40	McMASTER # 4830K451	2	1.96 lb
10.1	A.HOT R.	3/8" EP.	LASER # 287304-10-1	2	24.34 lb
11.1	A.HOT R.	1/4" EP.	LASER # 287304-11-1	2	.61 lb
11.2	A.HOT R.	1/4" EP.	LASER # 287304-11-2	6	2.97 lb
12.1	ACIER 44W	ANGLE 4" X 1/4" EP.	37" lg	4	20.34 lb
13.1	A.INOX.304 M.F.	Ø3/4"	8 3/16" LG	6	1.04 lb

Annexe B Cartographie des zones inondables de la rivière Montmorency



**MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT
DIRECTION DU MILIEU HYDRIQUE
SERVICE DE L'HYDROLOGIE ET DE LA CARTOGRAPHIE**

**CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES
RIVIÈRE MONTMORENCY
DU RAPIDE DES TROIS SAULTS
JUSQU'À L'ÎLE ENCHANTERESSE**

DH-94-01

**Jean-Paul Boucher, ing.
François Picard, ing.
Mai 1994**

CE RAPPORT ÉTANT PRODUIT DANS LE CADRE D'UN PROGRAMME
CONJOINT FÉDÉRAL-PROVINCIAL, LES MINISTRES N'ACCEPTENT
AUCUNE RESPONSABILITÉ POUR TOUT USAGE DE CE RAPPORT
INTERNE AUTRE QUE LA POURSUITE EXPRESSE DE LA
DÉSIGNATION DE L'ENDROIT A ÊTRE DÉSIGNÉ NOMMÉ DANS LE
TITRE DU RAPPORT.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier les personnes suivantes pour l'élaboration de ce rapport:

Réalisé par : M. François Picard, ingénieur

Vérifié par : M. Jean-Paul Boucher, ingénieur

Étude hydrologique : M. François Picard, ingénieur

Relevés sur le terrain : M. Clément Boucher, technicien
M. Normand Coulombe, technicien
M. Joseph Lavallée, technicien
M. Gilles Glode, technicien
M. Ghislain Ouellet, technicien

Dessinateur : M. Normand Guay, technicien

Dactylographie : Mme Geneviève Auger

Photographies aériennes: Communauté urbaine de Québec

Table des matières

	page
1. INTRODUCTION	5
2. SECTEUR CARTOGRAPHIÉ	7
3. HYDROLOGIE	8
3.1 Données existantes	8
3.2 Débits de récurrence 20 ans et 100 ans	8
4. ÉTUDE HYDRAULIQUE	9
4.1 Description	9
4.2 Relevés.....	11
4.2.1 Choix et profils des sections.....	11
4.2.2 Distances inter-sections.....	17
4.2.3 Coefficients de rugosité.....	17
4.3 Relevés hydrométriques.....	19
4.4 Calibrage.....	19
5. CALCULS DES PLANS D'EAU	21
6. CONCLUSION.....	24

ANNEXE I Étude hydrologique.

ANNEXE II Résultats du modèle HEC-II.

ANNEXE III Photographies aériennes du 6 mai 1989.

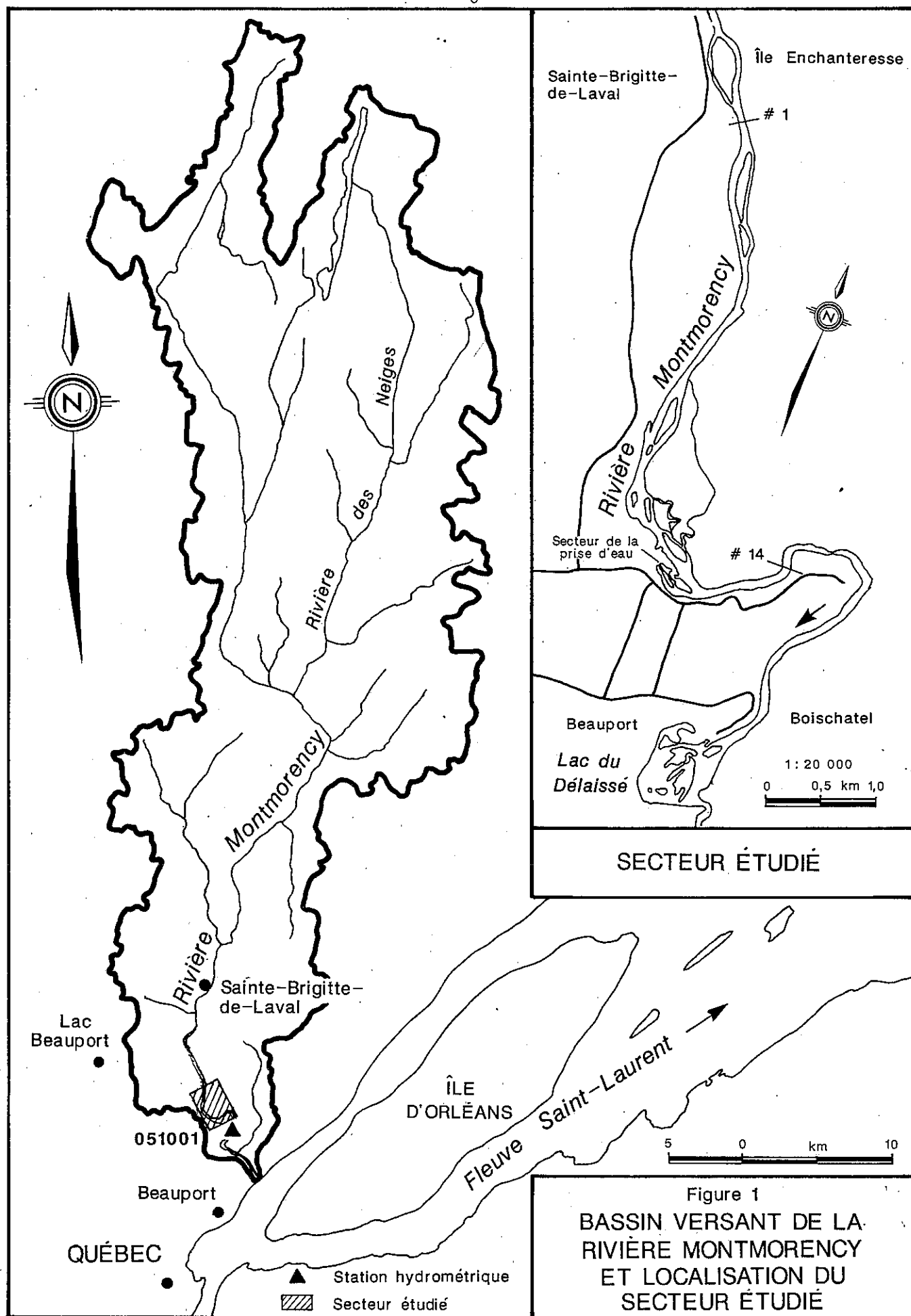
ANNEXE IV Profils des sections transversales.

1. INTRODUCTION

Ce rapport s'inscrit dans le cadre de la Convention fédérale-provinciale sur la cartographie des plaines d'inondation pour certaines rivières du Québec. Il donne une description sommaire du secteur cartographié, de l'analyse statistique pour l'estimation des débits instantanés et des niveaux de départ pour des récurrences de 20 ans et de 100 ans, et de la méthode utilisée pour le calcul des cotes d'inondation.

Le présent rapport fait suite au rapport MH-89-14 de la rivière Montmorency à l'Île Enchanteresse. Il a trait au tronçon de la rivière située en aval de l'île jusqu'au rapide des Trois Saults dans la municipalité de Beauport. Notre but est de déterminer les niveaux d'eau associés aux différents débits de crue et d'en faire la cartographie officielle. Cela permettra à la municipalité de Beauport de compléter son analyse en vue d'apporter des éléments de solution aux importants problèmes d'inondation dans le secteur des Trois Saults.

Le secteur du lac du Délaissé n'est pas inclus dans le présent rapport car nous n'avons pas encore assez de données hydrauliques permettant une étude exhaustive. De plus, l'influence du barrage des Marches Naturelles peut se faire sentir jusqu'à cette hauteur. Puisque ce barrage devrait être en opération de nouveau d'ici peu, nous attendons l'évaluation des nouvelles cotes d'opération de l'exploitant pour poursuivre l'étude.



2. SECTEUR CARTOGRAPHIÉ

Le secteur concerné par la cartographie débute à l'Île Enchanteresse dans la municipalité de Sainte-Brigitte-de-Laval pour se terminer à la tête du rapide des Trois Saults à Beauport. La localisation du secteur étudié, long de 5,5 km, est présentée à la figure 1. La superficie du bassin versant à la station 051001 est de 1100 km²; à la hauteur de l'Île Enchanteresse, elle est réduite à 1032 km².

La rivière Montmorency prend sa source dans le parc des Laurentides. C'est un bassin à vocation forestière qui se caractérise par une pente assez prononcée, entraînant donc une érosion sévère des berges, un transport d'une quantité importante de sédiments, une présence de nombreux lieux de déposition de ces sédiments ainsi que l'existence de plusieurs îles ou îlots dont la morphologie se modifie avec le temps. Comme la majeure partie du bassin versant est située dans une région où les précipitations, sous forme de pluie et de neige, sont les plus fortes de la province, il en résulte des débits de crues assez importants.

Ce sont les résidences situées à proximité de la prise d'eau "Des Islets" de Beauport qui sont les plus touchées par les inondations. L'analyse de plans topographiques montre que ce secteur est composé de méandres, îles et presqu'îles. Il fait de plus partie d'une région de dépôts sablonneux occasionnés par une érosion et une sédimentation excessives originaires de la fonte des glaciers. Le secteur des résidences est également situé à l'intérieur d'un bras de la rivière qui est aujourd'hui en partie bouché. La dernière inondation à survenir dans ce secteur s'est produite le 17 avril 1993 alors qu'un débit de pointe de 516 m³/s a été enregistré.

D'autres résidences situées plus en amont, sur la rive droite de la rivière, sont aussi touchées par les inondations causées principalement par des embâcles de glace. L'emplacement exact de la formation des embâcles entre l'Île Enchanteresse et le secteur des Trois Saults dépend du débit de crues qui les accompagne. Ces inondations se produisent souvent en période d'hiver lors de dégels. L'événement catastrophique de l'inondation de l'Île Enchanteresse le 11 mars 1992 en est un exemple.

La rive gauche de la rivière Montmorency à l'intérieur du tronçon étudié n'est pas habitée. La rive est en effet densément boisée et plusieurs petits bras secondaires de la rivière contribuent partiellement à l'écoulement.

3. HYDROLOGIE

3.1 Données existantes

La station hydrométrique 051001 (Montmorency à 0,6 km en aval du barrage des marches naturelles) est en opération continue depuis 1965 et a fonctionné de 1926 à 1938. Elle a servi de station de référence pour estimer les débits de récurrences de 20 ans et de 100 ans. La station est localisée sur la figure 1.

3.2 Débits de récurrences de 20 ans et de 100 ans

Les débits maximums instantanés de récurrences de 20 ans et de 100 ans utilisés dans ce rapport proviennent de l'étude statistique des débits observés à la station 051001 (voir l'étude hydrologique à l'annexe I). L'estimation des débits au niveau de l'Île Enchanteresse dans le rapport MH-89-14 provient également de l'étude à cette station.

Les débits maximums instantanés retenus pour notre étude sont indiqués sur le tableau ci-après. Les valeurs de débit sur la rivière Montmorency ont été réduites par la méthode de rapport de superficie de bassin versant car la superficie du bassin à la hauteur de l'Île Enchanteresse est réduite de 6% par rapport à celle calculée à la station 051001. Par comparaison, nous présentons également les débits instantanés associés aux trois (3) dernières crues importantes qui ont engendré des inondations en eau libre. On constate qu'une crue de récurrence de quatre (4) ans semblable à celle d'avril 1993 engendre des inondations dans le secteur de la prise d'eau de Beauport.

DATE	STATION 051001 DÉBIT INSTANTANÉ (m ³ /s)	RÉCURRENCE
1er avril 1987	686	32 ans
6 mai 1989	697	37 ans
17 avril 1993	516	4 ans
-	659	20 ans
-	776	100 ans

4. HYDRAULIQUE

4.1 Description

Pour établir les plaines d'inondation, il est nécessaire de connaître les plans d'eau correspondants aux débits retenus à l'étude hydrologique.

L'étude hydraulique de la rivière Montmorency fut menée pour établir les cotes nécessaires à la délimitation de ces plaines d'inondation. Ces cotes ont été établies à l'aide d'un modèle de courbe de remous utilisant la méthode dite "Standard Step Method".

Pour calculer les différentes cotes de plans d'eau, un programme informatique, le HEC-2 du "U.S. Army Corps of Engineers", employant ce modèle fut utilisé. Les trois (3) lignes d'eau mesurées depuis 1990 et qui ont servi au calibrage du modèle sont présentées au tableau 1.

4.2 Relevés

4.2.1 Choix et profils des sections

En 1981, le Service des projets et travaux du ministère de l'Environnement a relevé quatorze (14) sections perpendiculaires à l'écoulement entre le rapide des Trois Saults et l'île Enchanteresse. Ces sections sont présentées sur le plan de la figure 2. Pour vérifier si la morphologie du fond de la rivière a changé depuis 1981, nous avons procédé en juin 1993 aux relevés des sections 6, 8, 11 et 12. Dans la mesure du possible, nous avons tenté de les localiser exactement au même endroit que les anciennes. Les profils comparés de ces sections sont présentés aux figures 3 à 6. Le profil transversal de la section 6 (figure 3) semble légèrement plus profond en 1993 qu'en 1981. Toutefois, les aires d'écoulement sont semblables. Les profils de la section 8 sont différents; la section arpentée en 1993 étant moins profonde car elle est située plus en amont. Ceci est montré sur un croquis à la figure 4. Le profil de la rivière vis-à-vis la section 11 reste à toute fin pratique inchangé. La différence se situe au niveau de la digue qui ceinture les bassins de la prise d'eau. Pour le profil de la section 12, il semble y avoir eu au fil des ans accumulation de sédiments. Ceci peut-être confirmé par la présence d'îlots qui étaient inexistantes sur des photographies moins récentes.

Finalement, nous ne croyons pas que les modifications du fond de la rivière entre 1981 et 1993 soient assez importantes pour modifier de façon significative les niveaux d'eau en période de crue.

TABLEAU 1
COTES D'INONDATION DE LA RIVIÈRE MONTMORENCY
DES RAPIDES DES TROIS-SAUTS À L'ÎLE ENCHANTERESSE

Section	Calibrage 92.04.30		Calibrage 93.04.19		Calibrage 90.04.27		Crue/89.05.06	Cotes d'inondation	
	N.E. observé (m)	N.E. calculé (m)	N.E. observé (m)	N.E. calculé (m)	N.E. observé (m)	N.E. calculé (m)	N.E. calculé (m)	20 ans (m)	100 ans (m)
14	153.12	153.12	153.22	153.22	153.90	153.90	155.77	155.67	156.00
13		153.40		153.50		154.22	156.18	156.08	156.43
12	153.67	153.67	153.73	153.75	154.44	154.47	156.44	156.34	156.69
11.5		154.05		154.12		154.77	156.72	156.62	156.98
11	154.85	154.81	154.89	154.88	155.45	155.43	157.17	157.08	157.41
10.5		155.56		155.64		156.22	157.80	157.72	158.00
10	156.16	156.16	156.22	156.22	156.95	156.95	158.33	158.26	158.54
9		157.05		157.10		157.86	158.73	158.66	158.90
8	159.23	159.21	159.28	159.25	159.89	159.87	160.84	160.80	160.97
7		160.17		160.23		160.98	162.00	161.94	162.14
6	160.74	160.76	160.82	160.83	161.75	161.74	162.98	162.91	163.17
5		161.31		161.39		162.44	163.91	163.83	164.13
4		162.81		162.87		163.76	165.09	165.01	165.24
3.4	163.61	163.70	163.69	163.77	164.62	164.62	165.93	165.85	166.11
3		164.87		164.89		165.25	166.61	166.51	166.81
2		167.32		167.36		167.84	168.30	168.25	168.41
1		168.70		168.77		169.67	171.11	171.00	171.25
Débit (m³/s) à la station 051001	97.0		107.0		210.0 à 11h00 287.0 à 16h00		690.0 à 18h00	659.0	776.0
À la section 10*	96.0		105.0		283.0		680.0	650.0	765.0
À la section 5*	91.0		100.5		270.0		665.0	619.0	730.0

* calculé à partir de rapports de superficie de bassin versant avec le site de la station 051001.

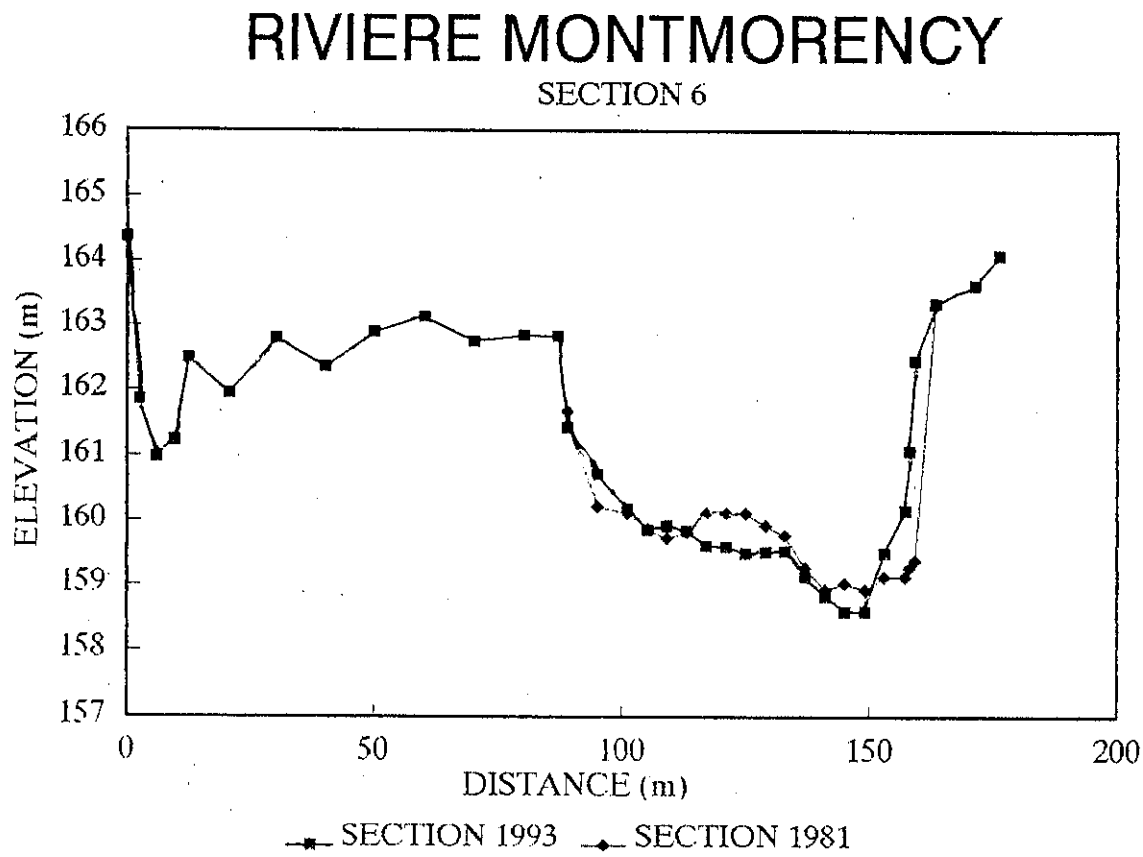


Figure 3. Comparaison des profils de la section 6 entre 1981 et 1993

RIVIERE MONTMORENCY

SECTION 8

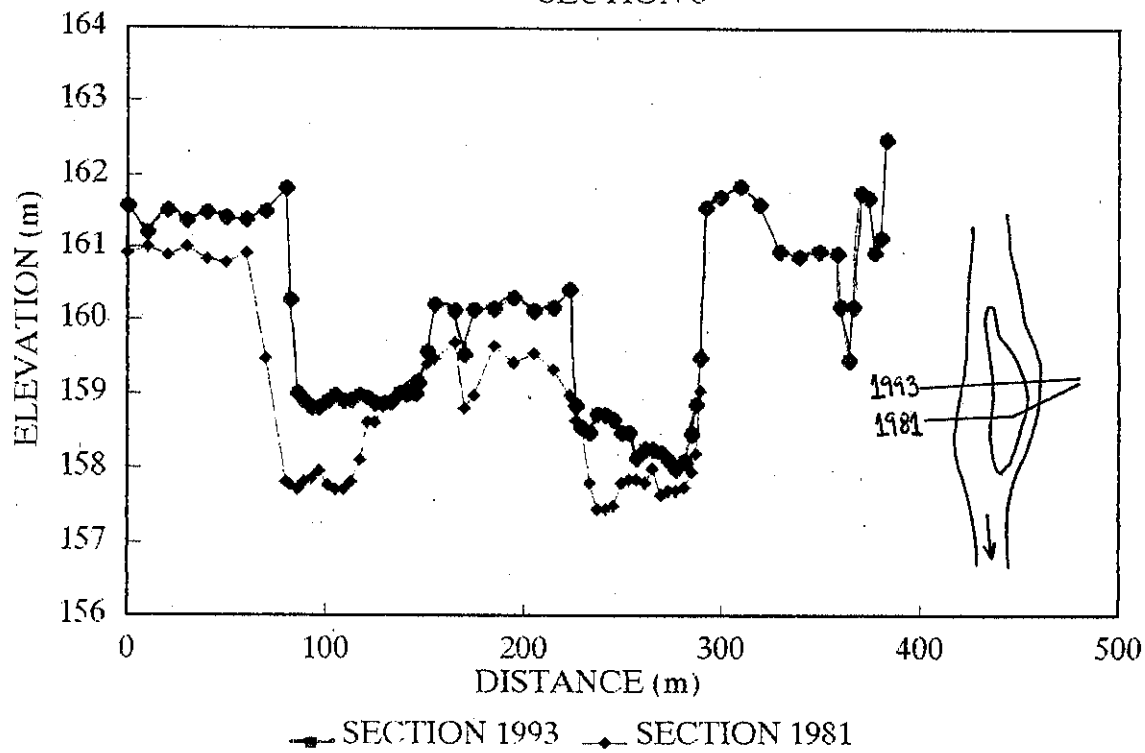


Figure 4. Comparaison des profils de la section 8 entre 1981 et 1993

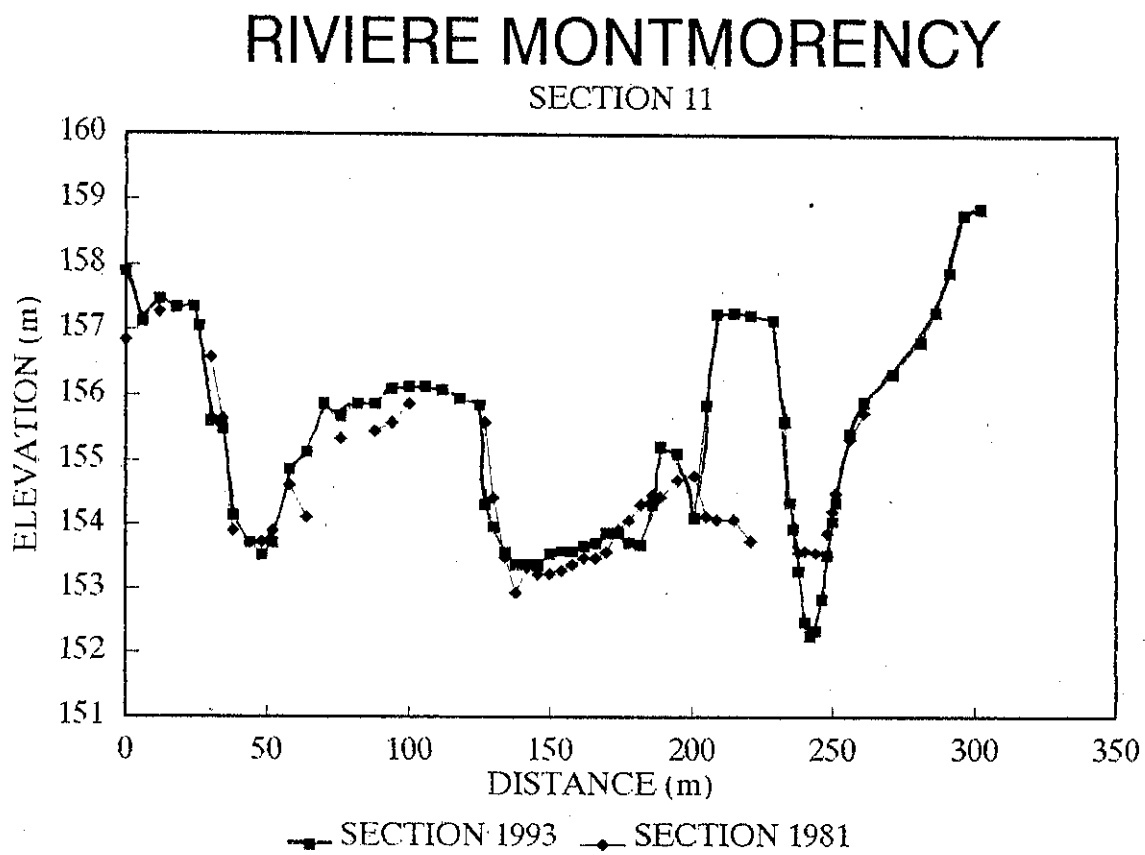


Figure 5. Comparaison des profils de la section 11 entre 1981 et 1993

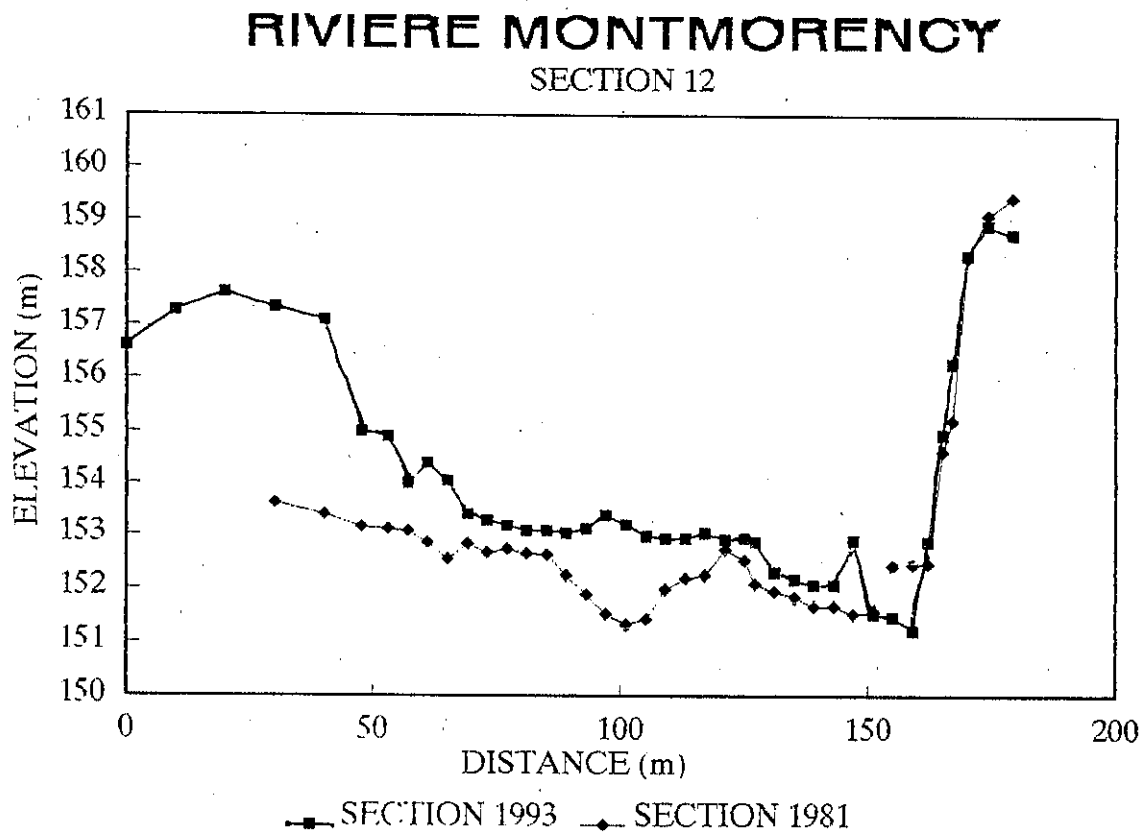


Figure 6. Comparaison des profils de la section 12 entre 1981 et 1993

Pour augmenter la précision des calculs dans le secteur de la prise d'eau, deux (2) sections transversales ont été rajoutées en 1993 (11.5 et 10.5). Le profil de ces sections comprend les bassins de rétention d'eau de l'usine. Ainsi, nous pourrions vérifier l'effet sur le niveau d'eau de l'obstruction de l'écoulement causée par les digues ceinturant les bassins.

En 1993, la section 3.4 a aussi été ajoutée car des mesures de niveau d'eau étaient prises à cet endroit. Il y a donc dix-sept (17) sections transversales au total.

4.2.2 Distances inter-sections

Les distances inter-sections furent mesurées sur les plans de topographie de la rivière Montmorency. Ces plans portent les numéros R-9418- 1 à 6 et sont classés à la planothèque du ministère de l'Environnement. Ces distances sont présentées au tableau 2.

4.2.3 Coefficient de rugosité

Une visite sur le terrain nous a permis de remarquer que le lit de la rivière est surtout constitué de gravier et de roches de 10 à 30 cm de diamètre. Dans le secteur où la vitesse du courant est plus faible, on retrouve des bonnes étendues de sable et de gravier plus fins. On estime les coefficients de rugosité à 0,030-0,040 pour les secteurs de faible pente et à 0,040-0,060 pour les secteurs de rapides. En ce qui concerne les berges, les coefficients ont été évalués d'après les visites sur le terrain et l'étude des photographies aériennes. On a estimé les coefficients à 0,080-0,110 pour les berges boisées et à 0,060-0,080 selon que les berges étaient en broussaille ou habitées.

TABLEAU 2
DISTANCES INTER-SECTIONS
RIVIÈRE MONTMORENCY

NUMÉRO DE SECTION	DISTANCES INTER-SECTIONS (M)	DISTANCES CUMULATIVES
14		0
	510	
13		510
	430	
12		940
	260	
11.5		1200
	260	
11		1460
	200	
10.5		1660
	250	
10		1910
	360	
9		2270
	360	
8		2630
	330	
7		2960
	410	
6		3370
	290	
5		3660
	450	
4		4110
	190	
3.4		4300
	180	
3		4480
	500	
2		4980
	590	
1		5570

4.3 Relevés hydrométriques

Trois (3) campagnes complètes de relevés hydrométriques ont été menées dans le secteur depuis 1990. La plus récente a été effectuée au mois de mai 1993 suite aux inondations dans le secteur Des Islets. Les niveaux d'eau ont été pris à des sites déterminés pour représenter le plus fidèlement possible le plan d'eau. Tous les résultats de ces relevés sont consignés au dossier no G-4138-03-03-0510B et sont présentés au tableau 1.

4.4 Calibrage

Nous avons retenu les trois (3) campagnes de relevés de 1990 ($Q=287 \text{ m}^3/\text{s}$), 1992 ($Q=97 \text{ m}^3/\text{s}$) et 1993 ($Q=107 \text{ m}^3/\text{s}$) pour effectuer le calibrage.

Pour le relevé de 1990, il faut noter que les mesures de niveau d'eau entre les sections 14 et 10 ont été prises le matin alors que le débit à la station était de $210 \text{ m}^3/\text{s}$. Les relevés de niveau d'eau en amont de la section 10 ont été mesurés en après-midi alors que le débit avait augmenté substantiellement. Il atteignait $287 \text{ m}^3/\text{s}$ à 16 h 00 à la station.

Les photographies aériennes du 6 mai 1989, obtenues de la Communauté Urbaine de Québec, ont grandement facilité notre analyse. Les photographies ont été prises à 18 h 00 dans le secteur de la prise d'eau, alors que le débit de la rivière était à son maximum ($697 \text{ m}^3/\text{s}$). Une récurrence de trente-sept (37 ans) est associée à ce débit. À l'aide des profils des sections transversales, il nous a été possible de comparer les niveaux de crues calculés par le modèle mathématique avec les niveaux des berges. Ces photos sont présentées à l'annexe III. La photographie du secteur de la prise d'eau des Islets est montrée à la page suivante.



LP

1:5000

5 MAI 1989

CUQ89-01

80

De plus, la municipalité de Beauport a fait effectuer à l'été 1993 la caractérisation de son territoire par la firme d'arpentage Picard et Picard. Les fichiers numérisés présentent la topographie du territoire avec des courbes de niveaux échelonnés au mètre. En comparant l'étendue de l'inondation du 6 mai 1989 avec le plan montrant les courbes de niveau dans le secteur Des Islets (figure 8), il nous a été possible d'établir avec précision les niveaux de crue à cet endroit. Ces niveaux ont aussi été confrontés aux niveaux calculés à l'aide du modèle de courbe de remous et il ressort une similitude entre les résultats obtenus. Il ne fait donc aucun doute de la pertinence des résultats calculés par le modèle de courbe de remous HEC-II. Le niveau d'eau du 6 mai 1989 atteignait la cote 157,5 m à la prise d'eau Des Islets.

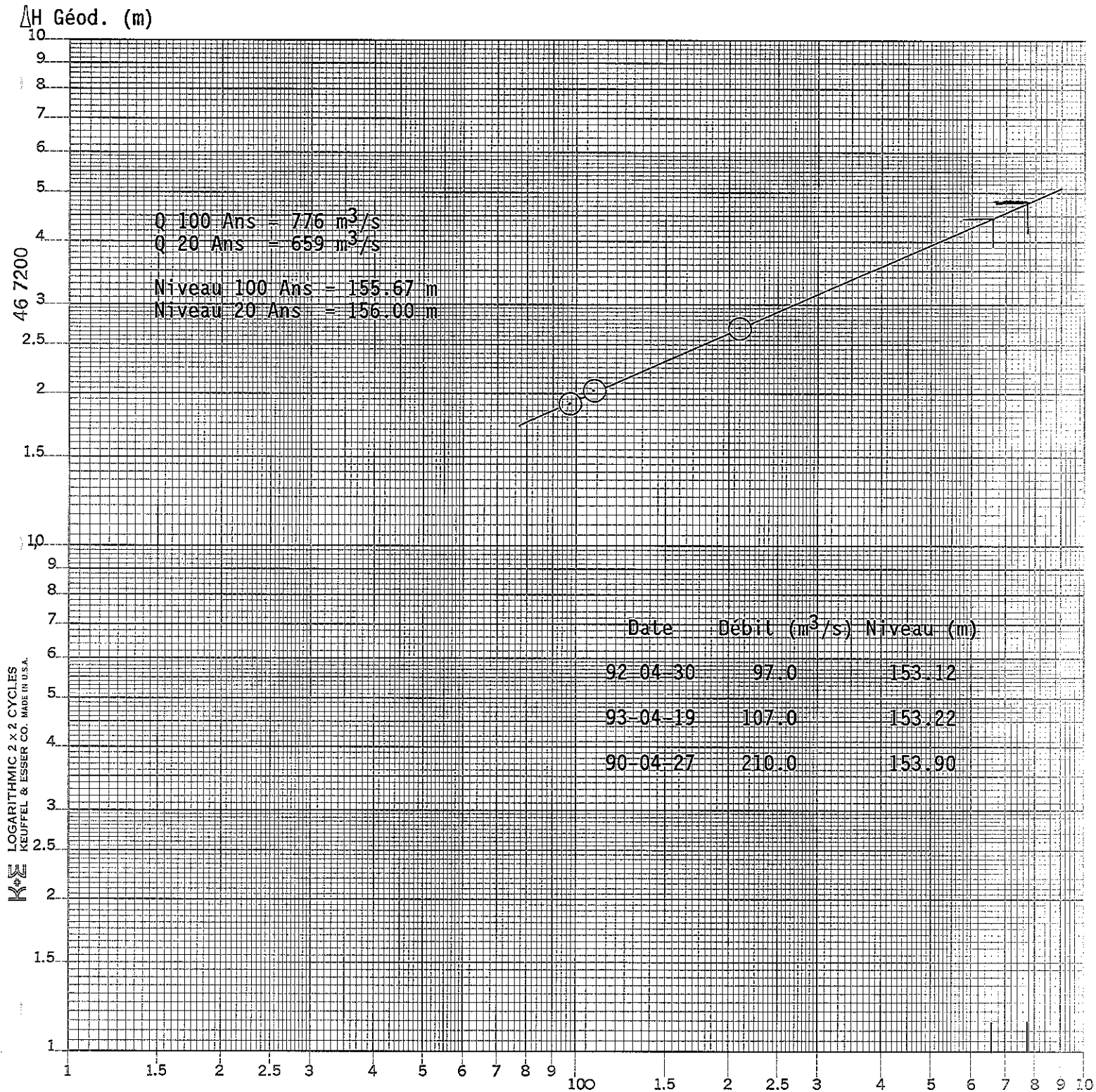
5. CALCULS DES PLANS D'EAU

Après le calibrage du modèle, nous avons maintenu les mêmes coefficients de rugosité pour les débits de 20 ans et de 100 ans. C'est la relation niveau-débit à la section 14 qui a servi à connaître les niveaux d'eau de départ pour une récurrence de 20 ans (155,67 m) et de 100 ans (156,00 m). Cette relation est présentée à la figure 7.

Les résultats obtenus à l'aide du modèle HEC-2 pour les deux (2) récurrences sont présentés à l'annexe II et résumés au tableau 1. Les profils des plans d'eau correspondants apparaissent à la figure 2. Et, en comparaison avec les résultats obtenus avec le calibrage du modèle et le tableau précédent, nous pouvons affirmer que les lignes d'eau de récurrences de 20 ans et de 100 ans sont bien représentatives de ce qui pourrait survenir en condition réelle d'écoulement à l'eau libre en période de crue.

La section 1 correspond à la section 26 dans le rapport MH-89-14 (Ile Enchanteresse). Les niveaux d'eau à cette section calculés en 1994 sont de 171,00 m (20 ans) et de 171,25 m (100 ans).

FIGURE 7
RELATION NIVEAU-DEBIT
RIVIÈRE MONTMORENCY
SECTION 14



$H_o = 151.2$ (m)
 $H = H_o + \Delta H$

Q (m³/s) à la station 051001

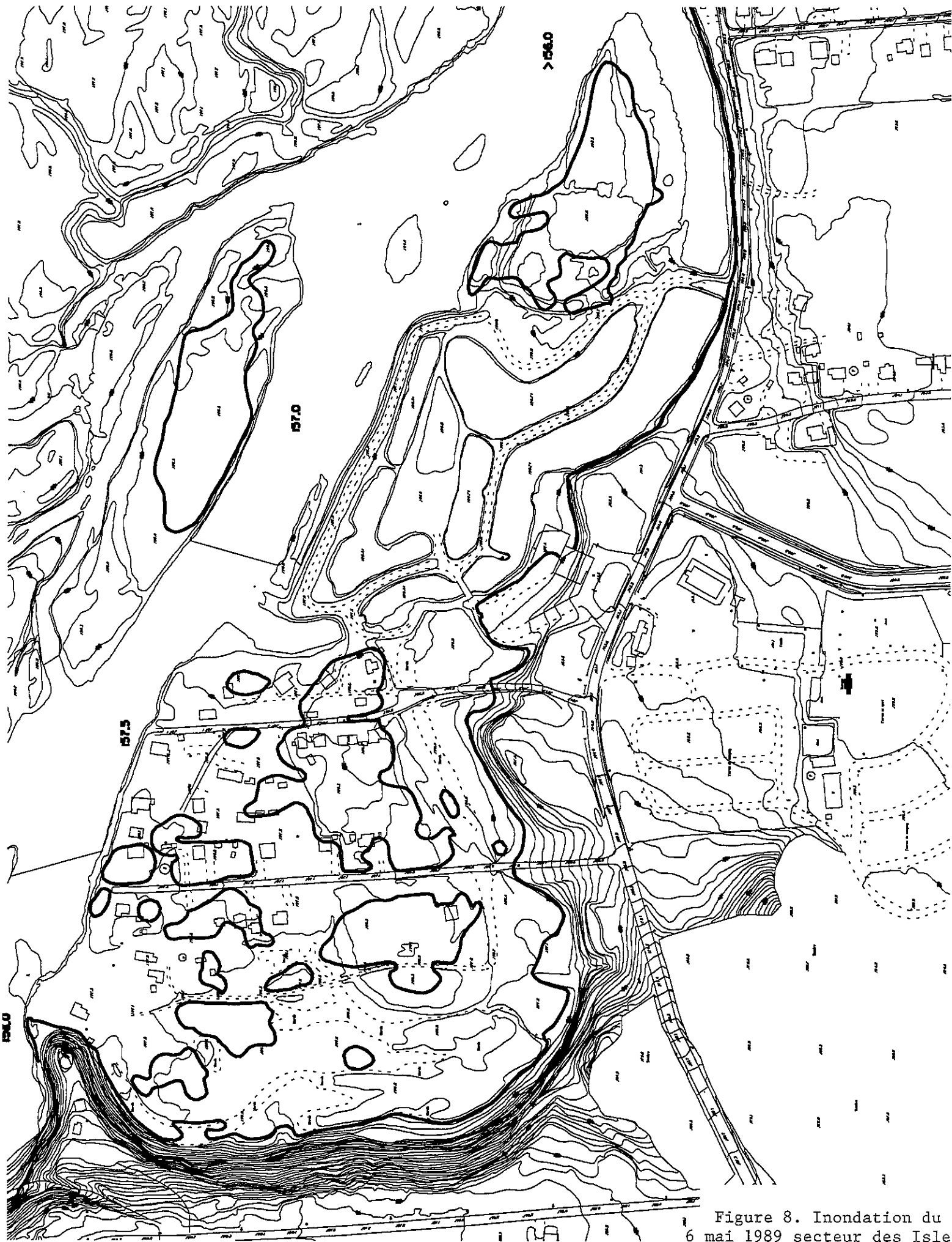


Figure 8. Inondation du
6 mai 1989 secteur des Islets

Confrontés aux cotes du précédent rapport, 171,01 m (20 ans) et 171,23 m (100 ans), les résultats obtenus sont similaires et démontrent une grande fiabilité.

Également, nous avons voulu vérifier jusqu'à quel point la construction de la prise d'eau accentuait les inondations dans le secteur amont. Nous avons simulé à partir du modèle mathématique les conditions qui prévalaient avant 1987 lorsqu'une partie du débit de la rivière pouvait être évacuée par les canaux secondaires autour des îlots. La simulation démontre que l'endiguement de ces canaux provoque un rehaussement du niveau de l'eau de l'ordre de 10 à 15 centimètres pour une crue égale ou supérieure à une récurrence de 20 ans. Cependant, il se produirait quand même des inondations à l'eau libre dans ce secteur même si les canaux secondaires autour de la prise d'eau véhiculaient un certain débit.

6. CONCLUSION

La rivière Montmorency, de par sa situation géographique et des caractéristiques de son bassin versant, possède des débits de crues élevés. De plus, le facteur de pointe résultant du rapport du débit instantané sur le débit journalier est l'un des plus élevés de la province; à titre d'exemple, on a déjà enregistré un facteur de 1,61 à la station hydrométrique des marches naturelles. Les crues qui se produisent à l'eau libre sur la Montmorency sont donc importantes et subites. Le secteur le plus durement touché par ces inondations étant celui de la prise d'eau "Des Îlets". Il faut souligner qu'une crue à l'eau libre de récurrence de 4 ans suffit à inonder les résidences du secteur "Des Îlets".

Les documents, rapports, photographies aériennes et fichier numérique, mis à notre disposition, ont permis d'établir avec précision les cotes d'inondation.

Les cotes de 20 ans et de 100 ans présentées à l'annexe II et au tableau 1 seront utilisées pour tracer les zones de 20 ans et de 100 ans sur les cartes de risque d'inondation et les profils en long s'y rapportant.

Jean-Paul Boucher, ing.

François Picard, ing., M.Sc., M.B.A.

ANNEXE I

DIRECTION DU MILIEU HYDRIQUE

SERVICE DE L'HYDROLOGIE ET DE LA CARTOGRAPHIE

ÉTUDE HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT

RIVIERE MONTMORENCY A

L'ILE ENCHANTERESSE

PRÉPARÉ PAR: FRANCOIS PICARD, Ing., M.Sc.

MAI 1994

1. DÉFINITION DE L'ÉTUDE

Cette étude consiste à déterminer les risques de submersion en bordure de la rivière Montmorency entre le secteur des Trois-Sauts à Beauport et l'Ile Enchanteresse à Sainte-Brigitte-de-Laval.

La superficie du bassin versant au niveau de la zone à cartographier est de 1100 km² au niveau de la station 051001 et de 1032 km² à l'Ile Enchanteresse. La submersion d'une installation riveraine étant conditionnée par la hauteur de débordement, c'est donc le débit maximum journalier majoré d'un facteur de pointe, pour tenir compte du débit instantané, qui nous intéresse.

2. DONNÉES DISPONIBLES

La station hydrométrique 051001 située sur la rivière Montmorency est en opération depuis 1924, avec une période d'interruption entre 1939 et 1964.

La fiche caractéristique de la station est la suivante:

- Position: :Montmorency à 0.6 km en aval du barrage des Marches naturelles
- Localisations
coordonnées: longitude: 71° 09' 05"
latitude : 46° 53' 39"
- Superficie du bassin
versant : 1 100 km²
- Organisme exploitant : Ministère de l'Environnement du Québec
- Équipement de mesure : enregistreur à ruban perforé

- Période d'observation : annuelle
- Période retenue pour l'étude : annuelle
- Condition d'écoulement de la rivière : régime naturel

Le tableau 1 présente les débits maxima annuels en ordre chronologique de 1926 à 1991. La courbe de tarage de la station 051001 (relation niveau-débit) est calculée avec des jaugeages faits entre 9,20 m³/s et 413 m³/s. En dehors de ces limites, les débits sont extrapolés à l'aide d'une équation quadratique.

A la station 051001, ce sont les données des crues printanières dues à la fonte de neige qui ont servi majoritairement à faire les analyses. Néanmoins, il peut arriver pour que le maximum annuel utilisé dans l'analyse se retrouve en novembre. On observe la plupart du temps que la crue printanière donne une pointe plus forte que celle d'un orage. Le barrage des Marches naturelles situé en amont de la station n'a aucune influence sur les débits car c'est un barrage au fil de l'eau.

3- CRITIQUE DES DONNÉES UTILISÉES

La courbe de tarage est de qualité satisfaisante pour l'extrapolation des débits de récurrences de 20 ans et de 100 ans qui nous intéressent.

Depuis les onze dernières années, le haut de la relation niveau-débit n'a pas changé, et cette station peut être considérée comme stable.

TABLEAU 1: Débits maxima annuels
ayant servi à l'analyse statistique
Station 051001
Rivière Montmorency

Années	Débits (m ³ /s)	Années	Débits (m ³ /s)
1926	270	1971	294
1927	549	1972	354
1928	564	1973	348
1929	391	1974	408
1930	331	1975	399
1931	337	1976	450
1932	266	1977	236
1933	306	1978	295
1934	447	1979	580E
1935	277	1980	202
1936	456	1982	308
1937	206	1983	435
1938	283	1984	344
1965	257	1985	297
1966	391	1986	331
1967	262	1987	460
1968	447	1988	208
1969	317	1989	434
1970	331	1990	399
		1991	307

Les données de 1981 sont incomplètes

La gamme des débits qui ont servi à l'analyse statistique varie de 202 m³/s à 580 m³/s. La plupart des débits ainsi analysés se retrouvent dans la partie mesurée de la courbe de tarage.

La qualité des données est généralement bonne pour la période sans refoulement.

4- ESTIMATION DES DÉBITS DE CRUE DE RÉCURRENCES DE 20 ET DE 100 ANS

Le catalogue des débits maxima annuels est présenté au tableau I.

Les résultats d'ajustement des lois statistiques sont donnés dans le tableau 2 ainsi que les valeurs de χ^2 et du test de Kolmogorov-Smirnov.

5- CRITIQUE DES RÉSULTATS OBTENUS

Les 39 débits maxima annuels forment un échantillon unique. Nous ne détectons pas d'effet périodique et nous pouvons dire que la série est homogène.

En se référant au tableau 2, on constate que les tests du chi carré (χ^2) et du Kolmogorov-Smirnov sont acceptables pour toutes les lois (niveau de signification de 95 pour cent). Néanmoins, nous choisissons la loi Log Pearson 3 (méthode des moments) puisque le test de Kolmogorov-Smirnov nous donne les meilleurs résultats et que l'écart-type au niveau de signification de 95% est le plus faible. Les débits retenus sont donc de 523 m³/s pour la récurrence de 20 ans et de 616 m³/sec pour la récurrence de 100 ans.

Tableau 2: Résultats d'ajustement des lois
Station 051001 - Rivière Montmorency
(analyse sur les débits maxima journaliers)

Lois Statistiques	Crue de période de retour (m^3/s)						χ^2	Kolmogorov Smirnov
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans		
Gumbel	337,5	422,1	478,1	531,9	601,4	653,5	2,692	0,1127
Log Pearson 3 (W.R.C.)	340,9	427,7	481,6	531,3	593,4	638,8	2,692	0,0946
Log Pearson 3 (Moment)	344,2	429,0	478,8	522,7*	575,2	615,9*	4,538	0,0874

* Valeurs retenues

Caractéristiques de l'échantillon:

Taille de l'échantillon: 39

Moyenne arithmétique : $353 m^3/s$ Moyenne des log (base 10) : 2,5328
Écart type : $95,7 m^3/s$ Coefficient d'asymétrie des log (base 10): 0,00622
Coefficient d'asymétrie : 0,5985 Coefficient de variation des log (base 10): 0,0462
Coefficient de variation: 0,2710

La valeur critique du χ^2 au niveau de signification de 95 pour cent:

Gumbel : 7,81
Log Pearson : 5,99

La valeur critique du test de Kolmogorov-Smirnov au niveau de signification de 95 pour cent: 0,2162

6- FACTEUR DE POINTE

Les dommages causés lors d'une crue le sont lorsque le niveau d'eau maximum atteint sur une rive, se maintient ou ne dure que quelques minutes. Pour cette raison, on doit tenir compte de la valeur du débit instantané.

La méthodologie utilisée consiste à prendre, pour une station donnée, toutes les crues printanières dont il nous est possible d'avoir l'instantané correspondant. En divisant l'un par rapport à l'autre, on obtient une valeur appelée "facteur de pointe":

$$\text{Facteur de pointe} = \frac{\text{(débit instantané pour une crue donnée)}}{\text{(débit moyen journalier correspondant à cette crue)}}$$

Il s'agit par la suite de faire une moyenne de tous ces facteurs de pointe. Pour la station 051001, vingt-quatre (24) crues ont été utilisées. Les valeurs utilisées dans la série varient de 1,05 à 1,61. C'est donc d'un facteur moyen de 1,26 que nous devons majorer les débits à cette station, puisque toutes les analyses statistiques provenant de notre banque de données sont effectuées sur les moyennes journalières. Au tableau 3, nous présentons les vingt-quatre (24) crues qui ont servi au calcul du facteur de pointe. Les débits de 523 m³/s (20 ans) et de 616 m³/s (100 ans) majorés de 1,26 deviennent donc 659 m³/s (20 ans) et 776 m³/s (100 ans).

Au niveau de l'Ile Enchanteresse, la superficie de bassin versant représente 94% (1032 km²) du bassin à la station 051001 (1100 km²). Les débits à cette hauteur sont donc réduits à 619 m³/s pour la récurrence de 20 ans et 730 m³/s pour la récurrence de 100 ans. Ce sont les mêmes débits qui ont été utilisés dans le rapport MH-89-14 relatif à la cartographie à l'Ile Enchanteresse.

TABLEAU 3: Crues ayant servi au calcul du facteur de pointe.

Dates	Débits moyens (m ³ /sec)	Débits instantanés (m ³ /sec)	Facteur de pointe
3 novembre 1966	391	1 110	2,84*
26 juin 1967	262	334	1,27
25 avril 1968	447	592	1,32
20 mai 1969	317	365	1,15
2 mai 1970	331	374	1,13
23 mai 1971	294	311	1,05
1 juin 1972	354	374	1,06
4 mai 1973	348	416	1,20
13 mai 1974	408	487	1,19
21 mai 1975	399	487	1,22
19 mai 1976	450	589	1,31
22 avril 1977	236	283	1,20
27 nov. 1979	249	363	1,46**
23 juin 1981	204	316	1,55
10 mai 1982	308	377	1,22
1 mai 1983	435	552	1,27
24 mai 1984	344	448	1,30
14 mai 1985	297	367	1,24
27 avril 1986	331	374	1,13
1 avril 1987	460	686	1,49
10 mai 1988	208	257	1,24
6 mai 1989	434	698	1,61
11 mai 1990	399	496	1,24
2 mai 1991	307	349	1,14
			Moyenne: 1,26

* valeur non retenue

** valeur retrouvée dans l'annuaire hydrologique de 1979-1980
et plus grande que la crue du printemps 1980

Les débits ainsi calculés devraient être retenus pour fin de détermination des niveaux d'eau dans ce secteur. La figure suivante présente l'analyse des fréquences pour la loi statistique retenue, la loi Log Pearson 3 (moments).

Les débits de crue à la station 051001 sont donc de $659 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la récurrence de 20 ans et de $776 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la récurrence de 100 ans.

RIVIÈRE MONTMORENCY

Station 051001

Période 1926 - 1991

$n \rightarrow 39$

Loi statistique Log Pearson 3 (moments)

Maximums annuels

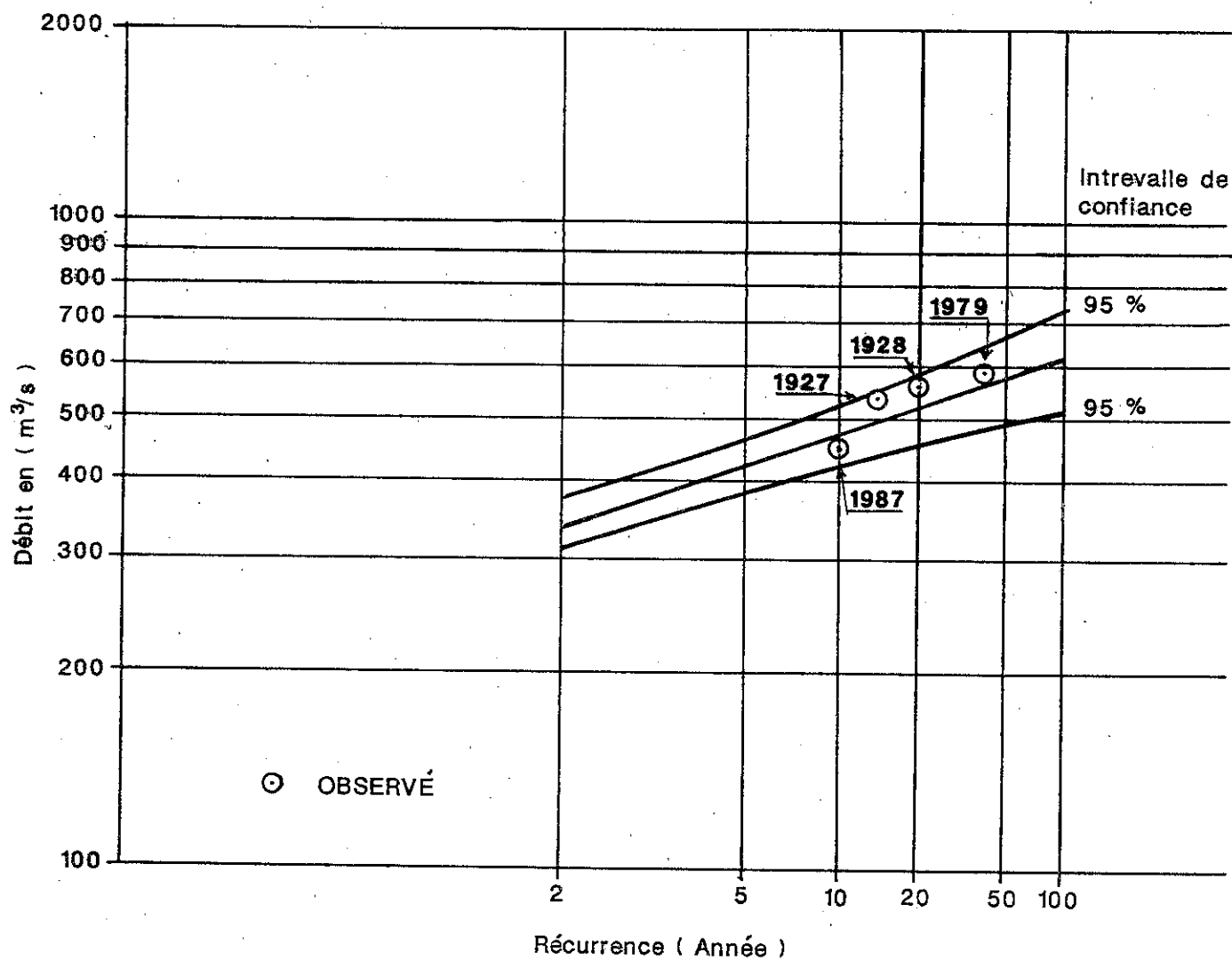


Figure 1

ANNEXE II

```

*****
* WATER SURFACE PROFILES *
* VERSION OF SEPTEMBER 1988 *
* ERROR: 01,02,03,04 *
* UPDATED: JUNE 1990 *
* RUN DATE 10JAN94 TIME 15:28:18 *
*****

```

```

*****
* U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS *
* THE HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER *
* 609 SECOND STREET, SUITE D *
* DAVIS, CALIFORNIA 95616-4627 *
* (916) 756-1104 *
*****

```

```

X X XXXXXXX XXXX XXXX
X X X X X X
X X X X X
XXXXXX XXXX X XXXX XXXX
X X X X X
X X X X X
X X XXXXXXX XXXX XXXX

```

END OF BANNER

25MAY94 08:53:37

PAGE 1

THIS RUN EXECUTED 25MAY94 08:53:37

HEC2 RELEASE DATED SEP 88 UPDATED JUN 1990

ERROR CORR - 01,02,03,04

MODIFICATION -

T1 COURBE DE REMOUS "MONTMORENCY"
T2 CALIBRAGE 1993-07-29 Q = 97 m3/s
T3 RIVIERE MONTMORENCY

J1	ICHECK	INQ	NINV	IDIR	STRT	METRIC	HVINS	Q	WSEL	FQ
		2				1			153.12	

J2	NPROF	IPLOT	PREVS	XSECV	XSECH	FN	ALLOC	IBW	CHNIM	ITRACE
	1		-1							

J3 VARIABLE CODES FOR SUMMARY PRINTOUT

38	43	1	5	13	14	15	55	26	56
16	17	18							

J5 LPRNT NUMSEC *****REQUESTED SECTION NUMBERS*****

-15

NC	0.10	0.10	0.030	0.1	0.3					
QT	6	97.0	107.0	210	659	690	776			
X1	14	37	0.1	78.7	0	0	0			
GR	157.0	-100.0	156.5	-50.0	156.2	-30.0	156.0	-25.0	155.0	-10.0
GR	154.27	0.1	152.97	3.0	152.67	3.6	152.32	6.0	152.22	9.0
GR	151.92	12.0	151.77	15.0	151.82	18.0	151.82	21.0	151.82	24.0
GR	151.72	27.0	151.67	30.0	151.77	33.0	151.42	36.0	151.47	39.0
GR	151.57	42.0	151.57	45.0	151.82	48.0	151.37	51.0	151.32	54.0
GR	151.37	57.0	151.42	60.0	151.57	63.0	151.97	66.0	152.07	69.0
GR	152.27	72.0	152.52	75.0	152.67	76.0	153.44	77.2	154.67	78.7
GR	155.00	90.0	155.40	120.0						
X1	13	40	-15.0	82.40	510	510	510			
GR	157.0	-60.0	156.0	-40.0	154.5	-15.0	154.0	-10.0	153.5	-2.0
GR	153.17	0.1	152.83	0.65	152.73	2.95	152.43	5.95	152.23	8.95
GR	152.02	11.95	151.93	14.95	151.73	17.95	151.53	20.95	151.68	23.95
GR	151.38	26.95	151.53	29.95	151.58	32.95	151.63	35.95	151.63	38.95
GR	151.68	41.95	151.73	44.95	151.73	47.95	151.93	50.95	152.03	53.95
GR	152.08	56.95	152.13	59.95	152.13	62.95	152.18	65.95	152.33	68.95
GR	152.53	71.95	152.58	74.95	152.76	77.95	152.83	78.55	153.94	78.55
GR	154.10	79.4	154.28	82.4	155.68	84.9	156.38	111.9	160.0	120.0

X1	12	40	40.0	169.8	430	430	430			
GR	156.60	0.0	157.27	10.0	157.62	20.0	157.33	30.0	157.10	40.0
GR	155.00	47.5	154.90	53.0	153.99	57.0	154.39	61.0	154.05	64.7
GR	153.40	68.7	153.28	72.7	153.17	76.7	153.06	80.7	153.07	84.7
GR	153.03	88.7	153.10	92.7	153.38	96.7	153.18	100.7	152.97	104.7
GR	152.92	108.7	152.93	112.7	153.03	116.7	152.91	120.7	152.92	124.7
GR	152.86	126.7	152.30	130.7	152.16	134.7	152.05	138.7	152.05	142.7
GR	151.89	146.7	151.53	150.7	151.47	154.7	151.22	158.7	152.87	161.7
GR	154.93	164.8	156.26	166.8	158.33	169.8	158.90	173.8	158.73	178.8

NC	0.15	0.11	0.062	.3	.5					
X1	11.5	82	66.0	224.1	260	260	260			
GR	157.51	0.0	157.73	10.0	157.45	20.0	157.80	30.0	158.27	40.0
GR	158.35	50.0	157.50	55.0	156.62	60.0	156.64	66.0	154.70	69.0
GR	153.35	72.3	152.55	75.6	152.52	79.6	152.70	83.6	152.79	87.6
GR	152.86	91.6	152.97	95.6	152.77	99.6	152.79	103.6	152.88	107.6
GR	152.90	111.6	152.91	115.6	152.94	119.6	152.97	123.6	153.30	127.6
GR	153.47	131.6	153.40	135.6	153.41	139.6	153.39	143.6	153.42	147.6
GR	153.27	151.6	153.33	155.6	153.24	159.6	153.08	163.6	153.22	167.6
GR	153.29	171.6	153.29	175.6	153.07	179.6	152.73	183.6	152.41	187.6
GR	152.46	191.6	152.82	195.6	153.57	199.6	154.14	203.6	154.23	209.6
GR	154.18	215.6	154.23	219.6	157.04	224.1	156.58	234.1	156.76	244.1
GR	156.71	254.1	156.53	264.1	156.39	274.1	156.53	284.1	156.63	288.6
GR	156.6	295.1	156.6	299.1	156.6	303.1	156.6	307.1	156.6	311.1
GR	156.6	315.1	156.6	319.1	156.6	323.1	156.6	327.8	156.58	329.8
GR	156.62	335.8	156.6	337.8	156.6	339.3	156.6	343.3	156.6	347.3
GR	156.6	351.3	156.6	355.3	156.6	359.3	156.6	363.3	156.6	367.3
GR	156.6	371.3	156.6	371.9	157.95	375.4	160.74	379.4	160.91	389.4
GR	160.99	399.4	161.07	408.7						

NC				.2	.4					
X1	11	67	34.0	205.5	260	260	260			
GR	157.88	0.0	157.12	6.0	157.47	12.0	157.33	18.0	157.36	24.0
GR	157.06	26.0	155.60	30.0	155.48	34.0	154.15	38.0	153.72	44.0
GR	153.52	48.0	153.72	52.0	154.87	58.0	155.14	64.0	155.87	70.0
GR	155.68	76.0	155.87	82.0	155.86	88.0	156.10	94.0	156.12	100.0
GR	156.12	106.0	156.08	112.0	155.94	118.0	155.84	125.0	154.32	127.5
GR	153.98	130.5	153.58	134.5	153.38	138.5	153.38	142.5	153.38	146.5
GR	153.55	150.5	153.60	154.5	153.60	158.5	153.68	162.5	153.72	166.5
GR	153.88	170.5	153.88	174.5	153.72	178.5	153.70	182.5	154.32	186.5
GR	155.22	189.5	155.11	195.5	154.13	201.5	155.85	205.5	157.00	209.7
GR	157.02	215.7	157.03	221.7	157.05	229.7	157.00	233.7	157.00	235.7
GR	157.00	236.5	157.00	238.5	157.00	240.5	157.00	242.5	157.00	244.5
GR	157.00	246.5	157.00	248.5	157.00	250.5	157.00	251.5	157.00	256.5
GR	157.00	261.5	157.00	271.5	157.00	281.5	157.04	286.5	157.90	291.5
GR	158.78	296.5	158.87	302.0						

X1	10.5	24	16.4	117.2	200	200	200			
GR	158.94	0.0	158.67	13.8	156.82	16.4	155.62	21.8	154.83	28.8
GR	154.92	36.6	154.82	44.2	154.37	51.8	154.07	59.1	154.77	67
GR	154.66	72.8	154.33	80.8	154.13	84.8	153.91	88.8	153.83	92.8
GR	153.73	96.8	153.53	100.8	153.63	104.8	154.33	108.8	155.21	112.2
GR	157.04	117.2	157.25	129.8	157.1	160.6	157.5	171.8		

NC	0.14		0.047	.1	.3					
QT	6	96	105	283	650	680	765			
X1	10	74	59.0	340.0	250	250	250			
X5	1			156.95						
GR	157.05	1.0	157.15	5.0	157.34	20.0	157.05	37.0	157.11	56.0
GR	156.99	59.0	155.37	62.0	155.46	65.0	155.67	68.0	155.51	71.0
GR	155.41	74.0	155.56	77.0	155.15	80.0	154.97	83.0	155.03	86.0
GR	155.11	89.0	155.12	92.0	155.18	95.0	155.24	98.0	155.35	101.0
GR	155.35	104.0	155.56	107.0	155.78	110.0	156.11	113.0	156.12	116.0
GR	156.12	119.0	156.24	122.0	156.27	125.0	156.19	128.0	156.40	131.0
GR	156.58	134.0	156.48	137.0	156.48	140.0	156.45	143.0	156.43	146.0
GR	156.27	149.0	156.19	152.0	156.07	156.0	155.91	158.0	155.91	161.0
GR	155.78	164.0	155.73	167.0	155.53	170.0	155.58	173.0	155.38	176.0
GR	155.28	179.0	155.08	182.0	154.83	185.0	154.63	188.0	154.78	191.0
GR	154.68	194.0	154.68	197.0	154.88	200.0	155.08	203.0	155.23	206.0
GR	155.38	209.0	155.68	211.0	155.98	212.0	156.83	214.0	156.79	226.0
GR	157.08	232.0	157.26	247.0	157.15	261.0	156.49	267.0	155.57	274.0
GR	155.49	279.0	155.04	285.0	154.89	290.0	155.06	295.0	155.26	302.0
GR	156.38	304.0	156.6	320	157.0	340	158.0	400.0		

NC	0.11		.052							
X1	09	68	424.0	550.0	360	360	360			
GR	158.05	0.0	158.42	1.0	157.77	7.0	158.87	11.0	159.52	21.0
GR	159.82	29.0	160.64	35.0	161.03	40.0	160.94	53.0	160.82	74.0
GR	160.49	96.0	160.84	116.0	159.66	136.0	159.96	150.0	159.30	163.0
GR	158.27	178.0	157.82	199.0	158.30	215.0	157.46	236.0	156.92	246.0
GR	160.34	256.0	160.71	276.0	160.19	287.0	160.74	298.0	159.74	308.0
GR	159.38	326.0	160.03	337.0	159.64	360.0	158.02	386.0	159.44	397.0
GR	158.94	414.0	159.22	424.0	157.35	427.0	156.75	430.0	156.57	430.8
GR	156.37	433.0	156.17	436.0	156.17	439.0	156.07	442.0	155.87	445.0
GR	155.72	448.0	155.67	451.0	155.47	464.0	155.32	457.0	155.42	460.0
GR	155.42	463.0	155.42	466.0	155.77	469.0	156.47	472.0	156.47	475.0
GR	156.57	478.0	156.47	481.0	156.12	484.0	155.97	487.0	155.82	490.0
GR	155.97	493.0	156.17	496.0	156.27	499.0	156.27	502.0	156.47	505.0
GR	156.62	508.0	156.52	511.0	156.32	514.0	156.47	517.0	156.67	520.0
GR	156.88	523.0	157.28	526.0	159.0	550.0				

NC			.055	.3	.5					
X1	08	71	80.0	292.2	200	380	360			
GR	161.58	0.0	161.21	10.0	161.51	20.0	161.36	30.0	161.48	40.0
GR	161.41	50.0	161.38	60.0	161.50	70.0	161.82	80.0	160.26	82.0
GR	159.00	86.0	158.89	89.3	158.80	93.3	158.81	97.3	158.90	101.3
GR	158.97	105.3	158.90	109.3	158.91	113.3	158.97	117.3	158.94	121.3
GR	158.87	125.3	158.87	129.3	158.88	133.3	158.99	137.3	158.98	141.3
GR	158.99	145.3	159.14	147.3	159.57	151.3	160.20	155.9	160.11	165.9
GR	159.53	170.9	160.13	175.9	160.14	185.9	160.29	195.9	160.11	205.9
GR	160.16	215.9	160.41	223.9	158.83	226.9	158.54	229.4	158.46	233.4
GR	158.71	237.4	158.70	241.4	158.65	245.4	158.47	249.4	158.46	253.4
GR	158.13	257.4	158.25	261.4	158.25	265.4	158.20	269.4	158.10	273.4
GR	157.98	277.4	158.08	281.4	158.45	285.4	158.85	287.2	159.49	289.2
GR	161.56	292.2	161.70	299.2	161.85	309.2	161.60	319.2	160.94	329.2
GR	160.87	339.2	160.94	349.2	160.91	358.7	160.18	360.5	159.45	364.2
GR	160.18	366.8	161.77	370.2	161.69	374.2	160.92	377.2	161.13	380.7

GR	162.48	383.2								
NC	.18		0.040							
X1	07	71	90.0	205.0	330	330	330			
GR	160.29	0.0	159.90	3.0	159.23	6.0	159.21	9.0	159.66	12.0
GR	160.34	15.0	160.71	18.0	160.80	21.0	160.92	24.0	160.86	27.0
GR	160.89	30.0	160.73	33.0	160.61	36.0	161.72	42.0	161.66	45.0
GR	161.48	48.0	161.48	51.0	161.31	54.0	161.38	57.0	161.47	60.0
GR	161.71	63.0	161.72	66.0	161.72	69.0	161.72	72.0	161.89	75.0
GR	161.76	78.0	161.88	81.0	161.96	84.0	161.84	87.0	161.85	90.0
GR	161.56	93.0	161.25	96.0	160.84	99.0	160.84	100.0	159.73	101.9
GR	159.43	103.1	159.33	106.1	159.28	109.1	159.33	112.1	159.38	115.1
GR	159.13	118.1	159.23	121.1	159.18	124.1	159.28	127.1	159.18	130.1
GR	159.28	133.1	159.23	136.1	159.13	139.1	159.13	142.1	159.13	145.1
GR	159.08	148.1	159.03	151.1	158.98	154.1	159.03	157.1	159.03	160.1
GR	158.88	163.0	158.88	166.0	158.93	169.0	158.83	172.0	158.73	175.0
GR	158.73	178.0	158.63	181.0	158.68	184.0	158.73	187.0	158.68	190.0
GR	158.68	193.0	159.73	196.0	161.40	199.0	161.37	203.0	162.09	205.0
GR	162.17	212.2								
X1	06	35	87.0	163.2	410	410	410			
GR	164.36	0.0	161.85	2.4	160.99	6.0	161.24	9.6	162.49	12.5
GR	161.94	20.5	162.80	30.0	162.36	40.0	162.90	50.0	163.14	60.0
GR	162.75	70.0	162.86	80.0	162.84	87.0	161.43	89.0	160.72	95.0
GR	160.19	101.6	159.86	105.6	159.93	109.6	159.84	113.6	159.61	117.6
GR	159.59	121.6	159.49	125.6	159.51	129.6	159.53	133.6	159.11	137.6
GR	158.81	141.6	158.59	145.6	158.59	149.6	159.49	153.6	160.18	157.6
GR	161.09	158.6	162.46	159.2	163.36	163.2	163.63	171.2	164.09	176.2
QT	6	91	100.5	270	619	665	730			
X1	05	29	-25.0	71.60	290	290	290			
GR	165.0	-60.0	164.0	-40.0	163.5	-30.5	163.5	-25.0	163.0	-18.0
GR	162.20	0.0	160.88	6.3	159.88	9.0	159.43	12.0	159.48	15.0
GR	159.68	18.0	159.63	21.0	159.78	24.0	159.88	27.0	160.03	30.0
GR	159.88	33.0	159.83	36.0	159.68	39.0	159.68	43.0	160.03	45.0
GR	160.28	48.0	160.33	51.0	160.48	54.0	160.63	57.0	160.63	60.0
GR	161.23	63.0	161.87	66.0	162.87	69.0	163.79	71.6		
NC	.12		0.033							
X1	04	24	0.0	75.0	450	450	450			
GR	165.03	0.0	162.82	16.0	162.72	18.0	162.37	21.0	162.32	24.0
GR	162.17	27.0	162.07	30.0	161.97	33.0	161.92	36.0	161.92	39.0
GR	161.87	42.0	161.82	45.0	161.77	48.0	161.87	51.0	161.82	54.0
GR	162.02	57.0	162.07	60.0	162.22	63.0	162.32	66.0	162.62	69.0
GR	162.82	70.9	163.43	72.0	165.25	75.0	165.38	78.7		
X1	3.4	24	4.8	82.5	190	190	190			
GR	166.71	0.0	165.61	2.2	165.70	4.8	164.59	6.0	163.51	14.8
GR	162.92	21.9	162.92	25.9	162.60	29.9	162.68	33.9	162.64	37.9
GR	162.57	41.9	162.58	45.9	162.42	49.9	162.27	53.9	162.12	57.9
GR	162.02	61.9	161.89	65.9	161.97	69.9	162.92	73.5	163.99	76.7
GR	165.21	79.5	166.31	82.5	166.35	91.3	166.31	112.3		

NC			0.031							
X1	03	76	0.1	360.0	180	180	180			
GR	166.97	0.1	165.01	4.2	164.86	6.0	164.51	9.0	164.36	12.0
GR	164.26	15.0	164.41	18.0	164.21	21.0	164.11	24.0	164.21	27.0
GR	164.11	30.0	164.21	33.0	164.21	36.0	164.51	39.0	164.56	42.0
GR	164.61	45.0	164.76	48.0	164.86	51.0	166.97	54.0	166.42	56.0
GR	166.42	56.3	166.48	59.3	166.68	62.3	166.36	65.3	166.34	68.3
GR	166.49	71.3	166.49	74.3	166.60	77.3	166.63	80.3	166.63	83.3
GR	166.33	86.3	165.87	89.3	165.89	92.3	165.83	95.3	165.79	98.3
GR	165.61	101.3	165.58	104.3	165.58	107.3	165.56	110.3	165.33	113.3
GR	165.32	116.3	165.45	119.3	165.40	121.3	165.38	121.8	165.04	130.0
GR	164.99	133.0	164.79	136.0	164.59	139.0	164.64	142.0	164.49	145.0
GR	164.44	148.0	164.44	151.0	164.44	154.0	164.39	157.0	164.39	160.0
GR	164.34	163.0	164.39	166.0	164.44	169.0	165.04	170.4	166.68	172.3
GR	166.68	174.0	166.78	175.0	166.70	178.0	166.74	181.0	166.60	184.0
GR	166.49	187.0	166.50	190.0	166.40	193.0	166.00	194.8	165.03	196.0
GR	164.73	199.0	164.63	302.0	164.68	305.0	164.73	308.0	164.83	311.0
GR	165.91	313.5	167.0	360.0						

X1	02	72	-3.2	206.3	500	500	500			
GR	169.78	-3.2	167.50	0.0	167.25	3.8	167.00	6.8	166.80	9.8
GR	167.00	12.8	166.90	15.8	166.90	18.8	166.90	21.8	166.90	24.8
GR	166.90	27.8	166.80	30.8	166.80	33.8	166.65	36.8	166.75	39.8
GR	166.80	42.8	166.95	45.8	167.50	47.6	168.57	48.5	169.04	49.2
GR	169.04	50.5	169.46	53.5	169.58	56.5	169.94	59.5	169.47	62.5
GR	169.59	65.5	169.68	68.5	169.38	71.5	169.23	74.5	169.24	77.5
GR	169.11	80.5	169.24	83.5	169.33	86.5	169.47	89.5	169.70	92.5
GR	169.66	95.5	169.60	98.5	169.48	101.5	169.57	104.5	169.45	107.5
GR	169.42	110.5	169.64	113.5	169.37	116.5	169.27	119.5	169.40	122.5
GR	169.31	125.5	169.37	128.5	169.28	131.5	169.03	134.5	169.14	137.5
GR	168.90	141.0	166.56	160.3	166.36	163.3	166.31	166.3	166.31	169.3
GR	166.11	172.3	166.01	175.3	166.01	178.3	166.01	181.3	166.11	184.3
GR	166.01	187.3	165.81	190.3	165.71	193.3	166.11	196.3	166.81	199.3
GR	167.74	202.3	170.00	206.3	170.21	207.3	170.19	211.3	170.18	215.3
GR	170.16	219.3	169.98	223.3						

NC			.032							
X1	01	30	0.1	71.0	590	590	590			
GR	171.82	0.1	169.42	3.0	168.22	6.0	167.52	9.0	167.52	12.0
GR	167.72	15.0	167.52	18.0	167.62	21.0	167.52	24.0	166.72	27.0
GR	166.62	30.0	166.92	33.0	166.72	36.0	167.22	39.0	167.62	42.0
GR	168.02	45.0	168.12	48.0	168.42	51.0	168.52	54.0	168.72	57.0
GR	168.92	60.0	169.22	63.0	169.89	63.0	170.43	65.0	171.46	67.0
GR	172.15	71.0	172.34	79.0	172.18	87.0	172.53	91.0	172.66	96.0

25MAY94 08:53:37

PAGE 6

*PROF 1

25MAY94 08:53:37

PAGE 7

T1

T2 CALIBRAGE

T3

J1	ICHECK	INQ	NINV	IDIR	STRT	METRIC	HVINS	Q	WSEL	FQ
		3				1			153.22	
J2	NPROF	IPLOT	PRFVS	XSECV	XSECH	FN	ALLDC	IBW	CHNIM	ITRACE
	2		-1			1				

*PROF 2

25MAY94 08:53:37

PAGE 8

T1
T2 CALIBRAGE
T3

J1	ICHECK	INQ	NINV	IDIR	STRT	METRIC	HVINS	Q	WSEL	FQ
		4				1			153.90	
J2	NPROF	IPLOT	PRFVS	XSECV	XSECH	FN	ALLDC	IBW	CHNIM	ITRACE
	3		-1			1				

*PROF 3

25MAY94 08:53:37

PAGE 9

T1

T2 CRUE 20 ANS Q = 659 m3/s

T3

J1	ICHECK	INQ	NINV	IDIR	STRT	METRIC	HVINS	Q	WSEL	FQ
		5				1			155.67	
J2	NPROF	IPLOT	PRFVS	XSECV	XSECH	FN	ALLDC	IBW	CHNIM	ITRACE
	4		-1			1				

*PROF 4

25MAY94 08:53:37

PAGE 10

T1
T2 CALIBRAGE 6 MAI 1989 - PHOTOS CUQ DE 18H00
T3 Q = 690 m3/s

J1	ICHECK	INQ	NINV	IDIR	STRT	METRIC	HVINS	Q	WSEL	FQ
		6				1			155.77	
J2	NPROF	IPLOT	PRFVS	XSECV	XSECH	FN	ALLOC	IBW	CHNIM	ITRACE
	5		-1			1				

*PROF 5

25MAY94 08:53:37

PAGE 11

T1
T2 CRUE 100 ANS Q = 776 m3/s
T3

J1	ICHECK	INQ	NINV	IDIR	STRT	METRIC	HVINS	Q	WSEL	FQ
		7				1			156.00	
J2	NPROF	IPLOT	PRFVS	XSECV	XSECH	FW	ALLDC	IBW	CHNIM	ITRACE
	6		-1			1				

*PROF 6

THIS RUN EXECUTED 25MAY94 08:54:18

HEC2 RELEASE DATED SEP 88 UPDATED JUN 1990

ERROR CORR - 01,02,03,04

MODIFICATION -

NOTE- ASTERISK (*) AT LEFT OF CROSS-SECTION NUMBER INDICATES MESSAGE IN SUMMARY OF ERRORS LIST

RIVIERE MONTMORENCY

SUMMARY PRINTOUT

	SECNO	Q	CWSEL	10*KS	QLOB	QCH	QROB	VLOB	VCH	VROB	K*XNL	K*XNCH	K*XNR
	14.000	97.00	153.12	6.28	.00	97.00	.00	.00	1.00	.00	.00	30.00	.00
	14.000	107.00	153.22	6.03	.00	107.00	.00	.00	1.02	.00	.00	30.00	.00
	14.000	210.00	153.90	6.43	.00	210.00	.00	.00	1.35	.00	.00	30.00	.00
	14.000	659.00	155.67	7.69	3.41	650.92	4.67	.25	2.21	.20	100.00	30.00	100.00
	14.000	690.00	155.77	7.69	4.10	679.86	6.03	.26	2.25	.22	100.00	30.00	100.00
	14.000	776.00	156.00	7.92	6.09	760.06	9.84	.29	2.37	.26	100.00	30.00	100.00
	13.000	97.00	153.40	4.60	.00	97.00	.00	.00	.88	.00	.00	30.00	.00
	13.000	107.00	153.50	4.55	.00	107.00	.00	.00	.91	.00	.00	30.00	.00
	13.000	210.00	154.22	5.15	.00	210.00	.00	.00	1.16	.00	.00	30.00	.00
	13.000	659.00	156.08	5.29	4.14	654.03	.84	.20	1.82	.15	100.00	30.00	100.00
	13.000	690.00	156.18	5.29	5.03	683.84	1.13	.22	1.85	.15	100.00	30.00	100.00
	13.000	776.00	156.43	5.34	7.74	765.93	2.33	.25	1.94	.16	100.00	30.00	100.00
*	12.000	97.00	153.67	9.47	.00	97.00	.00	.00	1.02	.00	.00	30.00	.00
	12.000	107.00	153.75	8.85	.00	107.00	.00	.00	1.03	.00	.00	30.00	.00
	12.000	210.00	154.47	6.84	.00	210.00	.00	.00	1.19	.00	.00	30.00	.00
	12.000	659.00	156.34	5.37	.00	659.00	.00	.00	1.66	.00	.00	30.00	.00
	12.000	690.00	156.44	5.28	.00	690.00	.00	.00	1.68	.00	.00	30.00	.00
	12.000	776.00	156.69	5.34	.00	776.00	.00	.00	1.76	.00	100.00	30.00	.00
*	11.500	97.00	154.05	20.55	.00	97.00	.00	.00	.73	.00	.00	62.00	.00
*	11.500	107.00	154.12	20.17	.00	107.00	.00	.00	.75	.00	.00	62.00	.00
*	11.500	210.00	154.77	16.27	.00	210.00	.00	.00	.88	.00	.00	62.00	.00
*	11.500	659.00	156.62	12.41	.00	658.68	.32	.00	1.26	.06	.00	62.00	110.00
*	11.500	690.00	156.72	12.28	.03	688.37	1.60	.04	1.27	.09	150.00	62.00	110.00
*	11.500	776.00	156.98	11.94	.27	766.45	9.28	.11	1.32	.17	150.00	62.00	110.00
*	11.000	97.00	154.81	48.29	.00	97.00	.00	.00	1.11	.00	.00	62.00	.00
*	11.000	107.00	154.88	48.90	.00	107.00	.00	.00	1.15	.00	.00	62.00	.00
*	11.000	210.00	155.43	50.38	.00	210.00	.00	.00	1.39	.00	.00	62.00	.00
*	11.000	659.00	157.08	32.68	4.04	653.41	1.54	.44	1.62	.19	150.00	62.00	110.00
*	11.000	690.00	157.17	31.37	4.46	682.34	3.20	.45	1.63	.20	150.00	62.00	110.00
*	11.000	776.00	157.41	28.51	5.79	760.03	10.19	.42	1.65	.29	150.00	62.00	110.00

	SECNO	Q	CWSEL	10*KS	QLOB	QCH	QROB	VLOB	VCH	VROB	K*XL	K*XLCH	K*XLNR
	10,500	97.00	155.56	28.43	.00	97.00	.00	.00	.94	.00	.00	62.00	.00
	10,500	107.00	155.64	28.74	.00	107.00	.00	.00	.97	.00	.00	62.00	.00
	10,500	210.00	156.22	30.78	.00	210.00	.00	.00	1.28	.00	.00	62.00	.00
	10,500	659.00	157.72	36.41	.12	648.52	10.36	.21	2.07	.36	150.00	62.00	110.00
	10,500	690.00	157.80	36.64	.15	676.90	12.95	.22	2.11	.39	150.00	62.00	110.00
	10,500	776.00	158.00	37.20	.24	754.80	20.95	.25	2.21	.48	150.00	62.00	110.00
	10,000	96.00	156.16	19.23	.00	96.00	.00	.00	.79	.00	.00	47.00	.00
	10,000	105.00	156.22	18.55	.00	105.00	.00	.00	.80	.00	.00	47.00	.00
*	10,000	283.00	156.95	19.50	.00	283.00	.00	.00	1.02	.00	.00	47.00	.00
*	10,000	650.00	158.26	7.32	12.85	628.08	9.07	.20	.99	.20	140.00	47.00	110.00
*	10,000	680.00	158.33	7.12	14.20	655.26	10.54	.21	1.00	.21	140.00	47.00	110.00
*	10,000	765.00	158.54	6.68	18.05	732.12	14.83	.23	1.02	.24	140.00	47.00	110.00
	9,000	96.00	157.05	35.33	.02	95.98	.00	.08	1.08	.00	110.00	52.00	.00
	9,000	105.00	157.10	35.49	.04	104.96	.00	.10	1.12	.00	110.00	52.00	.00
	9,000	283.00	157.86	39.63	3.76	279.24	.00	.37	1.64	.00	110.00	52.00	.00
*	9,000	650.00	158.66	51.85	39.42	610.58	.00	.56	2.32	.00	110.00	52.00	.00
*	9,000	680.00	158.73	51.55	44.68	635.32	.00	.58	2.35	.00	110.00	52.00	.00
*	9,000	765.00	158.90	50.65	60.73	704.27	.00	.63	2.41	.00	110.00	52.00	.00
*	8,000	96.00	159.21	126.69	.00	96.00	.00	.00	1.38	.00	.00	55.00	.00
*	8,000	105.00	159.25	123.89	.00	105.00	.00	.00	1.42	.00	.00	55.00	.00
*	8,000	283.00	159.87	86.65	.00	282.77	.23	.00	1.81	.30	.00	55.00	110.00
	8,000	650.00	160.80	64.50	.00	645.36	4.64	.00	1.96	.66	.00	55.00	110.00
	8,000	680.00	160.84	64.13	.00	674.97	5.03	.00	1.99	.67	.00	55.00	110.00
	8,000	765.00	160.97	63.07	.00	758.62	6.38	.00	2.08	.61	.00	55.00	110.00
*	7,000	96.00	160.17	11.27	1.15	94.85	.00	.15	.90	.00	180.00	40.00	.00
*	7,000	105.00	160.23	11.70	1.30	103.70	.00	.15	.94	.00	180.00	40.00	.00
*	7,000	283.00	160.98	16.04	5.84	277.15	.00	.24	1.50	.00	180.00	40.00	.00
*	7,000	650.00	161.94	22.20	25.06	624.94	.00	.33	2.17	.00	180.00	40.00	.00
*	7,000	680.00	162.00	22.62	27.05	652.95	.00	.33	2.22	.00	180.00	40.00	.00
*	7,000	765.00	162.14	23.70	33.02	731.98	.01	.35	2.35	.04	180.00	40.00	110.00
	6,000	96.00	160.76	20.23	.00	96.00	.00	.00	1.26	.00	.00	40.00	.00
	6,000	105.00	160.83	20.22	.00	105.00	.00	.00	1.30	.00	.00	40.00	.00
	6,000	283.00	161.74	24.71	.66	282.34	.00	.18	1.97	.00	180.00	40.00	.00
	6,000	650.00	162.91	30.16	9.16	640.84	.00	.27	2.83	.00	180.00	40.00	.00
	6,000	680.00	162.98	30.62	10.73	669.27	.00	.28	2.89	.00	180.00	40.00	.00
	6,000	765.00	163.17	31.94	15.96	749.04	.00	.30	3.05	.00	180.00	40.00	.00
	5,000	91.00	161.31	17.88	.00	91.00	.00	.00	1.22	.00	.00	40.00	.00
	5,000	100.50	161.39	18.24	.00	100.50	.00	.00	1.28	.00	.00	40.00	.00
	5,000	270.00	162.44	21.34	.00	270.00	.00	.00	1.83	.00	.00	40.00	.00
	5,000	619.00	163.83	21.76	.30	618.70	.00	.11	2.30	.00	180.00	40.00	.00
	5,000	665.00	163.91	22.81	.48	664.52	.00	.12	2.40	.00	180.00	40.00	.00
	5,000	730.00	164.13	21.44	1.16	728.84	.00	.16	2.44	.00	180.00	40.00	.00

	SECNO	Q	CWSEL	10*KS	QLOB	QCH	QROB	VLOB	VCH	VROB	K*XL	K*XLCH	K*XLNR
*	4.000	91.00	162.81	102.62	.00	91.00	.00	.00	2.40	.00	.00	33.00	.00
*	4.000	100.50	162.87	95.43	.00	100.50	.00	.00	2.43	.00	.00	33.00	.00
*	4.000	270.00	163.76	53.35	.00	270.00	.00	.00	2.87	.00	.00	33.00	.00
	4.000	619.00	164.97	41.55	.00	619.00	.00	.00	3.48	.00	.00	33.00	.00
	4.000	665.00	165.09	41.50	.00	665.00	.00	.00	3.56	.00	.00	33.00	.00
	4.000	730.00	165.24	41.52	.00	730.00	.00	.00	3.69	.00	.00	33.00	.00
*	3.400	91.00	163.70	16.08	.00	91.00	.00	.00	1.30	.00	.00	33.00	.00
*	3.400	100.50	163.77	16.50	.00	100.50	.00	.00	1.36	.00	.00	33.00	.00
*	3.400	270.00	164.62	20.43	.00	270.00	.00	.00	2.04	.00	.00	33.00	.00
	3.400	619.00	165.80	21.47	.04	618.96	.00	.10	2.81	.00	120.00	33.00	.00
	3.400	665.00	165.93	21.63	.13	664.87	.00	.16	2.90	.00	120.00	33.00	.00
	3.400	730.00	166.11	21.60	.31	729.69	.00	.21	3.00	.00	120.00	33.00	.00
*	3.000	91.00	164.87	133.73	.00	91.00	.00	.00	1.63	.00	.00	31.00	.00
*	3.000	100.50	164.89	127.89	.00	100.50	.00	.00	1.67	.00	.00	31.00	.00
*	3.000	270.00	165.25	71.87	.00	270.00	.00	.00	2.02	.00	.00	31.00	.00
	3.000	619.00	166.46	11.29	.00	619.00	.00	.00	1.46	.00	.00	31.00	.00
*	3.000	665.00	166.61	10.45	.00	665.00	.00	.00	1.42	.00	.00	31.00	.00
*	3.000	730.00	166.81	9.00	.00	730.00	.00	.00	1.37	.00	.00	31.00	.00
*	2.000	91.00	167.32	24.36	.00	91.00	.00	.00	1.32	.00	.00	31.00	.00
*	2.000	100.50	167.36	25.09	.00	100.50	.00	.00	1.38	.00	.00	31.00	.00
	2.000	270.00	167.84	39.75	.00	270.00	.00	.00	2.26	.00	.00	31.00	.00
*	2.000	619.00	168.23	85.73	.00	619.00	.00	.00	3.89	.00	.00	31.00	.00
*	2.000	665.00	168.30	84.88	.00	665.00	.00	.00	3.98	.00	.00	31.00	.00
*	2.000	730.00	168.41	82.61	.00	730.00	.00	.00	4.07	.00	.00	31.00	.00
	1.000	91.00	168.70	22.95	.00	91.00	.00	.00	1.59	.00	.00	32.00	.00
	1.000	100.50	168.77	23.37	.00	100.50	.00	.00	1.65	.00	.00	32.00	.00
	1.000	270.00	169.67	25.23	.00	270.00	.00	.00	2.37	.00	.00	32.00	.00
*	1.000	619.00	171.00	24.04	.00	619.00	.00	.00	3.14	.00	.00	32.00	.00
*	1.000	665.00	171.11	24.77	.00	665.00	.00	.00	3.25	.00	.00	32.00	.00
*	1.000	730.00	171.25	25.97	.00	730.00	.00	.00	3.42	.00	.00	32.00	.00

SUMMARY OF ERRORS AND SPECIAL NOTES

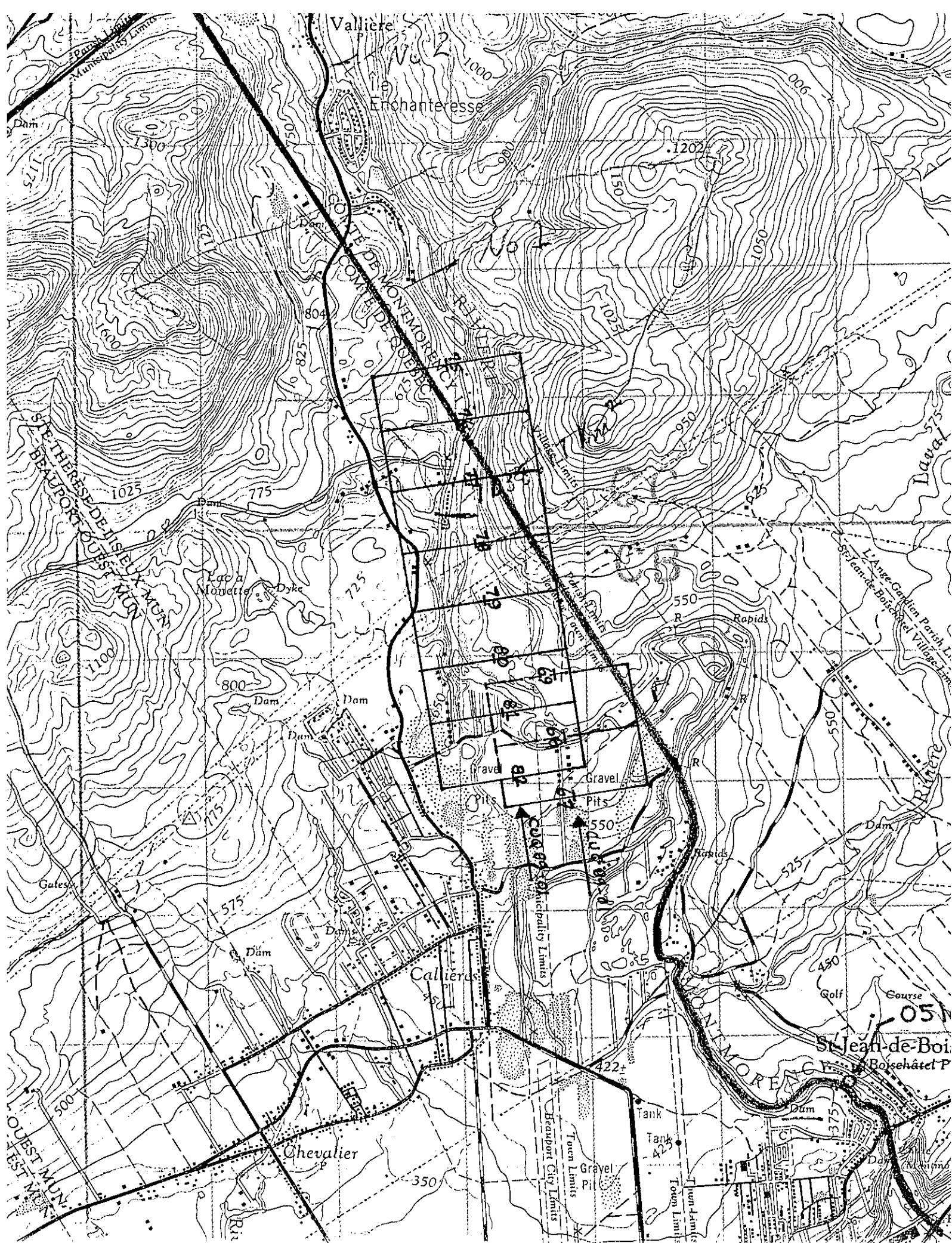
WARNING SECNO=	12.000	PROFILE=	1	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	11.500	PROFILE=	1	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	11.500	PROFILE=	2	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	11.500	PROFILE=	3	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	11.500	PROFILE=	4	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	11.500	PROFILE=	5	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	11.500	PROFILE=	6	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	11.000	PROFILE=	1	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	11.000	PROFILE=	2	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	11.000	PROFILE=	3	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	11.000	PROFILE=	4	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	11.000	PROFILE=	5	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	11.000	PROFILE=	6	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
NOTE SECNO=	10.000	PROFILE=	3	WSEL BASED ON X5 CARD
WARNING SECNO=	10.000	PROFILE=	3	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	10.000	PROFILE=	4	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	10.000	PROFILE=	5	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	10.000	PROFILE=	6	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	9.000	PROFILE=	4	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	9.000	PROFILE=	5	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	9.000	PROFILE=	6	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	8.000	PROFILE=	1	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	8.000	PROFILE=	2	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	8.000	PROFILE=	3	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	7.000	PROFILE=	1	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	7.000	PROFILE=	2	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	7.000	PROFILE=	3	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	7.000	PROFILE=	4	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	7.000	PROFILE=	5	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	7.000	PROFILE=	6	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	4.000	PROFILE=	1	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	4.000	PROFILE=	2	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	4.000	PROFILE=	3	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	3.400	PROFILE=	1	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	3.400	PROFILE=	2	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO=	3.400	PROFILE=	3	CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
CAUTION SECNO=	3.000	PROFILE=	1	CRITICAL DEPTH ASSUMED
CAUTION SECNO=	3.000	PROFILE=	1	PROBABLE MINIMUM SPECIFIC ENERGY
CAUTION SECNO=	3.000	PROFILE=	1	20 TRIALS ATTEMPTED TO BALANCE WSEL
CAUTION SECNO=	3.000	PROFILE=	2	CRITICAL DEPTH ASSUMED
CAUTION SECNO=	3.000	PROFILE=	2	PROBABLE MINIMUM SPECIFIC ENERGY
CAUTION SECNO=	3.000	PROFILE=	2	20 TRIALS ATTEMPTED TO BALANCE WSEL

WARNING SECNO= 3.000 PROFILE= 3 CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO= 3.000 PROFILE= 5 CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO= 3.000 PROFILE= 6 CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE

WARNING SECNO= 2.000 PROFILE= 1 CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO= 2.000 PROFILE= 2 CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
CAUTION SECNO= 2.000 PROFILE= 4 CRITICAL DEPTH ASSUMED
CAUTION SECNO= 2.000 PROFILE= 4 PROBABLE MINIMUM SPECIFIC ENERGY
CAUTION SECNO= 2.000 PROFILE= 4 20 TRIALS ATTEMPTED TO BALANCE WSEL
CAUTION SECNO= 2.000 PROFILE= 5 CRITICAL DEPTH ASSUMED
CAUTION SECNO= 2.000 PROFILE= 5 PROBABLE MINIMUM SPECIFIC ENERGY
CAUTION SECNO= 2.000 PROFILE= 5 20 TRIALS ATTEMPTED TO BALANCE WSEL
CAUTION SECNO= 2.000 PROFILE= 6 CRITICAL DEPTH ASSUMED
CAUTION SECNO= 2.000 PROFILE= 6 PROBABLE MINIMUM SPECIFIC ENERGY
CAUTION SECNO= 2.000 PROFILE= 6 20 TRIALS ATTEMPTED TO BALANCE WSEL

WARNING SECNO= 1.000 PROFILE= 4 CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO= 1.000 PROFILE= 5 CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE
WARNING SECNO= 1.000 PROFILE= 6 CONVEYANCE CHANGE OUTSIDE ACCEPTABLE RANGE

ANNEXE III





Rivière Montmorency
Ligne Pse (75-82)
Zeiss RMK A, 112637, f. 153.372 mm

LP

1:5000

6 MAI 1989

CUQ89-01

- 7



LP

1: 5000

26 MAI 1989

CUQ89-01

- 76

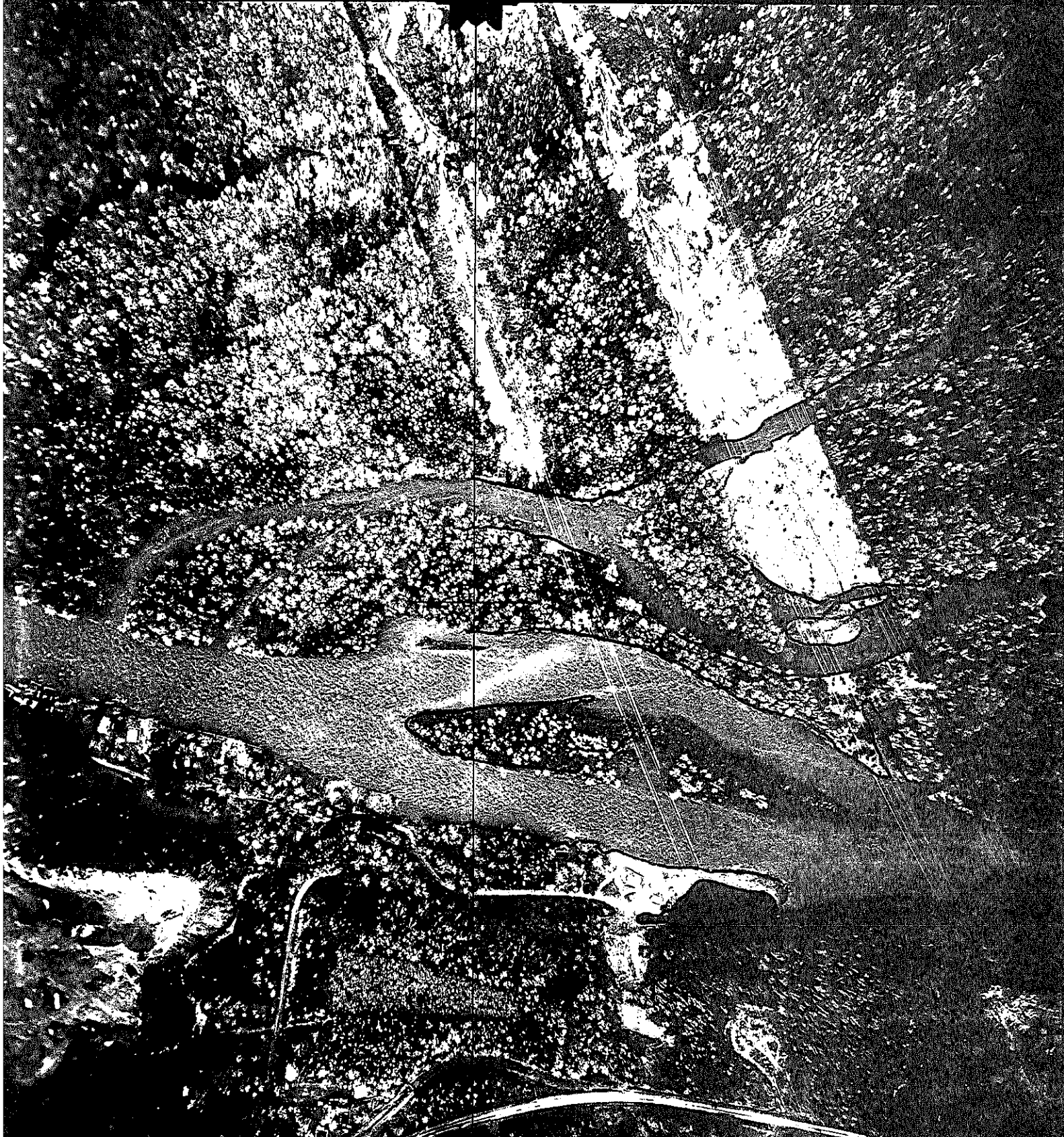


L P 1:5000

6 MAI 1989

CUQ89-01

- 77



LP

1:5000

6 MAI 1989

CU089-01

78



LP

1: 5000

6 MAI 1989

CUG89-01

79



LP

1:5000

6 MAI 1989

CUQ89-01

80



024
1974

CUQ8 501 - 66



8 9 5

LP

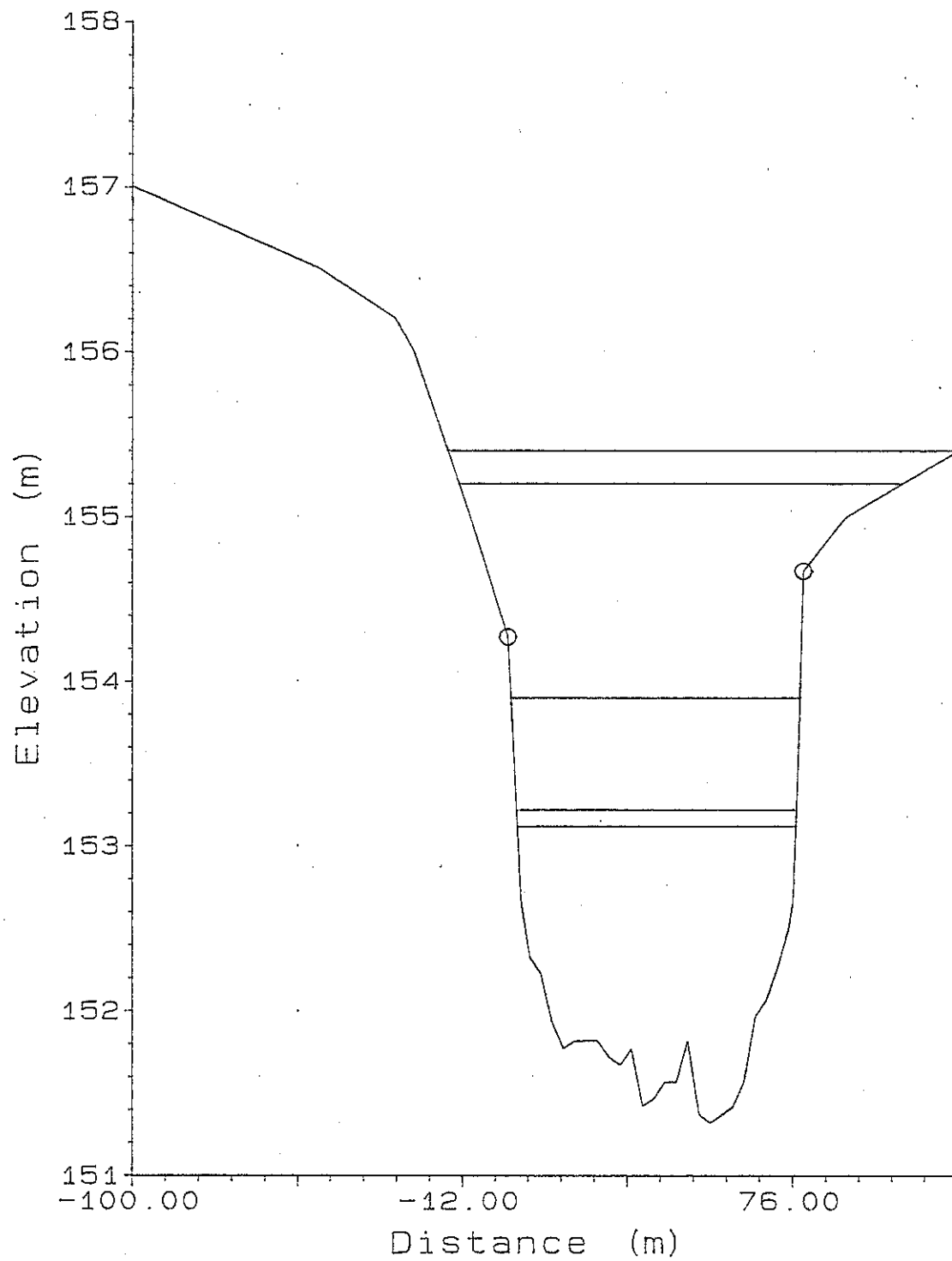
1 : 5000

6 MAI 1989

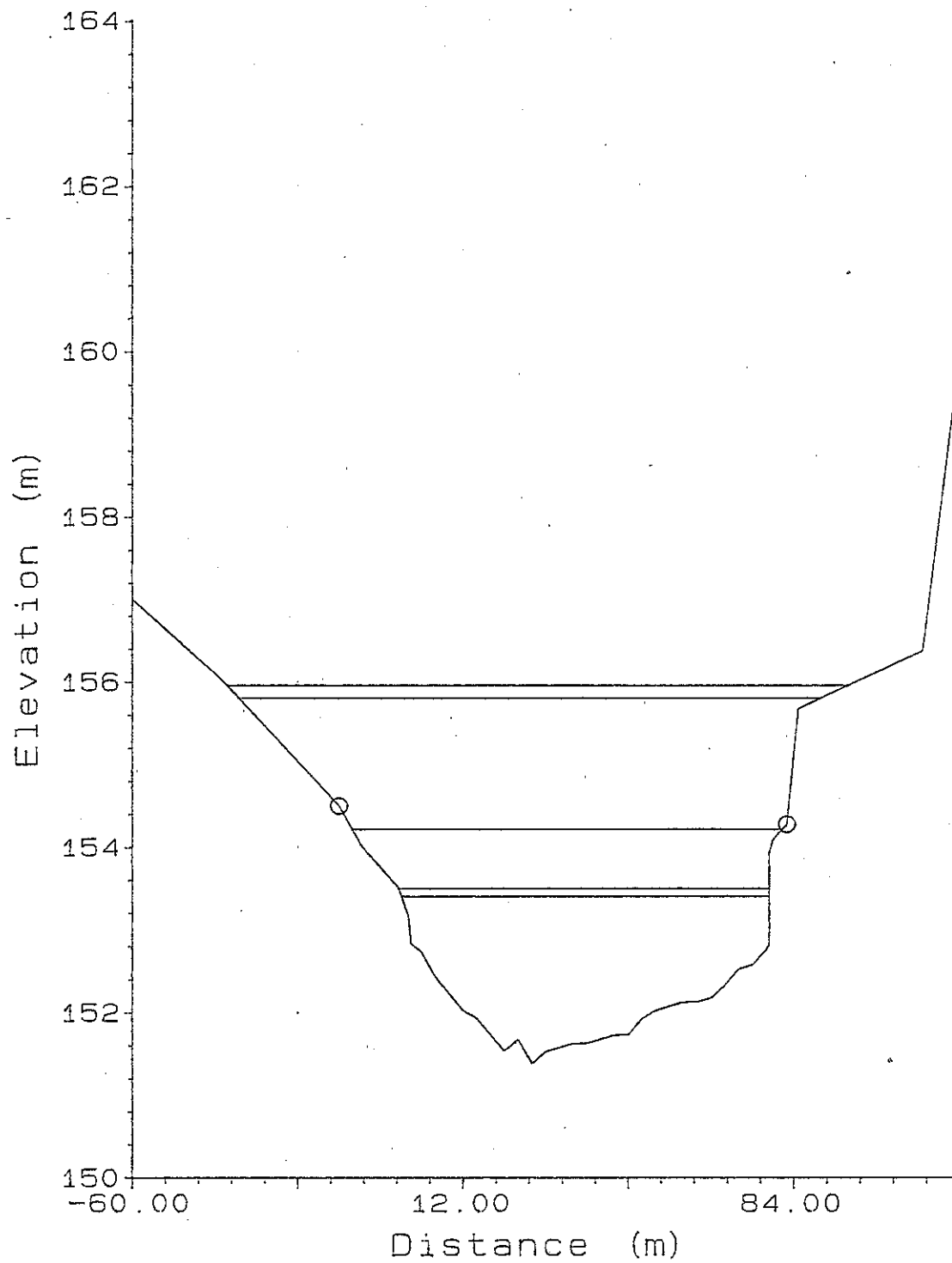
CUCe

ANNEXE IV

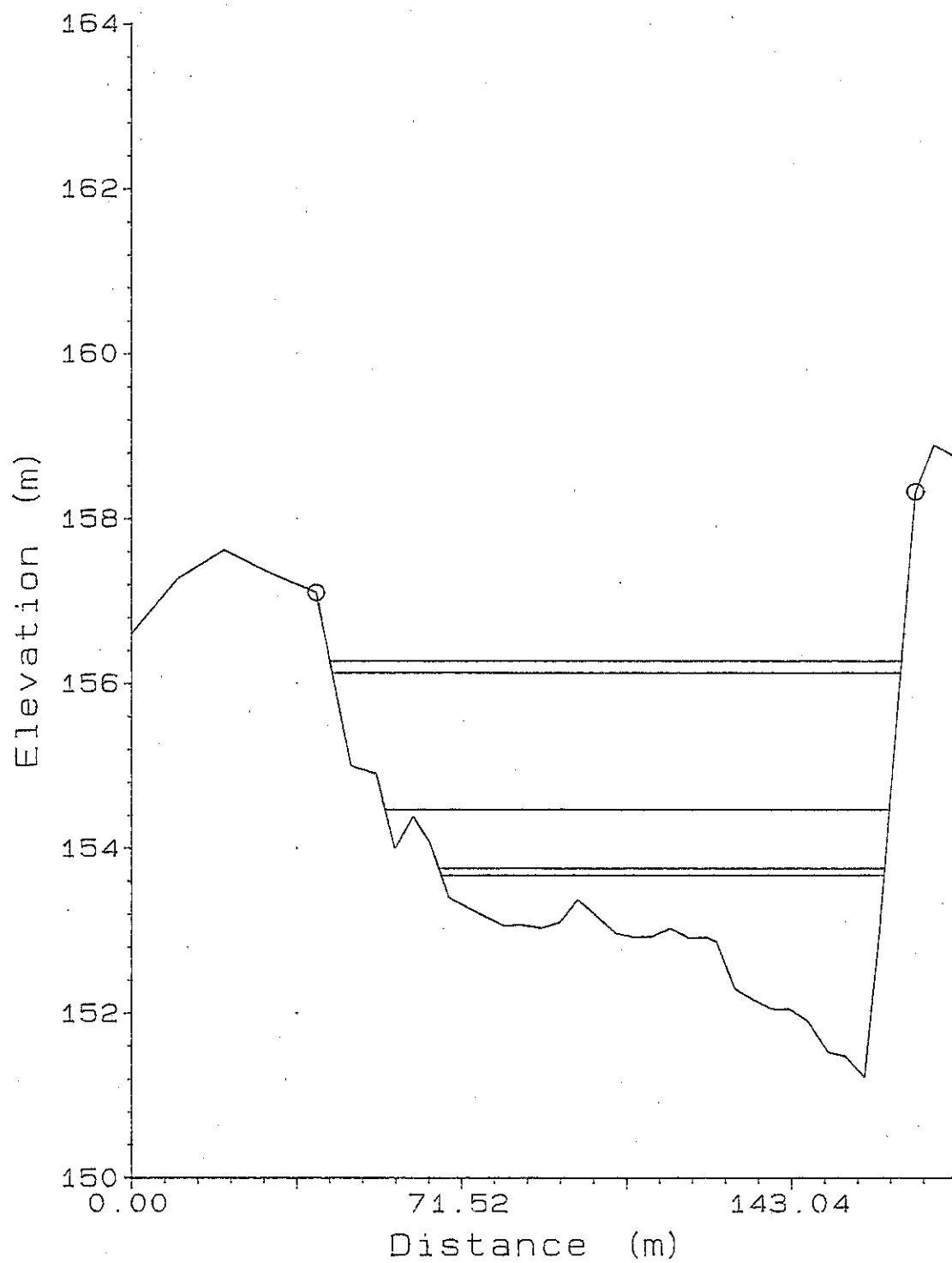
RIVIERE MONTMORENCY
Cross-section 14.000



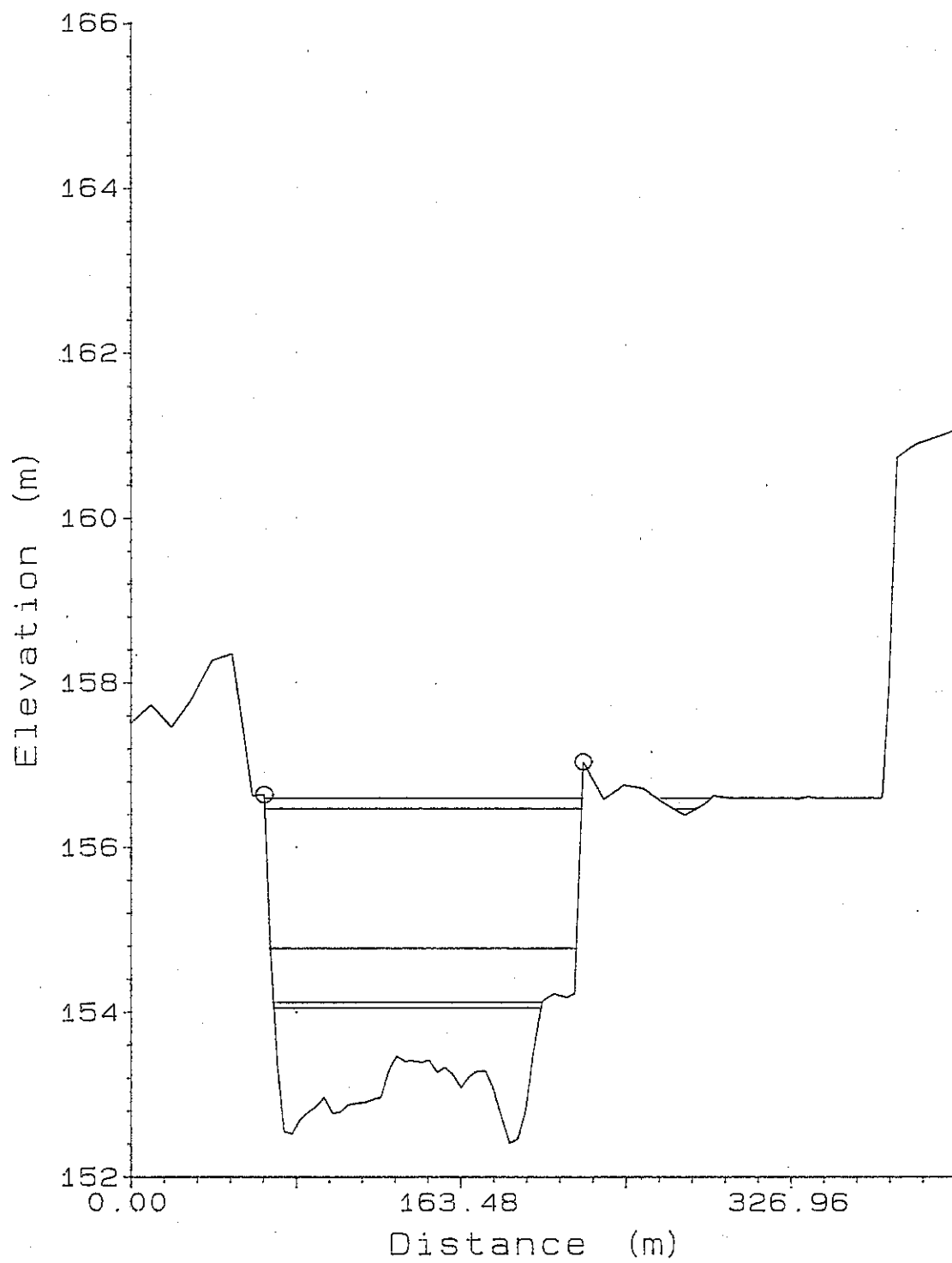
RIVIERE MONTMORENCY
Cross-section 13.000



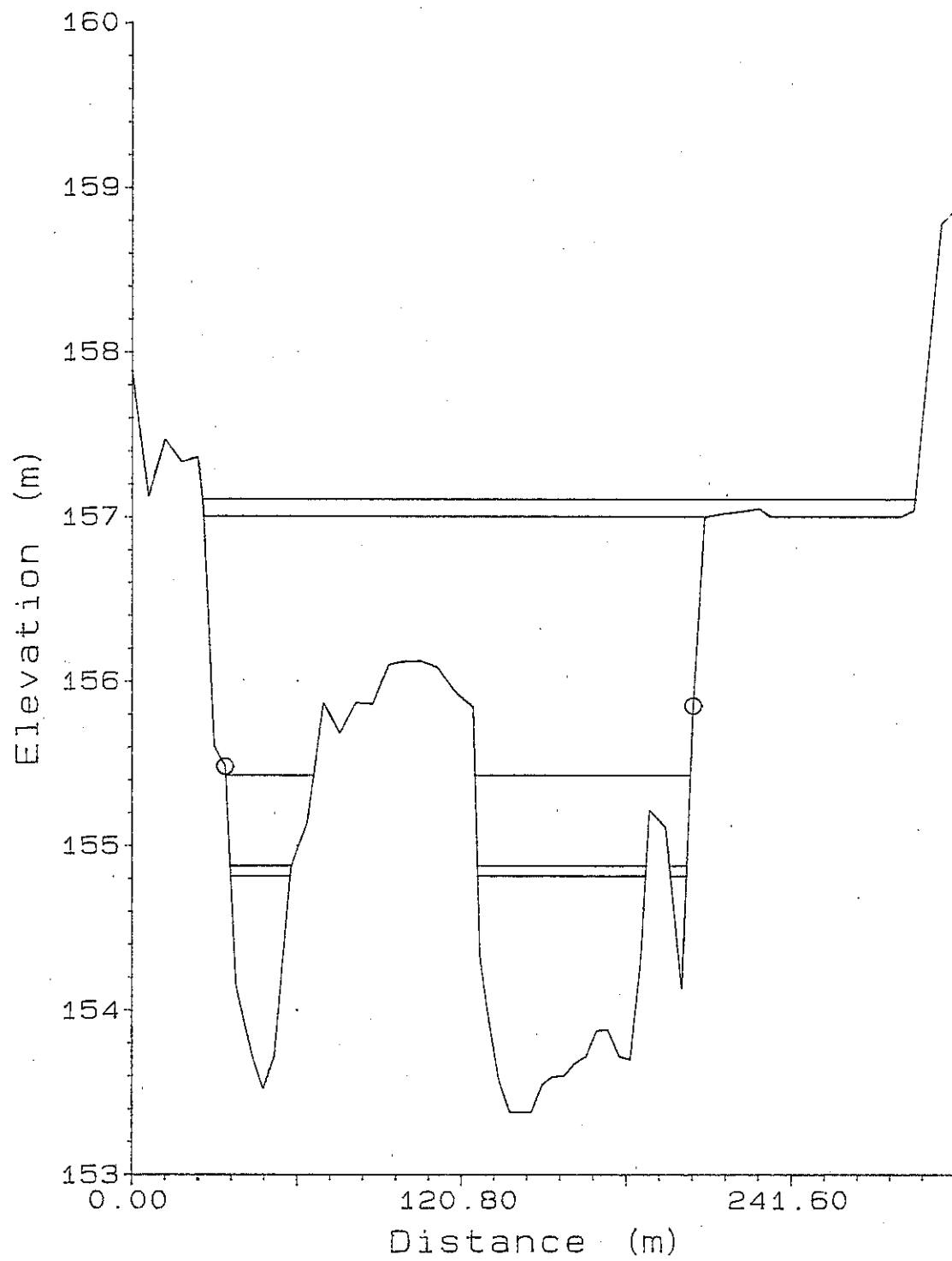
RIVIERE MONTMORENCY
Cross-section 12.000



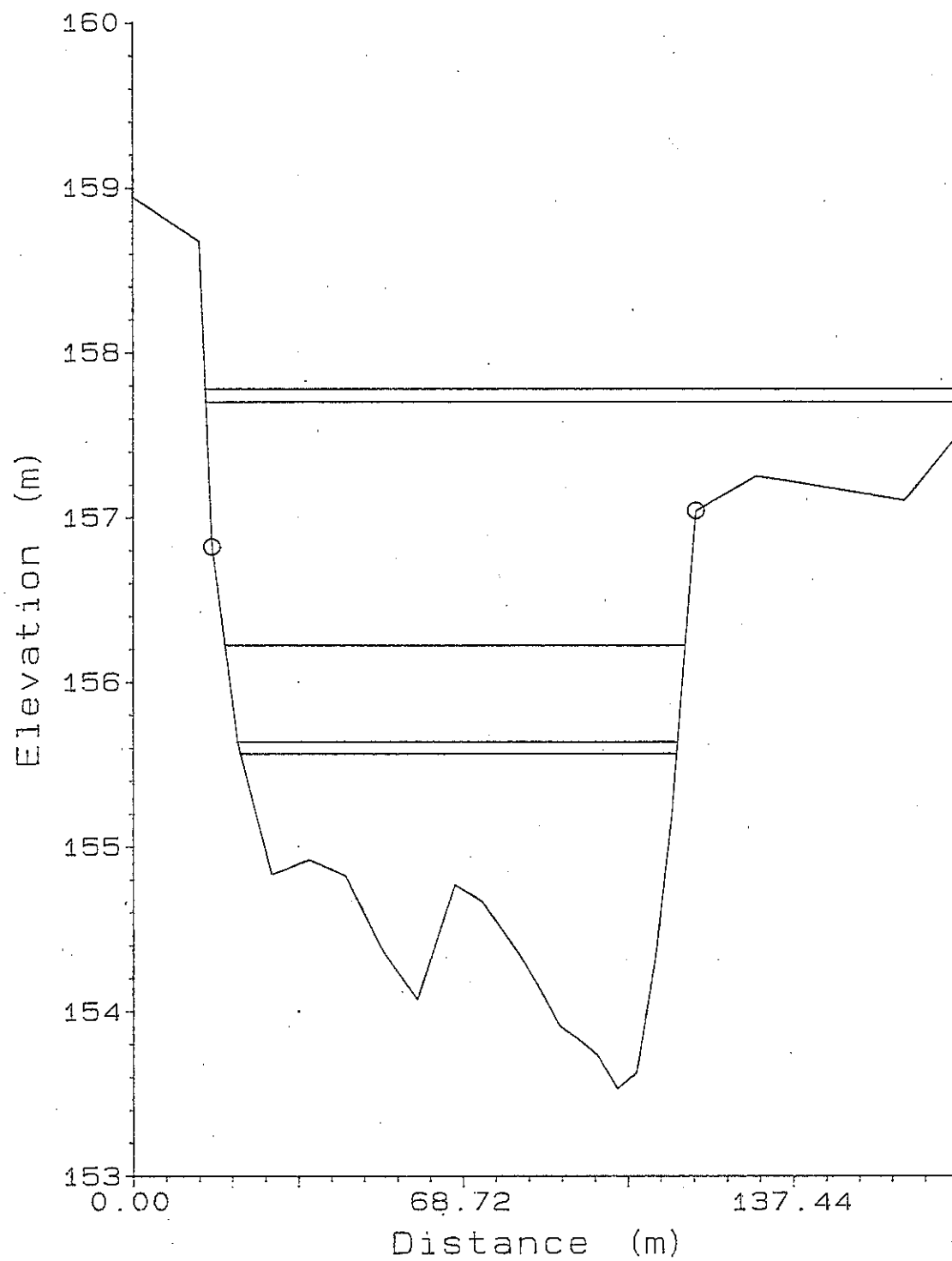
RIVIERE MONTMORENCY
Cross-section 11.500



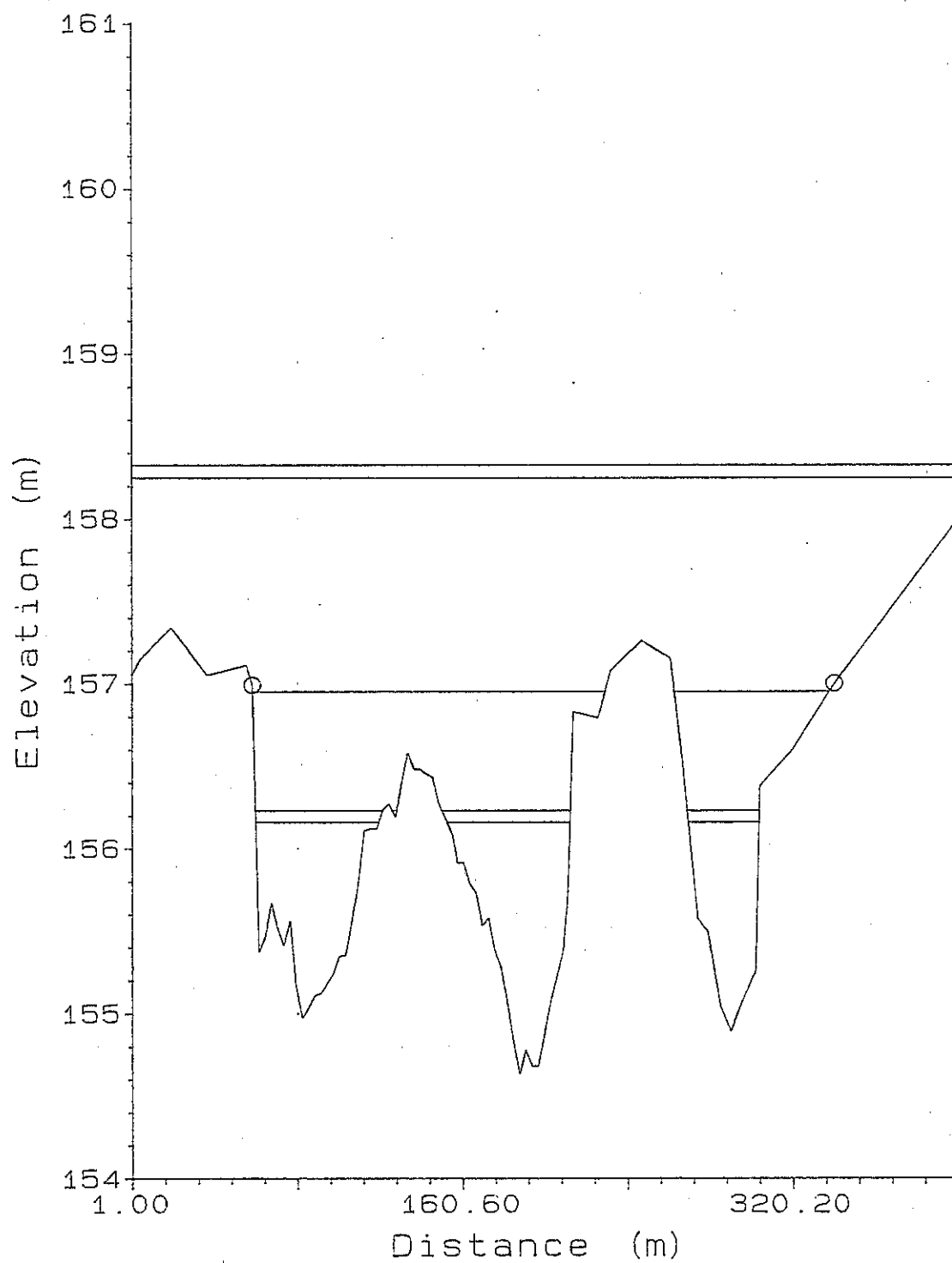
RIVIERE MONTMORENCY
Cross-section 11.000



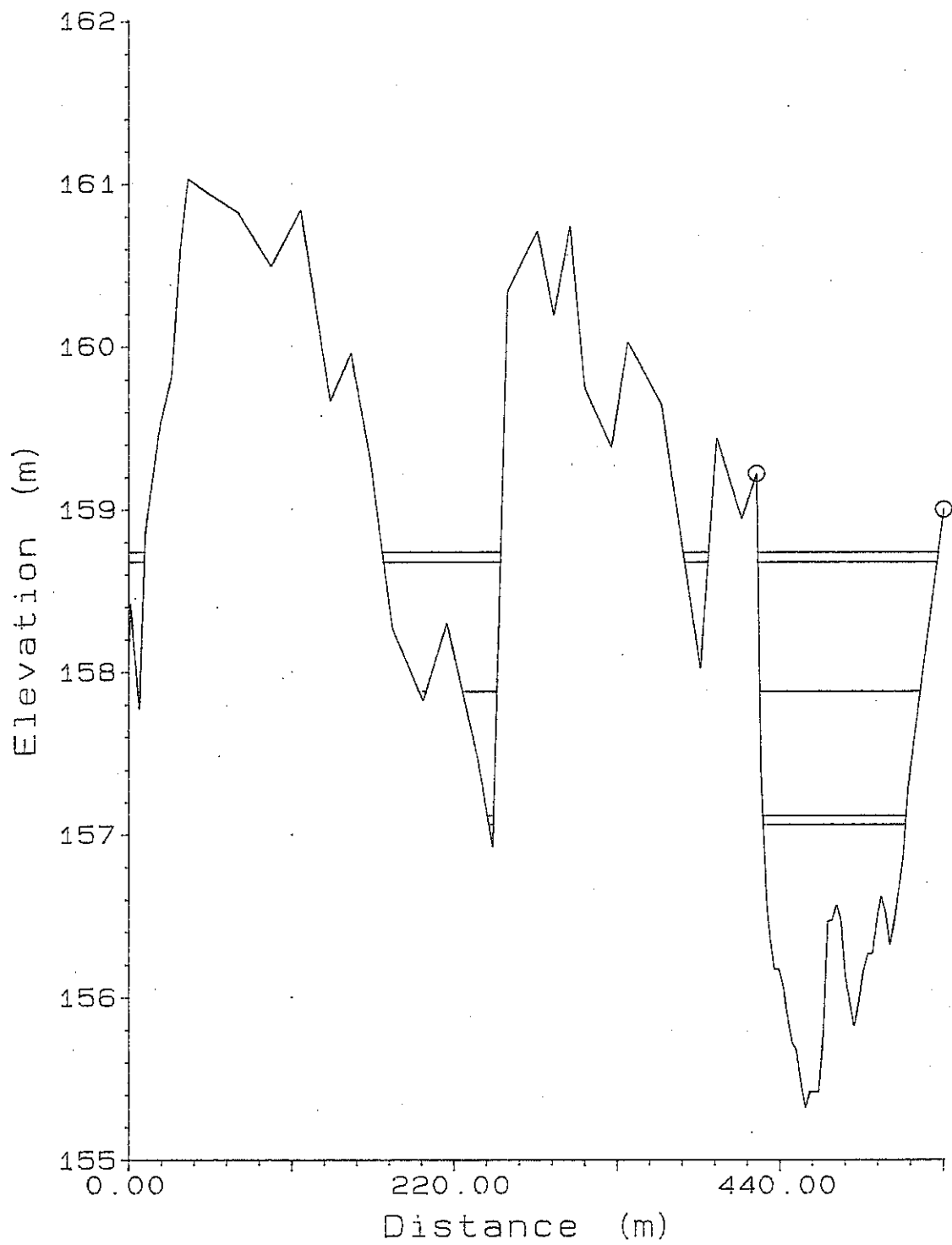
RIVIERE MONTMORENCY
Cross-section 10.500



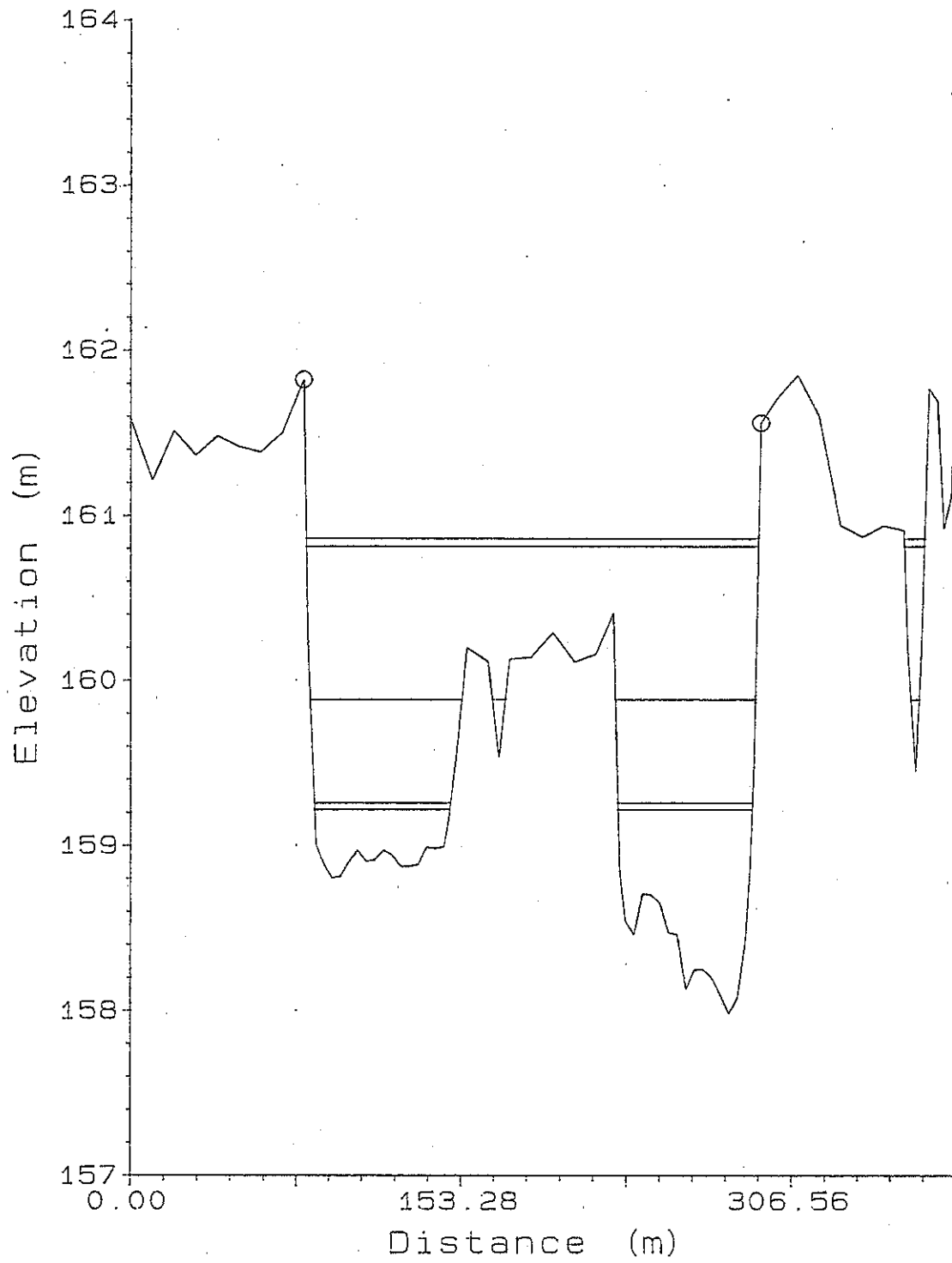
RIVIERE MONTMORENCY
Cross-section 10.000



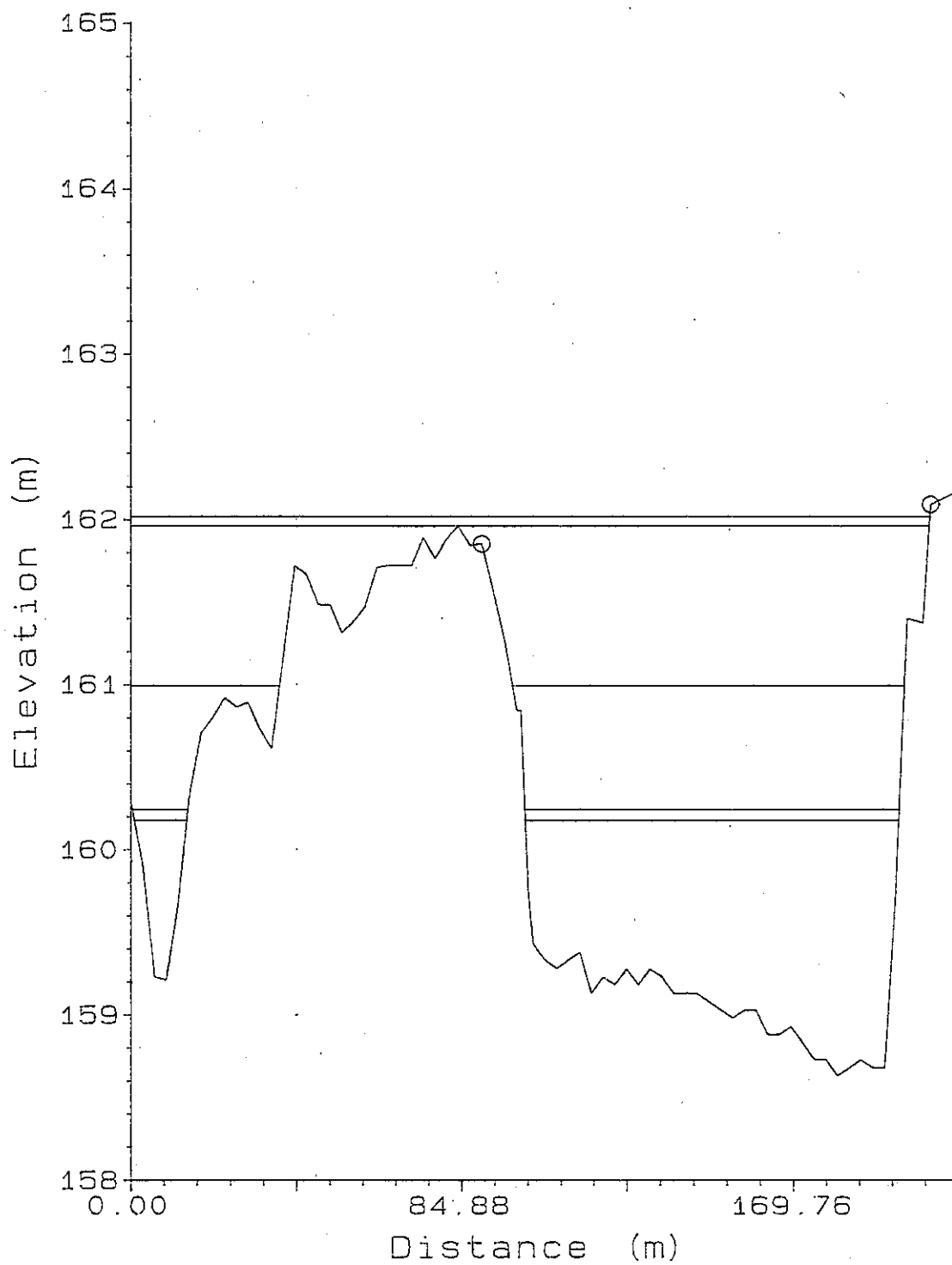
RIVIERE MONTMORENCY
Cross-section 9.000



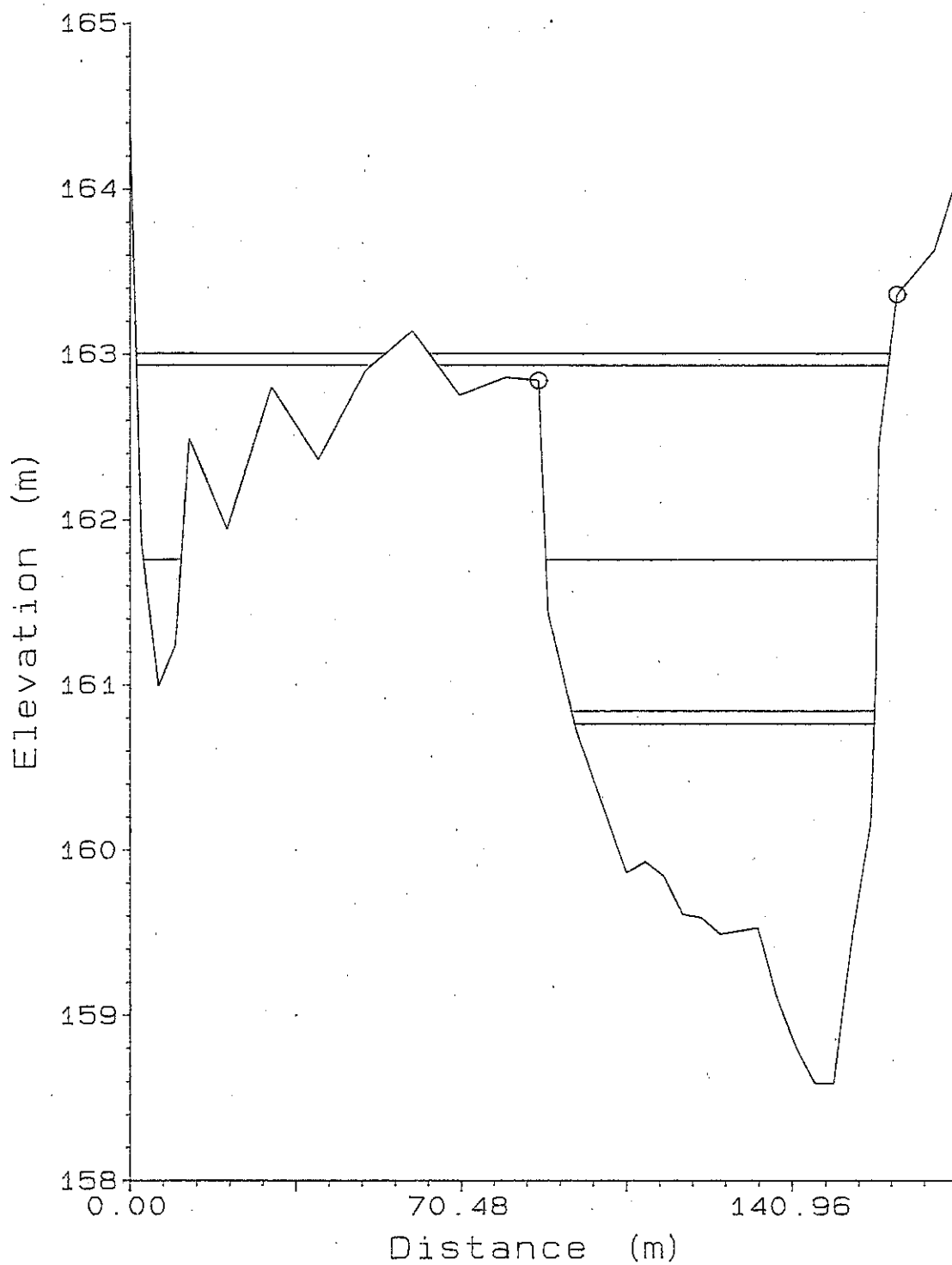
RIVIERE MONTMORENCY
Cross-section 8.000



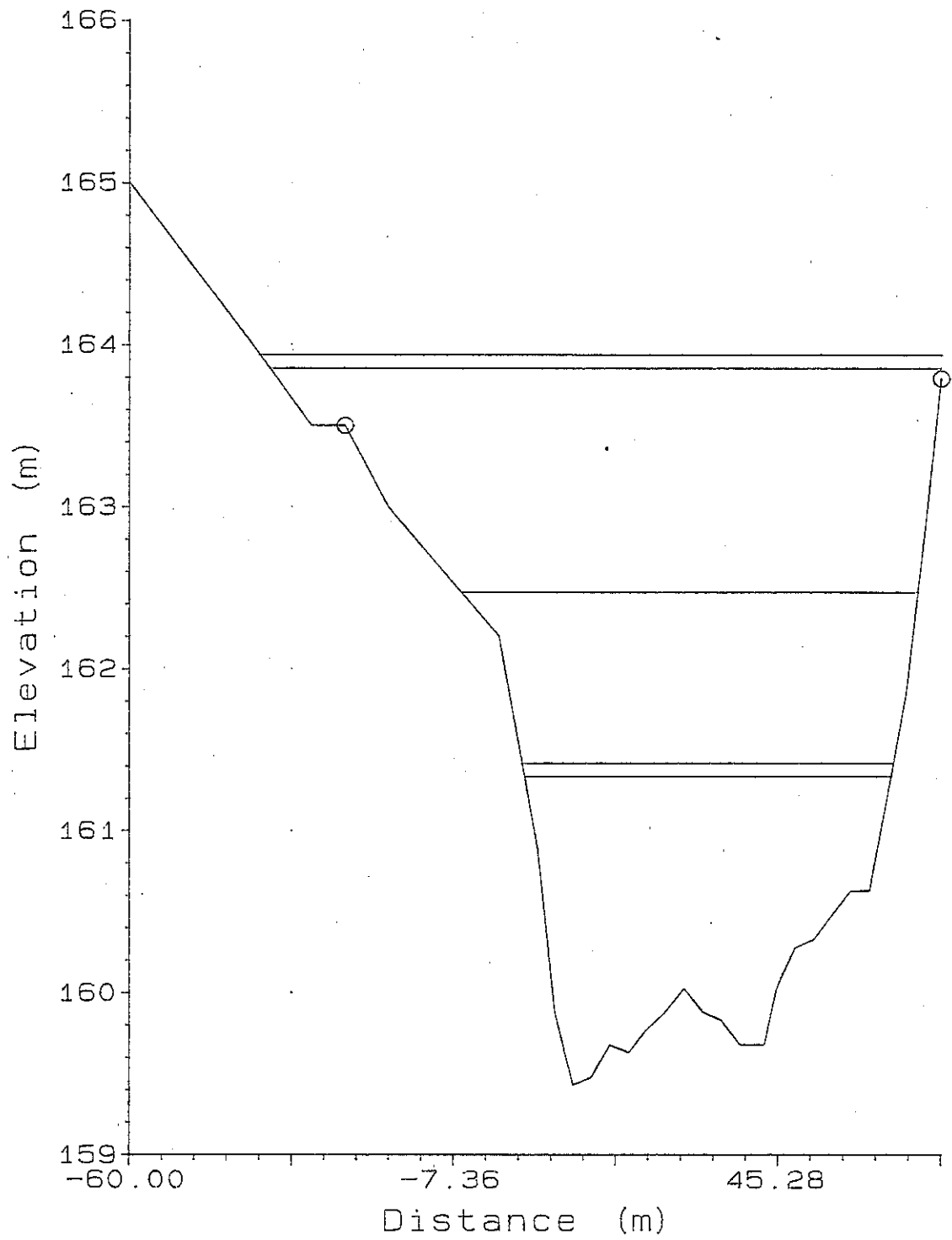
RIVIERE MONTMORENCY
Cross-section 7.000



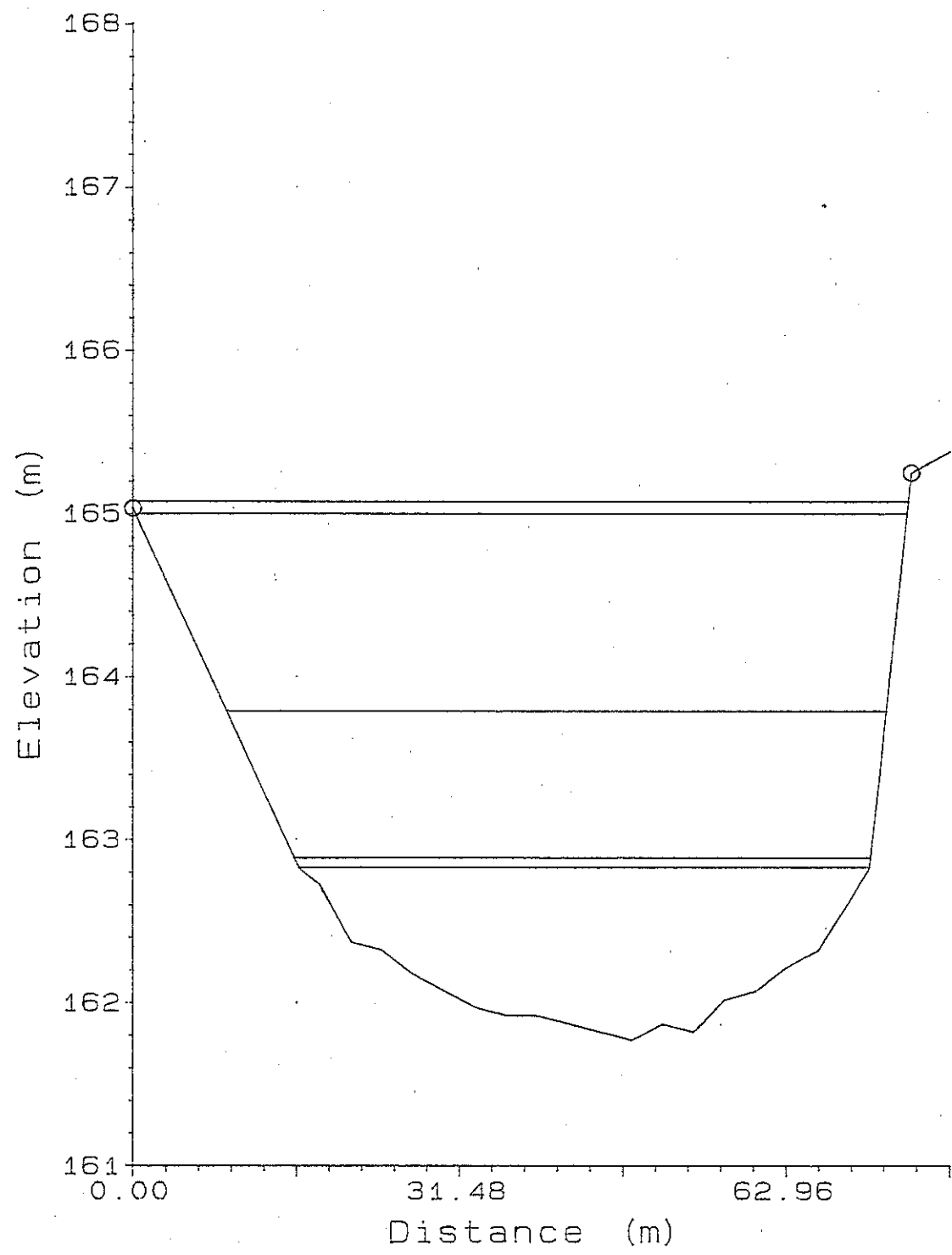
RIVIERE MONTMORENCY
Cross-section 6.000



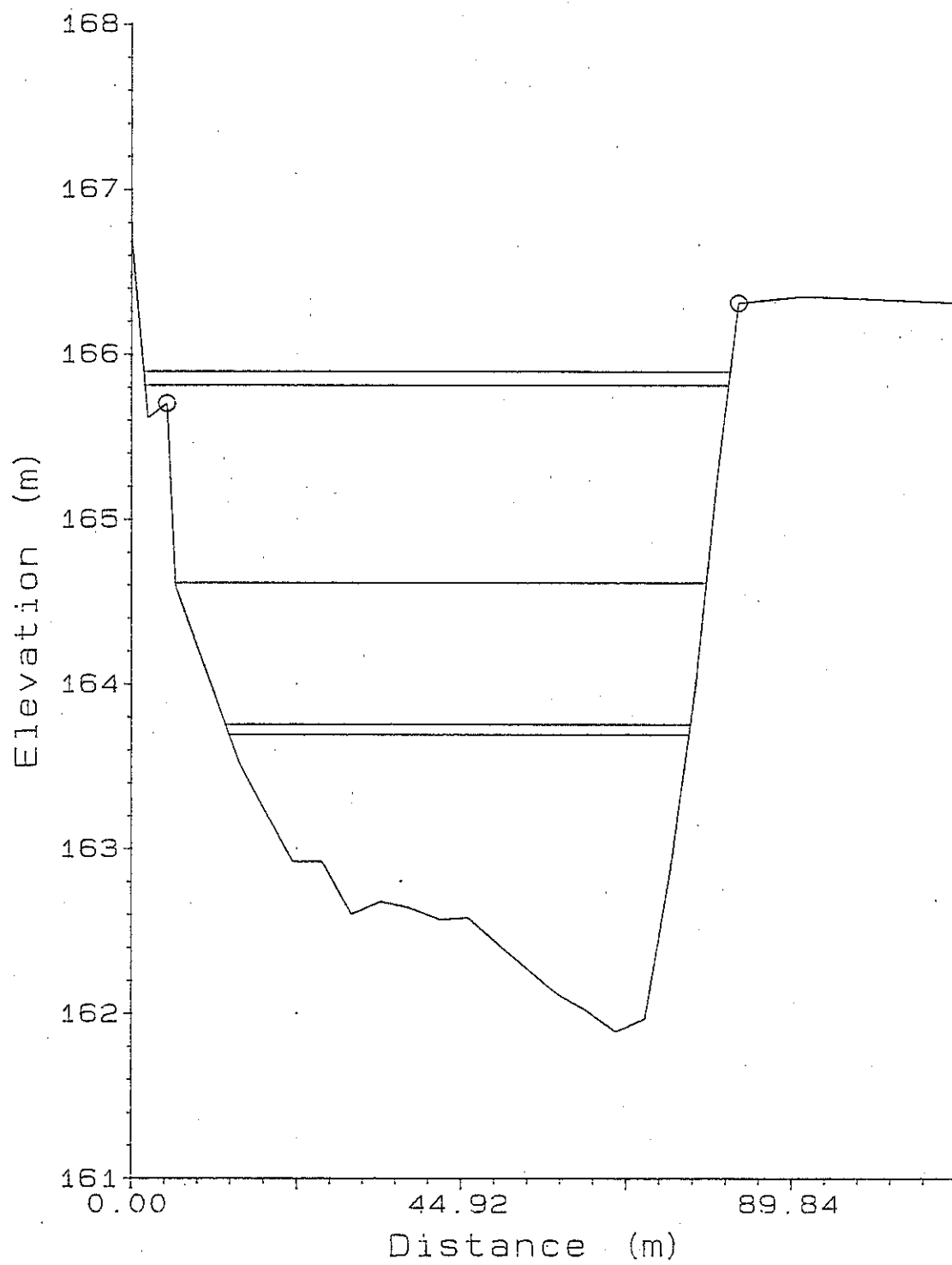
RIVIERE MONTMORENCY
Cross-section 5.000



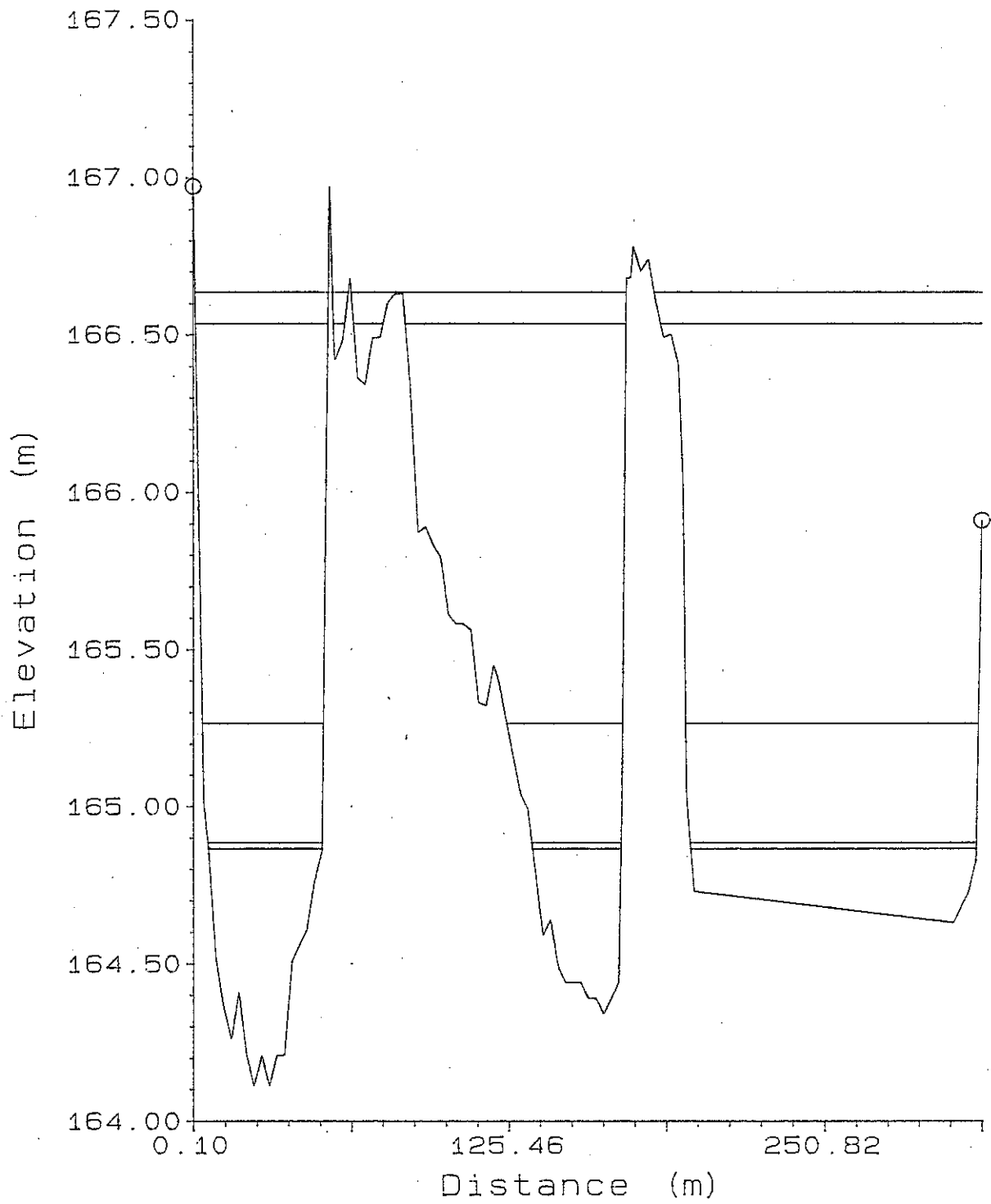
RIVIERE MONTMORENCY
Cross-section 4.000



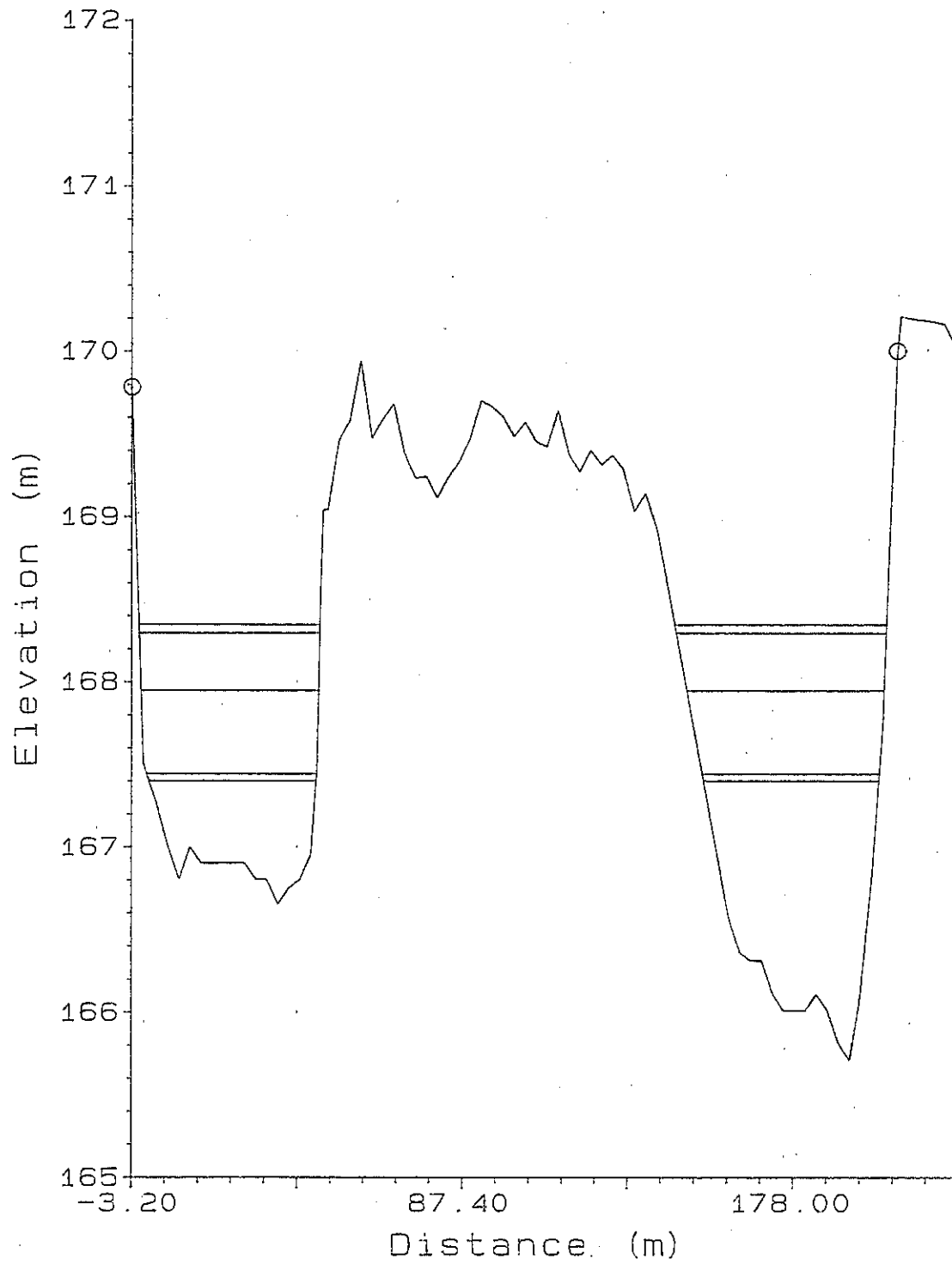
RIVIERE MONTMORENCY
Cross-section 3.400



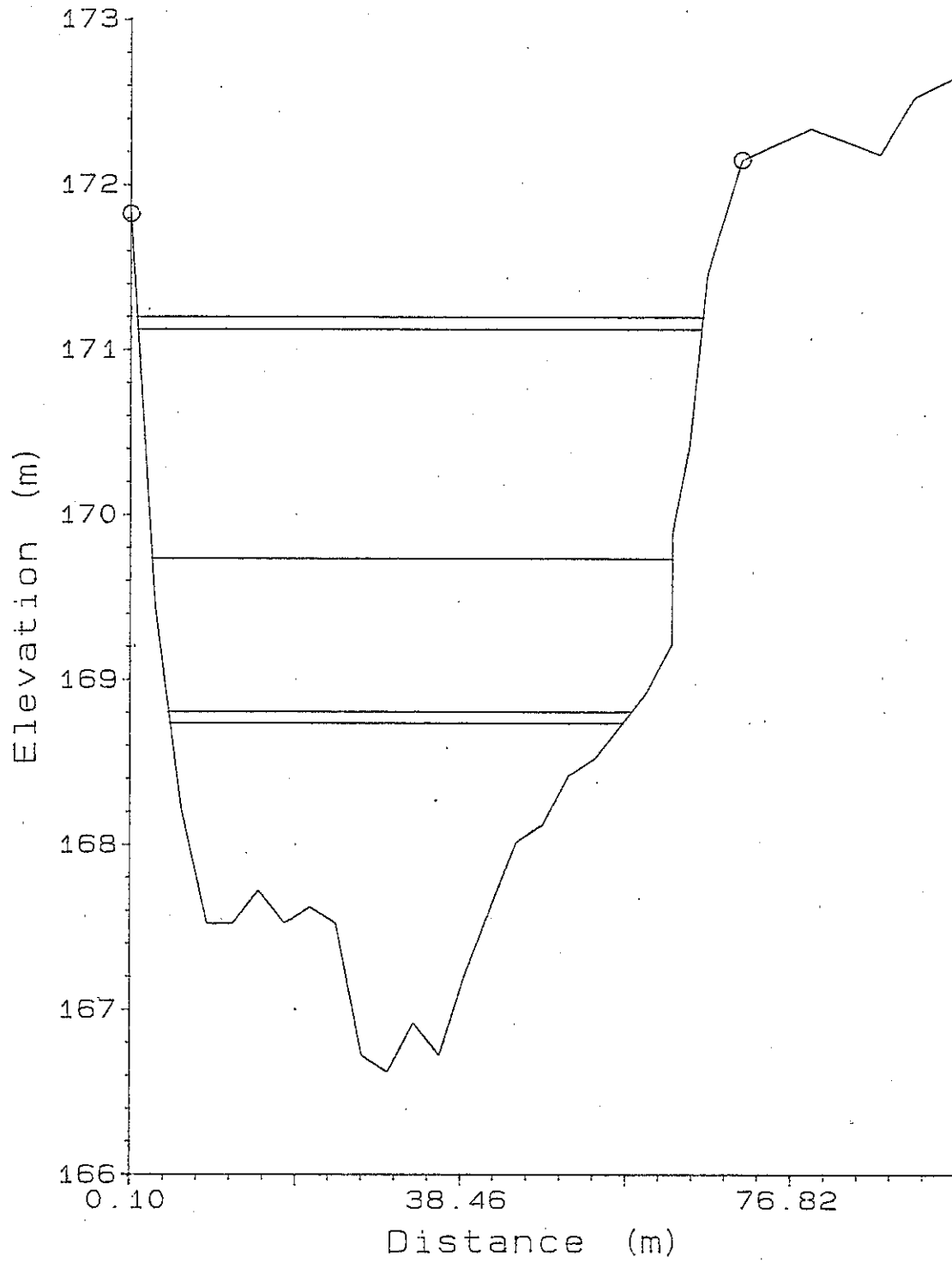
RIVIERE MONTMORENCY
Cross-section 3.000



RIVIERE MONTMORENCY
Cross-section 2.000



RIVIERE MONTMORENCY
Cross-section 1.000



Annexe C Plan de gestion des eaux





**RAPPORT DE L'ÉVALUATION DE LA
SÉCURITÉ DU BARRAGE X0001518 DU
LAC TOURBILLON
PLAN DE GESTION DES EAUX**

12 mars 2025

Préparé pour
Municipalité du Lac-Beauport

Préparé par
Stantec Experts-conseils ltée

Numéro de projet :
158100609

Registre d'approbation

Plan de gestion des eaux

Révision	Description	Auteur)		Vérification qualité		Revue indépendante	
A	Preliminaire	MBR/P H/CK	07/03/2025	AT	10/03/2025	SB	2025/03/12



Registre d'approbation

Plan de gestion des eaux

Remarques

Le présent document, intitulé Plan de Gestion des Eaux Retenues du barrage du Lac Tourbillon X0001518, a été préparé par Stantec Experts-conseils ltée (« Stantec ») pour le compte de la municipalité du Lac-Beauport (le « Client »). Toute utilisation de ce document par une tierce partie est strictement défendue. Le contenu de ce document illustre le jugement professionnel de Stantec à la lumière de la portée, de l'échéancier et d'autres facteurs limitatifs énoncés dans le document ainsi que dans le contrat entre Stantec et le Client. Les opinions exprimées dans ce document sont fondées sur les conditions et les renseignements qui existaient au moment de sa préparation et ne sauraient tenir compte des changements subséquents. Dans la préparation de ce document, Stantec n'a pas vérifié les renseignements fournis par d'autres. Toute utilisation de ce document par un tiers engage la responsabilité de ce dernier. Ce tiers reconnaît que Stantec ne pourra être tenue responsable des coûts ou des dommages, peu importe leur nature, le cas échéant, engagés ou subis par ce tiers ou par tout autre tiers en raison des décisions ou des mesures prises en fonction de ce document.



Registre d'approbation

Plan de gestion des eaux

Signatures

Préparé par Maxime Bouchard-Rochette, CPI.,
Hydrotechnique et sécurité de
Barrage, N OIQ 6056606 (Sous la
supervision de Carole Kabore)

Carole Kabore, Ing., Msc
Hydrotechnique et sécurité de
Barrage, N OIQ 5067443

Révisé par Ammar Taha, ing., Ph.D.
Hydrotechnique et sécurité de
Barrages, N OIQ 132910



Table des matières

SOMMAIRE DU PLAN DE GESTION DES EAUX RETENUES.....	II
ABRÉVIATIONS.....	III
1 INTRODUCTION	1.1
1.1 INFORMATIONS GÉNÉRALES	1.1
1.2 DESCRIPTION DU SITE ET EMPLACEMENT	1.3
1.3 DESCRIPTION SOMMAIRE DE L'OUVRAGE.....	1.1
2 HYDROLOGIE.....	2.1
2.1 BASSIN VERSANT	2.1
2.2 DÉBITS D'APPORTS AU BARRAGE	2.2
3 CONTRAINTES ET NIVEAUX D'EXPLOITATION	3.2
4 COTE DE DÉBORDEMENT	4.2
5 COURBE D'EMMAGASINEMENT	5.3
6 COURBE D'ÉVACUATION	6.1
7 MODE DE GESTION DE LA CRUE.....	7.1
8 SEUILS D'INONDATION.....	8.2
9 STRATÉGIE DE COMMUNICATION.....	9.2
10 RÉFÉRENCES	10-1

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1 Informations administratives du barrage du lac Tourbillon	1.2
Tableau 9-1 :Liste de distribution	9.4

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Vue de l'amont du barrage du lac Tourbillon (X0001518)	1.2
Figure 2 : Localisation du barrage X0001518.....	1.3
Figure 3 : Bassin versant du barrage X0001518.....	2.1
Figure 4 : Fermeture du réservoir au niveau de l'eau à la crue de sécurité centennale – 297,57 m.....	4.3
Figure 5 : Courbe d'emmagasinement du lac du barrage X0001518.....	5.4
Figure 6 : Courbe d'évacuation du barrage X0001518.....	6.1
Figure 7 : Centre d'opération d'urgence et de décision.....	9.3



Sommaire du plan de gestion des eaux retenues

Le niveau des conséquences du barrage X0001518 a été établi à Minimal. Selon l'article 30 du RSB (Règlement sur la Sécurité des Barrages), le plan de gestion des eaux retenues (PGER) pour un barrage dont le niveau des conséquences est Minimal ou faible n'est pas requis. Dans le cadre du présent mandat, un plan de gestion des eaux a tout de même été établi à la demande de la municipalité.

Contraintes d'exploitation : Le niveau normal d'exploitation en amont du barrage est à l'élévation 297,39 m. Cette élévation a été déterminée avec le relevé effectué par Stantec en septembre 2024, l'enquête de terrain et les données transmises par la municipalité du Lac-Beauport.

Débit et niveau correspondant à la crue de sécurité : La crue de sécurité est la crue centennale. Pour un débit de 4,13 m³/s entrant au lac (incluant les changements climatiques), le débit évacué est 2,35 m³/s et le niveau d'eau en amont du barrage est 297,57 m. À noter que ces valeurs considèrent un retrait de toutes les poutrelles lors du passage de la crue de sécurité.

Le niveau à partir duquel le barrage se déverse en son point le plus bas : Le point bas en crête est à l'élévation 298,01 m.

Seuils d'inondation amont et aval : Selon l'enquête de terrain, quelques résidences sont à risque d'inondation lorsque le niveau du lac atteint l'élévation géodésique 297,54m (correspondant à l'indication 80 sur l'échelle limnimétrique, installée dans le lac). Le seuil d'inondation à l'amont du barrage a été considéré à l'élévation 297,54m. La rivière Lamothe, qui débute à l'exutoire du barrage et le ruisseau Euclide, dans lequel se draine le ruisseau Lamothe, sont encaissés jusqu'à la rivière Montmorency. Nous avons donc considéré qu'il n'y avait pas de seuil d'inondation en aval du barrage.

Description des mesures de gestion des eaux retenues : La seule méthode de contrôle de la capacité d'évacuation du barrage est le contrôle des poutrelles lors d'une crue. Le barrage est capable d'évacuer la crue de sécurité (avec toutes les poutrelles retirées) et le niveau du lac est à l'élévation 297,57 m pour cette crue. À noter que si le niveau du lac dépasse l'élévation 297,54m il y a un risque d'inondations de quelques résidences en amont et de contamination du lac par des fosses septiques. Ce niveau de 297,57 m, bien que dépassant le seuil d'inondation de 3 cm, reste raisonnable.

Stratégie de la communication des risques aux autorités responsables : Il est recommandé de commencer la procédure d'alerte une fois qu'il est devenu évident que le barrage a rompu. Cela permettra d'informer les autorités que certains chemins privés d'accès aux ressources seront inondés ou emportés et ne seront donc plus accessibles. Des mesures appropriées pourront être prises.



Abréviations

DSB	Direction de la Sécurité des Barrages
ÉÉS	Étude d'Évaluation de Sécurité de Barrage
LSB	Loi sur la Sécurité des Barrages
MELCCFP	Ministère de l'Environnement, et de la Lutte contre les Changements Climatiques de la Faune et des Parcs
PGER	Plan de Gestion des Eaux Retenues
RSB	Règlement sur la Sécurité des Barrages



1 Introduction

La municipalité de Lac-Beauport (le client) est propriétaire du barrage du lac Tourbillon (X0001518). Le client a mandaté Stantec pour réaliser la première ÉÉS pour ce barrage, afin de se conformer à la loi sur la sécurité des barrages (LSB). Les services professionnels requis consistent à procéder à la réalisation de l'étude de sécurité ainsi que la stabilité géotechnique du barrage et le plan de gestion des eaux retenue (PGER).

Le barrage du lac Tourbillon (X0001518), situé sur le ruisseau Lamothe dans la municipalité de Lac-Beauport, a été construit en 1990 selon la fiche technique publiée par le MELCCFP. C'est un écran de béton à l'amont d'une digue en terre de 7 m de longueur et 3,54 m de hauteur, muni d'un ouvrage d'évacuation. L'organe d'évacuation est un seuil à poutrelles de 2,26 m de largeur qui se déverse dans une chambre à parois de bois et à fond de béton. L'ouvrage est fondé sur du Till. Le lac en amont du barrage a une vocation récréative et de villégiature. Le bassin versant du barrage X0001518 possède une superficie de 3,37 km².

Afin d'accroître la sécurité des barrages et de mieux protéger les personnes et les biens contre les risques associés aux barrages, le gouvernement du Québec a mis en place une *Loi sur la sécurité des barrages* (LSB) et un *Règlement sur la Sécurité des Barrages* (RSB). La LSB et le RSB ont fait l'objet d'une mise à jour le 30 novembre 2024. Le barrage X0001518 est assujéti à cette loi. Bien que le PGER ne soit pas requis du fait du niveau des conséquences du barrage, il a été établi, car faisant partie du mandan.

Le PGER décrit l'ensemble des mesures à prendre par le propriétaire afin de faire une gestion sécuritaire des eaux retenues, particulièrement lorsque la sécurité des personnes ou des biens localisés en amont ou en aval du barrage est compromise.

1.1 Informations générales

Le barrage du lac Tourbillon (X0001518) est classifié « forte contenance ». Il a été établi que le classement « E » avec un niveau de conséquence en cas de rupture « Minimal » est applicable. L'ouvrage, de type écran de béton à l'amont d'une digue en terre et muni d'un ouvrage d'évacuation, repose directement sur le roc et a été construit en 1990.



Plan de gestion des eaux

Tableau 1-1 Informations administratives du barrage du lac Tourbillon

Numéro répertoire des barrages :	X0001518
Nom	-
Latitude :	46° 57' 42" N
Longitude :	71° 14' 27" O
Municipalité :	Lac-Beauport
MRC :	La Jacques-Cartier
Nom et adresse du propriétaire :	Municipalité de Lac-Beauport, 65, chemin du Tour-du-des-Lac, Lac-Beauport (Québec) G3B 0A1
Nom et fonction de la personne responsable de la sécurité de barrage	Directeur du service des travaux publics et infrastructures



Figure 1 : Vue de l'amont du barrage du lac Tourbillon (X0001518)



1.2 Description du site et emplacement

Le barrage X0001518 se situe à l'exutoire du Lac Tourbillon et se déverse dans le ruisseau Lamothe, à 17 km au nord de la ville de Québec. La localisation du barrage est présentée à la figure 2.



Figure 2 : Localisation du barrage X0001518

1.3 Description sommaire de l'ouvrage

Le barrage X0001518 est de type écran de béton à l'amont d'une digue en terre et le déversoir est un seuil à poutrelles de 2,26 m de largeur qui se déverse dans une chambre à parois de bois et à fond de béton. Le déversoir a une élévation de fond à 296,76 m sans poutrelles et 297,29 m lorsque toutes les poutrelles sont en place. Le point bas en crête est à l'élévation de 298,01 m.

Le système de référence géodésique utilisé pour ce rapport est NAD83 CSRS MTM zone 7. Le système de référence altimétrique du lidar est CGVD28 (modèle hybride HTv2.0 1997).

2 Hydrologie

2.1 Bassin versant

Un modèle numérique de terrain (Lidar) a été téléchargé sur le site Forêts ouvertes (21L14NE et 21L14NO). Les données bathymétriques ont été fournies directement du client, celle-ci date de 2023. Le bassin versant du barrage, délimité par HEC-HMS et ajusté à la main pour corriger les potentielles imprécisions du logiciel, a une superficie de 3,37 km² et est présenté à la figure 3.

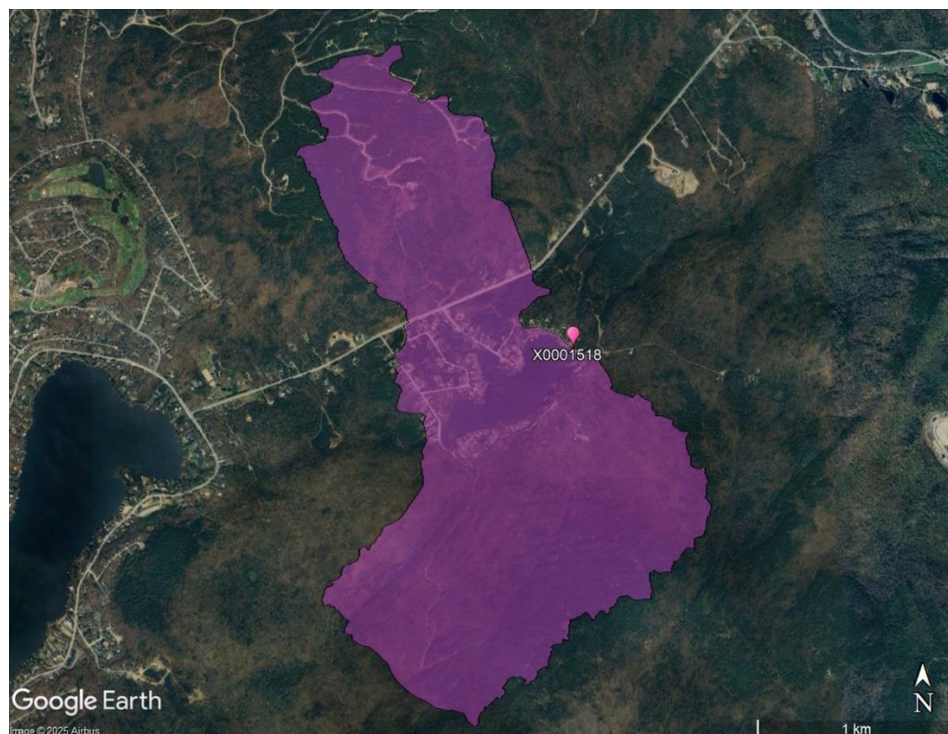


Figure 3 : Bassin versant du barrage X0001518

2.2 Débits d'apports au barrage

Le débit de pointe centennal entrant dans le lac est $4,13 \text{ m}^3/\text{s}$ et le débit sortant du barrage est $2,35 \text{ m}^3/\text{s}$. Pour l'évaluation de la sécurité de barrage, la crue centennale est la crue de sécurité du barrage X0001518 pour lequel le niveau des conséquences est établi à « **minimal** ».

3 Contraintes et niveaux d'exploitation

Pour l'ÉES de Stantec 2024, le niveau normal d'opération retenu est 297,39 m. Ce niveau a été communiqué à Stantec par les membres de l'association du Lac Tourbillon et le responsable de la gestion du barrage de la municipalité de Lac-Beauport.

4 Cote de débordement

La cote de débordement du barrage est le point le plus bas de sa crête. Celui-ci a été déterminé selon le relevé d'arpentage fait par Stantec en 2024. Ainsi, le niveau de débordement de la crête du barrage X0001518 trouve à l'élévation 298,01 m.

La fermeture du réservoir a été vérifiée à l'aide des données lidars disponibles sur le site de Forêt Ouverte du gouvernement du Québec (feuilles 21L14NE et 21L14NO). Le niveau d'eau géodésique correspondant à la crue de sécurité centennale est 297,57 m (affiché en mauve sur la figure 4) indique qu'il n'y a pas de débordement autour du réservoir, il y a seulement de l'eau s'écoulant par le déversoir du barrage.



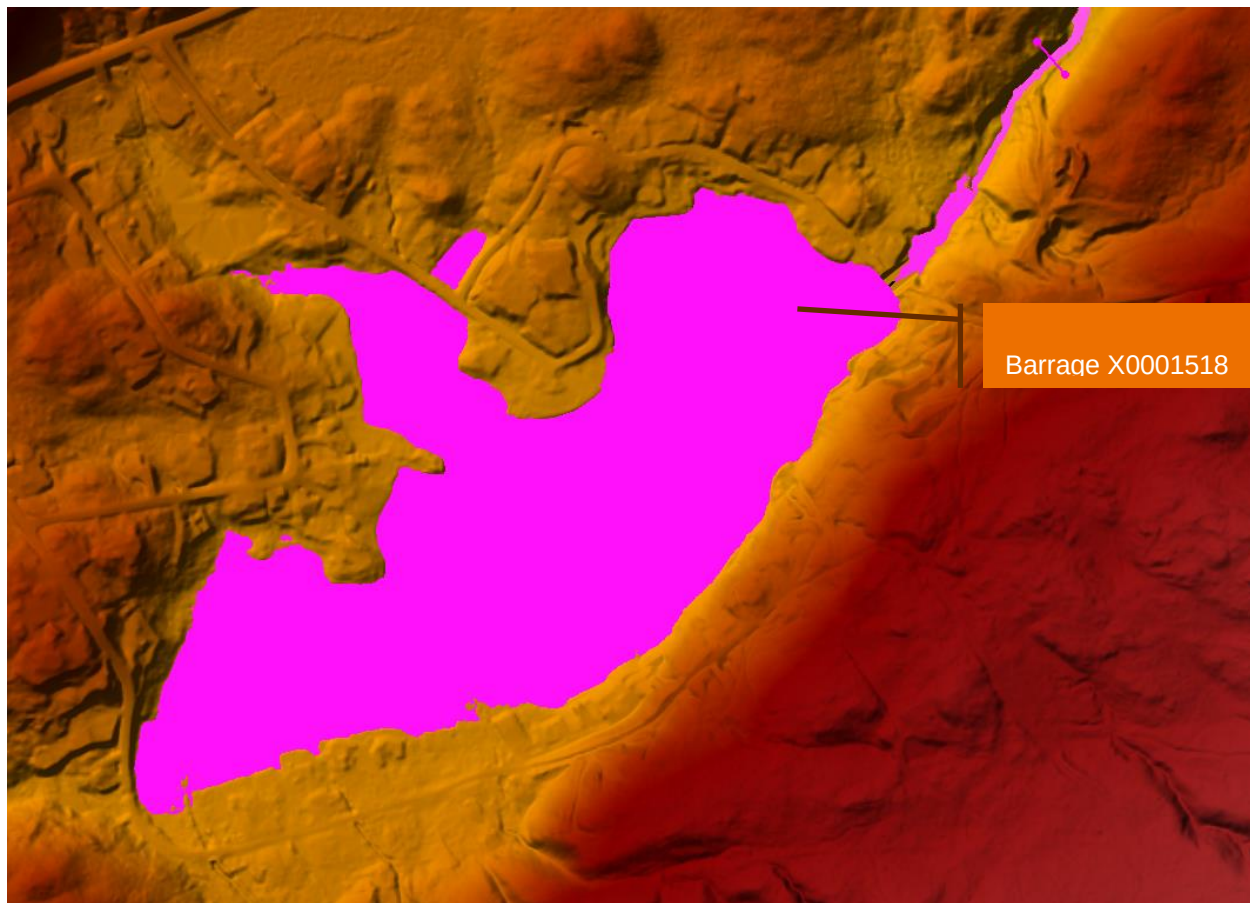


Figure 4 : Fermeture du réservoir au niveau de l'eau à la crue de sécurité centennale – 297,57 m

5 Courbe d'emmagasinement

La courbe d'emmagasinement du Lac Tourbillon a été définie en utilisant les données bathymétriques. La Figure 5 montre la courbe d'emmagasinement du Lac.

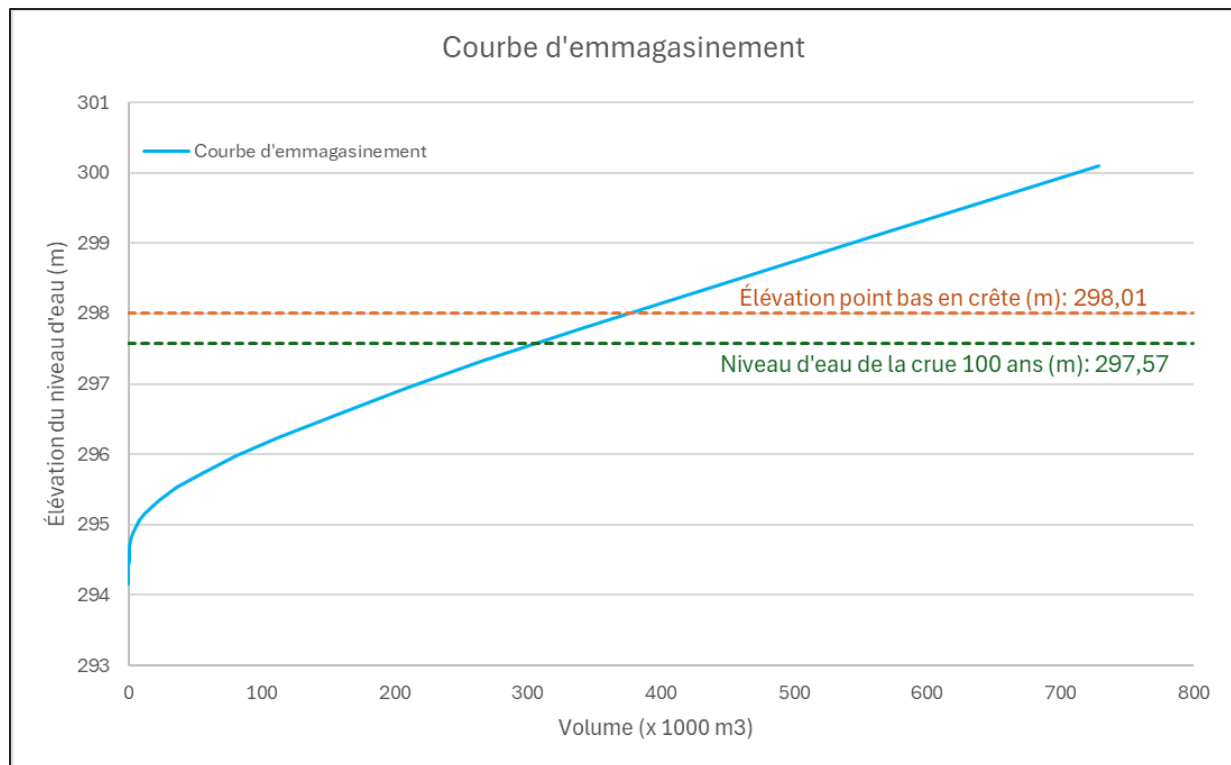


Figure 5 : Courbe d'emmagasinement du lac du barrage X0001518



6 Courbe d'évacuation

La courbe d'évacuation a été établie en considérant un C_d de 1,77 pour représenter un seuil épais efficace selon HEC-RAS et un C_d de 1,66 (défaut de HEC-RAS) pour la crête du barrage dans les scénarios de débordement pour représenter un déversoir à seuil épais.

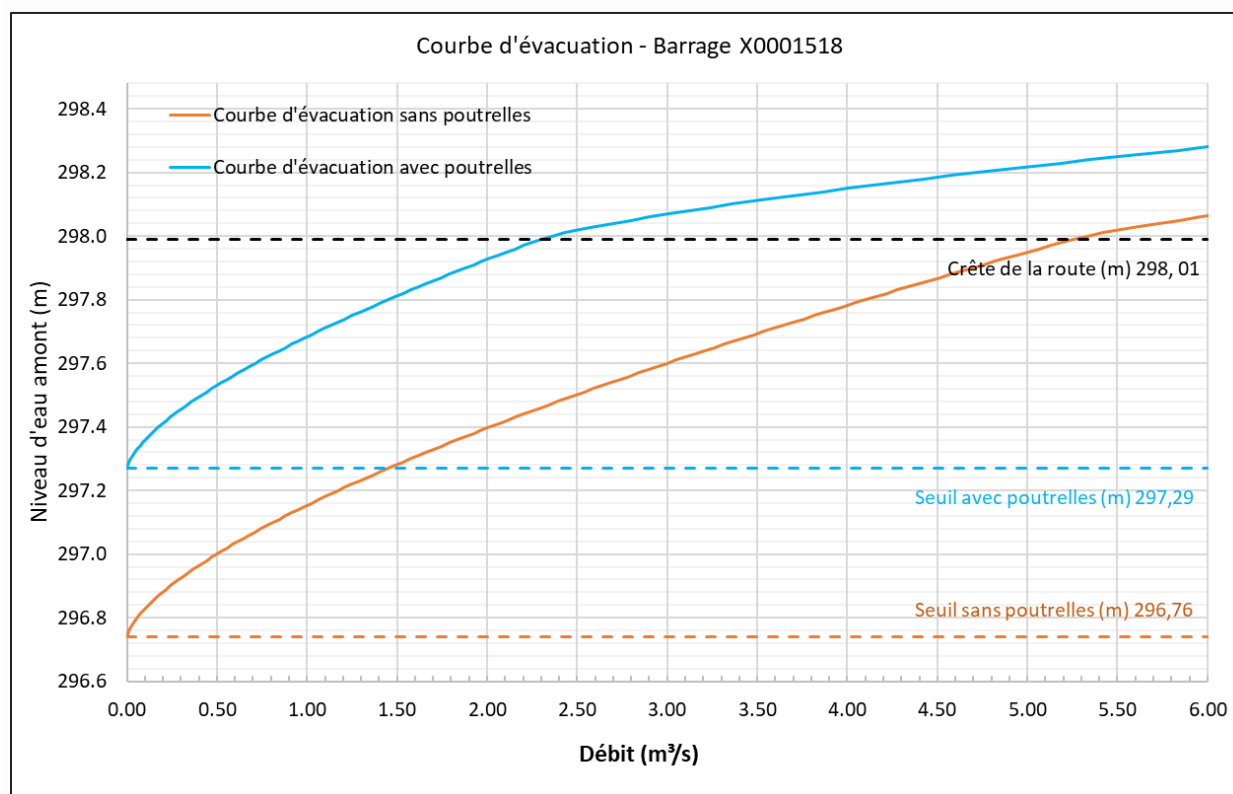


Figure 6 : Courbe d'évacuation du barrage X0001518

7 Mode de gestion de la crue

Les opérations nécessaires pour ce barrage consistent à retirer des poutrelles lors des crues. Les poutrelles doivent être retirées de façon à garder un niveau dans le lac qui se situe aux alentours de 297,36 m, soit le niveau normal d'exploitation.

Les poutrelles devraient être retirées au fur et à mesure que le niveau d'eau monte, et non toutes les poutrelles simultanément en prévision d'une pluie. Lors du passage de la crue de sécurité 100 ans, il est important de retirer toutes les poutrelles.

Il est important de retirer les poutrelles pour bien gérer le niveau du lac, mais surtout pour éviter que celui-ci ne déborde. En effet, un barrage de type digue de terre est sujet à subir de l'érosion lors d'un débordement, ce qui pourrait affaiblir la structure et éventuellement causer sa rupture.



8 Seuils d'inondation

Pour qu'un barrage soit classifié comme ayant un niveau de conséquences en cas de rupture « minimal » ou « faible », l'article 18 du RSB indique qu'il faut prévoir une caractérisation du territoire qui sera affectée par la rupture d'un barrage. Lors de la rupture en condition normale, seulement 3 chemins privés d'accès aux ressources seraient inondés. Lors de la rupture en condition de crue, seulement 1 chemin privé d'accès aux ressources serait inondé par l'incrément lié à la rupture (en crue par rapport à en condition normale). Le niveau de conséquences du barrage X0001518 est donc « Minimal ».

9 Stratégie de communication

Si la rupture du barrage se produit, que ce soit à cause d'une inondation ou pour une autre raison quelconque, les seules structures qui devront être traitées sont les chemins privés d'accès aux ressources mentionnés dans la section précédente.

Advenant qu'une rupture évidente soit observée, il est recommandé de lancer la procédure d'alerte. Cela permettra d'informer les autorités et les résidents que certains chemins privés seront inondés ou emportés et ne seront donc plus accessibles. Des mesures appropriées devront être prises advenant le cas.



Plan de gestion des eaux

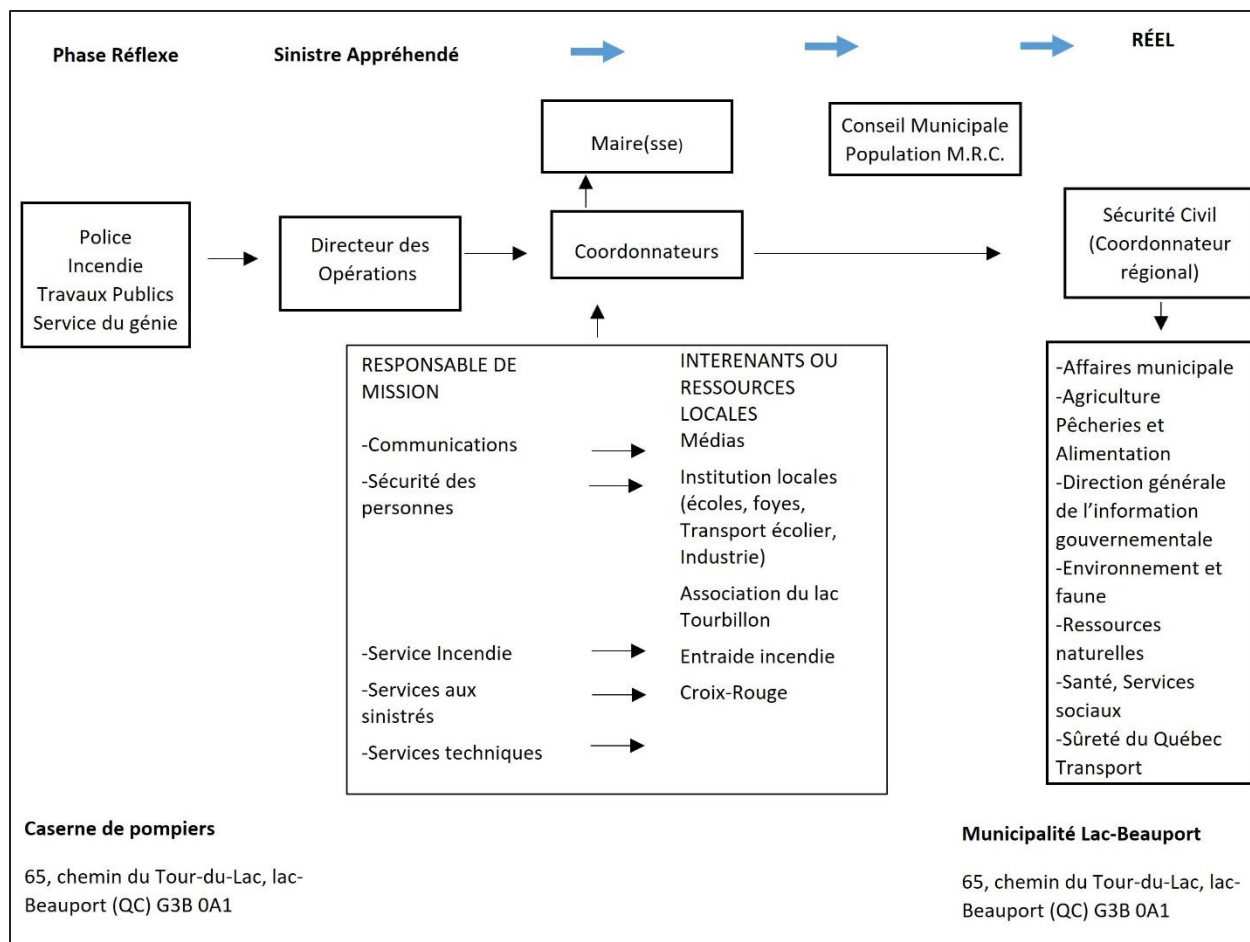


Figure 7 : Centre d'opération d'urgence et de décision



Tableau 9-1 :Liste de distribution

Municipalité Lac-Beauport				
Service	Nom Responsable	Coordonnées		
		Bureau	24 heures	Cellulaire
Directeur des opérations	Maxim Baillargeon	342	418-808-4881	418-808-4881
Maire	Vacant			
Mesures d'urgence	Richard Labrecque	227	418-933-2551	418-933-2551
Gestion du barrage du lac Tourbillon (X0001518)	Eric Richard	300	418-576-8852	418-576-8852
Service incendie	Eric Richard	300	418-576-8852	418-576-8852
Sécurité civil	Richard Labrecque	227	418-933-2551	418-933-2551
Sécurité civil	Patrick Turmel	236	418-932-0339	418-932-0339
Service du génie	François-Olivier Beaulieu	251	418-808-9145	418-808-9145
Travaux publics	Gustavo Carréno	234	418-808-5050	418-808-5050



10 Références

- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Loi sur la sécurité des barrages (S-3.1.01)*. En ligne : <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/showdoc/cs/S-3.1.01>.
- GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. *Règlement sur la sécurité des barrages (S-3.1.01, r.1)*. En ligne : <http://legisquebec.gouv.qc.ca/fr/ShowDoc/cr/S-3.1.01,%20r.%201>
- Municipalité de Lac-Beauport. Consulté le 6 mars 2025. En ligne : Municipalité du Lac-Beauport - Québec
- MELCCFP. 2022. *Répertoire des barrages, fiche technique du Barrage* du lac Tourbillon X0001518.
- Stantec. 2025. Rapport de l'évaluation de la sécurité du barrage X0001518, référence 158100609-200.400-HY-R-A.



Annexe D Rapport d'inspection du barrage X0001518 – Stantec 2024



À : Ammar Taha, ing., Ph.D.

Stantec Expert-conseils Itée.
100, Boul. Alexis-Nihon, bureau 110,
Saint-Laurent, QC H4M 2N6

De : Pouyan Pirnia, ing., Ph.D.
Raymond Haché, ing., M.Sc..

Stantec Expert-conseils Itée.
100, Boul. Alexis-Nihon, bureau 110,
Saint-Laurent, QC H4M 2N6

Projet/Dossier : 158100609

Date : 6 mars 2025

Réf. : Étude géotechnique et analyse de stabilité du barrage du Lac Tourbillon (No. 24-719) à Lac-Beauport, Québec

1 Introduction

1.1 Mandat

Stantec Experts-conseils Itée (Stantec) a été mandatée par la municipalité de Lac-Beauport (ci-dessous appelée « la municipalité ») pour réaliser une étude géotechnique et une analyse de stabilité géotechnique du barrage du Lac Tourbillon à Lac-Beauport au Québec (ci-après désignée comme le « site »).

Cette note technique contient les résultats factuels et interprétatifs de l'étude géotechnique, ainsi que les résultats d'analyses.

Les limites associées à cette note technique et à son contenu sont indiquées dans l'énoncé des conditions générales figurant à l'annexe A.

1.2 Objectifs et portée de l'étude

L'objectif de l'étude géotechnique consiste à déterminer la nature et certaines propriétés des sols, à mesurer le niveau de la nappe phréatique et déterminer certaines propriétés mécaniques et physiques des matériaux en place en vue d'effectuer des analyses des écoulements d'eau ainsi que de la stabilité de deux coupes transversales du barrage.

Cette note technique présente une description du site et du projet, la méthodologie utilisée lors des travaux de chantier et en laboratoire, les résultats obtenus ainsi que nos conclusions et recommandations.

Réf. : Étude géotechnique et analyse de stabilité du barrage du Lac Tourbillon (No. 24-719) à Lac-Beauport, Québec

1.3 Description du site et du projet

La municipalité de Lac-Beauport désire procéder à une étude d'évaluation de la stabilité du barrage du Lac Tourbillon (X0001518) qui est un barrage à forte contenance.

Le barrage du Lac Tourbillon, construit en 1990, est situé au coin nord-ouest du Lac Tourbillon, au cœur de la municipalité de Lac-Beauport au Québec. Selon les informations disponibles, il s'agit d'un ouvrage en terre comprenant une digue et un ouvrage d'évacuation (déversoir). La retenue d'eau formée par le barrage couvre une superficie de 16,1 hectares, avec un volume estimé entre 260 000 m³ au niveau du seuil des poutrelles et 390 600 m³ au niveau de la crête. Le barrage mesure environ 3 m de hauteur et s'étend sur environ 7 m de longueur (selon le Centre d'expertise hydrique du Québec). Aucune étude géotechnique n'est disponible pour le barrage.

Selon les informations disponibles, les dépôts meubles du secteur à l'étude sont composés d'un dépôt granulaire et le roc est peu profond.



Figure 1 : Emplacement du site et des forages réalisés par Stantec 2024 (image aérienne de Google Earth datée d'août 2024)

Dans le cadre du mandat actuel, le projet vise à étudier la stabilité globale du barrage. Les travaux suivants ont été réalisés :

- Une inspection détaillée du barrage et de ses composants;

Réf. : Étude géotechnique et analyse de stabilité du barrage du Lac Tourbillon (No. 24-719) à Lac-Beauport, Québec

- Deux (2) forages géotechniques pour caractériser les matériaux constituant le barrage et mesurer le niveau de la nappe phréatique;
- Des analyses des écoulements d'eau et de stabilité géotechnique des pentes.

L'inspection, réalisée le 4 juin 2024 par le personnel de Stantec, a permis de faire plusieurs constats. Globalement, le barrage est en bon état. Toutefois, nous avons remarqué les éléments suivants :

- **Écoulement du lac :**

Le débit provenant du lac est dirigé vers le barrage et son déversoir intégré (figure 2).

- **Présence de végétation sur les talus :**

Des arbres et une végétation dense ont été observés sur les talus amont et aval (figure 2 à 6).

- **Conditions des sols en aval :**

Les sols à la base du talus aval apparaissent mouillés. Cependant, aucune exfiltration d'eau notable n'a été observée en aval, à proximité immédiate du déversoir (figure 3).

- **État des pentes du talus aval :**

Les pentes du talus aval sont abruptes et présentent des signes d'érosion superficielle. Toutefois, aucune trace de glissement important n'a été notée (figure 4).

- **Protection contre l'érosion d'eau en aval du déversoir :**

Les deux rives du cours d'eau en aval du déversoir, depuis le haut du talus jusqu'au pied, sont protégées par de gros blocs de pierre et un enrochement, destinés à prévenir l'érosion d'eau (figure 5).

- **Revêtement du talus aval :**

Le talus de la rive droite est partiellement protégé par gros blocs de pierre et, par endroits, d'un enrochement présentant de gros vides et des pierres mal calibrées, tandis que cette couverture est absente sur la rive gauche (figure 5).

- **Érosion superficielle sur la rive gauche :**

Une légère érosion superficielle a été observée sur la rive gauche en aval du barrage, s'étendant depuis la base du poteau de glissière jusqu'au pied du talus (figure 4).

- **Talus en amont du barrage :**

Le talus en amont est protégé par des blocs de pierre, disposés de manière presque verticale. Aucun signe visuel d'instabilité ou de déplacement des blocs n'a été identifié (figure 2).

- **État du chemin d'accès :**

Le pavage et les accotements du chemin traversant le barrage, de part et d'autre du pont, ne montrent aucun signe d'érosion (figure 2).

Réf. : Étude géotechnique et analyse de stabilité du barrage du Lac Tourbillon (No. 24-719) à Lac-Beauport, Québec



Figure 2 : Le chemin du Barrage, le lac à l'amont et l'accotement aval du barrage. Présence d'arbres sur les talus amont et aval. Vue de l'écoulement du lac vers le barrage et son déversoir intégré.



Figure 3 : Sol mouillé observé à la base du talus aval sans exfiltration d'eau notable à proximité du déversoir.

Réf. : Étude géotechnique et analyse de stabilité du barrage du Lac Tourbillon (No. 24-719) à Lac-Beauport, Québec



Figure 4 : État des pentes du talus aval à la rive droite, signes d'érosion superficielle sans glissement majeur.

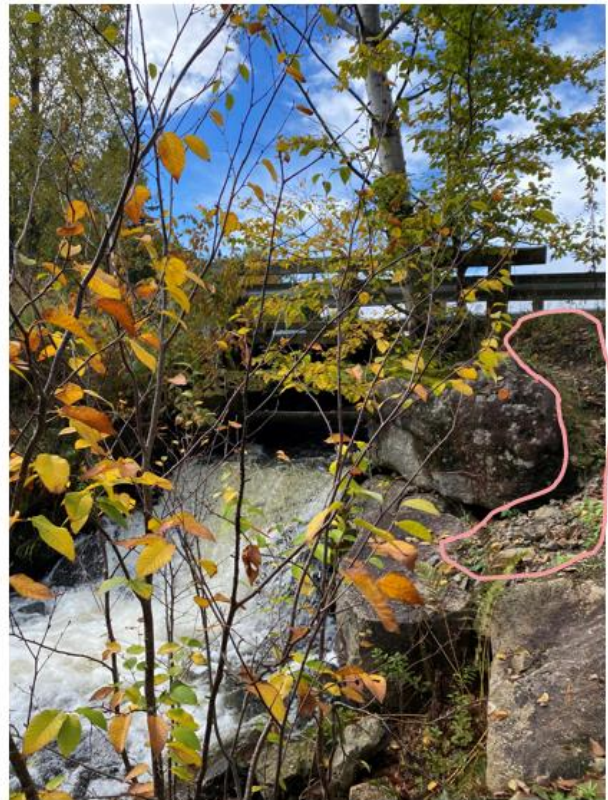


Figure 5 : Débit provenant du déversoir se dirigeant vers le cours d'eau. Présence de gros blocs et enrochement protégeant contre l'érosion sur les deux rives en aval du déversoir, du haut jusqu'au pied du talus

Réf. : Étude géotechnique et analyse de stabilité du barrage du Lac Tourbillon (No. 24-719) à Lac-Beauport, Québec



Figure 6 : Revêtement du talus en aval avec empierrements. Absence de couverture similaire sur la rive gauche.

2 Sommaire et description des travaux

2.1 Sommaire des travaux de chantier

Les travaux d'investigation sur le site ont été réalisés le 2 octobre 2024 sous la supervision constante du personnel spécialisé de Stantec. Ils ont consisté en la réalisation de deux (2) forages verticaux identifiés F24-01 et F24-02, d'une profondeur de 7,70 m à 8,64 m. Les rapports de forage sont présentés à l'annexe C.

Un échantillonnage géotechnique a été réalisé dans les forages. Des essais en laboratoire sur des échantillons représentatifs ont permis de déterminer certaines propriétés physiques et mécaniques des sols en place.

2.2 Description des travaux de terrain

2.2.1 Santé et sécurité

Avant de débiter les travaux de terrain sur le site, les intervenants ayant participé à ce projet ont pris connaissance des règles de santé et de sécurité au travail appliquées lors de la réalisation du projet. Un formulaire de préchantier identifiant les risques de santé et sécurité a également été signé par les intervenants sur le chantier. Ce formulaire a eu pour but d'identifier les dangers afin de prévenir les accidents de chantier.

Réf. : Étude géotechnique et analyse de stabilité du barrage du Lac Tourbillon (No. 24-719) à Lac-Beauport, Québec

2.2.2 Localisation des services et implantation des forages

Stantec a procédé à la localisation des services publics souterrains par l'entremise du service d'Info-Excavation préalablement aux travaux. La validation de l'absence de services souterrains au droit de chaque forage a été également réalisée le 27 septembre 2024 par la compagnie Radex. Ainsi, l'implantation des forages sur le site a été réalisée aux endroits qui ne présentaient pas de services souterrains détectables, dans le but d'obtenir une couverture adéquate et représentative du site à l'étude.

2.2.3 Réalisation des sondages

Deux (2) forages verticaux, identifiés F24-01 et F24-02 ont été réalisés dans le cadre du présent mandat. Ils ont été réalisés de manière à obtenir des informations représentatives sur les propriétés géotechniques des sols en place. Les forages ont été exécutés à l'aide d'une foreuse sur camion, opérée par la compagnie Succession Forage Boislard. Les forages ont tous été réalisés sous la supervision constante d'un technicien de Stantec.

Durant les forages, un échantillonnage remanié des dépôts meubles a été réalisé à l'aide d'un carottier fendu de calibre « B » de 51 mm de diamètre extérieur. Ce dernier a également servi pour la réalisation d'essais de pénétration standard, tels que définis dans la norme ASTM D-1586. Ces essais permettent la mesure de l'indice « N », lequel est relié à la compacité relative du sol. Les conditions des sols ont été consignées à l'aide des observations effectuées sur les échantillons de sol récupérés lors des forages.

Les sols excédentaires issus des forages ont été replacés dans le trou des forages, immédiatement après qu'ils eurent été complétés. Les sols ont été replacés dans l'ordre inverse de leur excavation de manière à conserver la stratigraphie d'origine le plus fidèlement possible.

2.2.4 Piézomètre

Deux (2) piézomètres (tubes ouverts) ont été installés dans chacun des forages afin de mesurer ultérieurement le niveau de l'eau souterraine.

Des tubages de PVC de 19 mm de diamètre ont été utilisés pour l'installation des piézomètres. Les parties sectionnées des tubages ont été entourées de sable de silice qui a été mis en place jusqu'à 30 cm au-dessus de celles-ci. Un bouchon de bentonite d'environ 600 mm a été par la suite placé au-dessus du sable de silice. Le puits a été finalement remblayé par les sols provenant des forages. Une boîte de service étanche au ras du sol a complété l'installation.

2.2.5 Travaux d'arpentage

La localisation et le nivellement des points de forages sur le terrain, ainsi que l'arpentage du talus à l'emplacement du site à l'étude, ont été effectués par un technicien en arpentage de Stantec à l'aide d'un GPS de type « Trimble R12 » équipé d'un carnet TSC3, d'une précision de $\pm 0,10$ à $0,30$ mm pour les coordonnées X, Y et Z. Toutes les élévations des forages sont géodésiques et les coordonnées sont données dans le système SCOPQ-NAD 83, projection MTM (fuseau 7).

La localisation des forages réalisés sur le site est présentée à la figure de l'annexe B. Les coordonnées et élévations sont quant à elles indiquées sur les rapports de forages présentés à l'annexe C.

Réf. : Étude géotechnique et analyse de stabilité du barrage du Lac Tourbillon (No. 24-719) à Lac-Beauport, Québec

2.3 Travaux en laboratoire

2.3.1 Essais géotechniques

Les échantillons de sols récupérés lors des forages ont fait l'objet d'une description visuelle afin de tracer les profils stratigraphiques présentés dans les rapports de forage. La classification des sols était basée sur les procédures décrites dans les normes ASTM D 2487 et ASTM D 2488.

Pour fins de classification et afin de préciser la nature et certaines propriétés physiques et mécaniques des sols, les essais suivants ont été réalisés en laboratoire sur des échantillons représentatifs.

Tableau 1 : Essais géotechniques

Essais de laboratoire	Normes	Nombre d'essais
Analyse granulométrique par tamisage	BNQ 2501-025	6
Analyse granulométrique par sédimentométrie	BNQ 2501-025	5
Détermination de la teneur en eau naturelle	BNQ 2501-170	8
Limites d'Atterberg	BNQ 2501-092	4

Les résultats des essais en laboratoire sont joints à l'annexe D.

Les échantillons prélevés dans les forages seront conservés pour une durée de six (6) mois à compter de la date d'émission du rapport final. Par la suite, ils seront détruits à moins qu'entretemps un avis écrit, quant à leur destination, nous soit transmis par le client.

3 Résultats de l'investigation géotechnique

3.1 Nature et propriétés des dépôts

Les conditions de sols et matériaux observées dans les forages sont décrites dans les paragraphes qui suivent et sont présentées en détail dans les rapports de forages à l'annexe C ainsi que les résultats des essais au laboratoire à l'annexe D de ce rapport.

Tableau 2 : Synthèse de la stratigraphie des dépôts au droit des forages

Forage	Enrobé bitumineux	Fondation granulaire	Remblai	Dépôt till	Roc
	Profondeur (m) / [Élévation (m)]				
F24-01	0,00 – 0,08 [298,12 – 298,04]	0,08 – 0,25 [298,04 – 297,87]	0,25 – 1,42 [297,87 – 296,70]	1,42 – 7,32 [296,70 – 290,80]	7,32 – 8,64 [290,80 – 289,48]
F24-02	0,00 – 0,08 [298,22 – 298,14]	0,08 – 0,61 [298,14 – 297,61]	0,61 – 1,83 [297,61 – 296,39]	1,83 – 6,10 [296,39 – 292,12]	6,10 – 7,70 [292,12 – 290,52]

Réf. : Étude géotechnique et analyse de stabilité du barrage du Lac Tourbillon (No. 24-719) à Lac-Beauport, Québec

3.1.1 Structure de chaussée

Une structure de chaussée a été rencontrée en surface au droit des forages F-01 et F-02. La structure de chaussée est composée d'un enrobé bitumineux de 80 mm d'épaisseur et d'une fondation granulaire d'épaisseur de 170 mm à 530 mm.

La fondation granulaire est généralement composée de sable et gravier à sable graveleux avec un peu de silt, s'apparentant à une pierre concassée de calibre 0-20 mm.

3.1.2 Remblai granulaire

Sous la structure de chaussée, au droit des deux forages réalisés, une couche de remblai granulaire a été rencontrée jusqu'à une profondeur variant de 1,42 m à 1,83 m. Le remblai granulaire est généralement composé de gravier et sable à sable graveleux, traces à un peu de silt et traces d'argile, brune-verdâtre, et humide.

Le tableau ci-dessous présente les résultats d'essais en laboratoire effectués sur des échantillons jugés représentatifs de remblais granulaires. Les résultats de laboratoire sont également présentés en détail à l'annexe D.

Tableau 3 : Résultats des essais granulométriques par tamisage et sédimentométrie

Échantillon	Profondeur (m)	Teneur en eau (%)	Particules fines (%)		Sable (%)	Gravier (%)	Classification USCS ⁽¹⁾
			Argile	Silt			
F24-01 / CF-03A	1,42 – 1,83	8,9	0,5	13,8	40,1	45,6	GM (Gravier silteux avec sable)

(1) : Système unifié de classification des sols (USCS).

3.1.3 Dépôt naturel de till

Au droit des deux (2) forages, un dépôt naturel de till a été intercepté sous le remblai granulaire, jusqu'à des profondeurs de 6,10 m et 7,32 m. De façon générale, le dépôt de till est composé de sable, gravier et silt en proportions variables (gravier sableux silteux à sable silteux), brun à brun rougeâtre, humide à saturé.

La présence de cailloux et blocs probable a été notée dans les fonds des forages, à des profondeurs de 4,88 m (F24-01) et 5,49 m (F24-02) jusqu'au roc. La présence de matières organiques et racines a été également notée dans le dépôt de till.

La compacité de ce dépôt est qualifiée de très lâche à très dense avec des indices « N » qui varient entre 2 et plus que 50. La couche très dense est partie d'une profondeur comprise entre 4,88 et 6,13 mètres.

Il est à noter que les tills sont, par leur nature, des dépôts meubles hétérogènes et qu'ils peuvent présenter une forte variabilité de granulométrie, tant latéralement que verticalement. Il est possible qu'ailleurs dans le dépôt, des cailloux et des blocs de grandes dimensions soient présents en quantités plus importantes qu'au droit des forages réalisés dans le cadre de cette étude.

Réf. : Étude géotechnique et analyse de stabilité du barrage du Lac Tourbillon (No. 24-719) à Lac-Beauport, Québec

Les résultats des essais de laboratoire réalisés sur les échantillons till sont synthétisés dans les tableaux suivant et présenté à l'annexe D.

Tableau 4 : Résultats des essais de laboratoire sur le dépôt naturel de till

Échantillon	Profondeur (m)	Teneur en eau (%)	Particules fines (%)		Sable (%)	Gravier (%)	Classification USCS ⁽¹⁾
			Argile	Silt			
F24-01 CF-04	1,83 – 2,44	31,7	0,7	29,3	33,1	36,9	GM (Gravier silteux avec sable)
F24-02 CF-04	1,83 – 2,44	39,6	2,1	30,3	55,5	12,1	SM (Sable silteux)
F24-02 CF-05	2,44 – 3,05	33,4	1,6	26,3	46,8	25,3	SM (Sable silteux avec gravier)
F24-02 CF-07	3,66 – 4,26	53,3	2,1	19,9	37,7	40,3	GM (Gravier silteux avec sable)
F24-02 CF-08	4,26 – 4,87	43,2	12,8		43,4	43,8	GM (Gravier silteux)

(1) : Système unifié de classification des sols (USCS).

Tableau 5 : Résultats des limites de consistance et de la teneur en eau

Échantillon	Profondeur (m)	Limites d'Atterberg ⁽¹⁾					Classification USCS
		W _N (%)	W _L (%)	W _P (%)	I _P (%)	I _L	
F24-01 CF-04	1,83 – 2,44	31,7	36 (intact) 30,7 (après séchage)	32	4	0,1	ML
F24-01 CF-07	3,91 – 4,27	21,5 ⁽²⁾	33	18	15	-	CL ou OL
F24-02 CF-05	2,44 – 3,05	33,4	38	29	9	0,5	ML
F24-02 CF-07	3,66 – 4,26	53,3	55	46	9	0,8	MH ou OH

(1) W_N – Teneur en eau naturelle; W_L – Limite de liquidité; W_P – Limite de plasticité; I_P – Indice de plasticité; I_L – Indice de liquidité

(2) Selon l'échantillon de CF-08 de forage F24-01.

Selon le Système unifié de classification des sols (USCS), la fraction fine des échantillons de sol analysés correspond généralement à un sol de type ML, soit un silt inorganique de faible plasticité basée sur le rapport des limites de liquidité dans les conditions séchées au four et intactes (LL(après séchage)/LL(intact)>0,75). La fraction fine d'une couche située entre 3,66 m et 4,88 m de profondeur dans deux forages montre des classifications de type MH-OH et CL-OL, indiquant un silt ou une argile composée de matériaux inorganique ou organique de faible plasticité.

Les teneurs en eau réalisées sur les échantillons de ce dépôt varient de 21,5 à 53,3 %. Les valeurs de la limite de liquidité (W_L) varient de 33 à 55 %. Les valeurs de l'indice de liquidité varient de 0,1 à 0,8. Si la valeur de l'indice de liquidité est plus grande que 1, le sol se comportera comme un liquide lorsqu'il est remanié par des sollicitations extérieures.

La présence de matériaux organiques dans les sols composant le barrage pourrait entraîner des problèmes de tassement au fil du temps. Cela pourrait avoir pour conséquences un tassement différentiel de la crête, ainsi que l'apparition de fissures sur la surface et l'asphalte.

Réf. : Étude géotechnique et analyse de stabilité du barrage du Lac Tourbillon (No. 24-719) à Lac-Beauport, Québec

3.1.4 Roc

Le roc a été intercepté au droit des forages F24-01 et F24-02 à des profondeurs de 7,32 m et 6,10 m respectivement (élévations de 290,80 et 292,12 m). Il s'agit d'un shale gris-rougeâtre de très mauvaise qualité avec des indices de qualité du roc (RQD) variant de 0 à 23 %.

Les forages F24-01 et F24-02 ont été interrompus dans le roc à des profondeurs de 8,64 m et 7,70 m respectivement (élévations de 289,48 et 290,52 m).

3.2 Niveau d'eau

Le niveau de la nappe d'eau souterraine a été relevé le 21 octobre et le 25 novembre 2024 à l'intérieur du tube d'observation installé dans les forages F24-01 et F24-02. Le tableau suivant résume les profondeurs et élévations de l'eau souterraine.

Tableau 6 : Profondeur des eaux souterraines

Forage	Élévation de surface (m)	Date d'installation	Date de relevé	Eaux souterraines (à la date de relevé)	
				Profondeur (m)	Élévation (m)
F24-01	298,12	2024-10-02	2024-10-21	1,48	296,64
			2024-11-25	1,60	296,52
F24-02	298,22	2024-10-02	2024-10-21	2,32	295,90
			2024-11-25	2,39	295,83

Le niveau du lac est à l'élévation de seuil à 297,22 m.

Il est important de noter que le niveau de l'eau dans les sols peut être influencé par plusieurs facteurs tels que les précipitations, la fonte de neige et les modifications apportées au milieu physique. Ainsi, le niveau d'eau souterraine peut être amené à varier selon les saisons, les années et les diverses interventions sur le site. Il demeure donc possible que ces conditions soient différentes lors de la réalisation des travaux projetés sur le site.

3.3 Estimations de perméabilité

La conductivité hydraulique a été estimée à partir des résultats des essais de perméabilité à niveau variable réalisés dans les forages F24-01 et F24-02 en novembre 2024. La méthode à charge variable ascendante a été utilisée dans les deux forages.

Réf. : Étude géotechnique et analyse de stabilité du barrage du Lac Tourbillon (No. 24-719) à Lac-Beauport, Québec

Ces méthodes permettent d'obtenir des valeurs ponctuelles de la conductivité hydraulique pour les lithologies situées à proximité de la crépine des puits testés. Les données ainsi recueillies ont été traitées puis interprétées par les méthodes de Chapuis (1981) et de Hvorslev (1951). Les valeurs estimées par les essais et les valeurs moyennes utilisées dans notre calcul sont représentées au tableau 7. Il convient de noter que lors des essais, après avoir retiré 50 écopés d'eau des puits, le niveau de l'eau a rapidement remonté, permettant d'abaisser la nappe phréatique seulement de 7 cm dans le puits F24-01 et de 25 cm dans le puits F24-02. Cela indique que les deux piézomètres sont directement chargés par le lac.

Tableau 7 : Estimation de la perméabilité par des essais à niveau variable

Forage	Matériau	Profondeur de l'essai (m)	Niveau variable	Test de perméabilité (m/s)	
				Chapuis et al., (1981)	Hvorslev (1951)
F24-01	Sol (Till)	1,2 – 4,2	Ascendant	$8,04 \times 10^{-6}$	$7,77 \times 10^{-6}$
F24-02	Sol (Till)	1,5 – 4,5	Ascendant	$4,51 \times 10^{-6}$	$4,57 \times 10^{-6}$

La conductivité hydraulique de till saturé a été estimée par les méthodes de Kozeny-Carman (Chapuis et Aubertin, 2003) et Chapuis (2004) en se basant sur la granulométrie des échantillons CF-03A et CF-04 prélevés du forage F24-01 à profondeurs de 1,42 m à 2,44 m, ainsi que des échantillons CF-04, CF-05 et CF-07 du forage F24-02 à profondeurs de 1,83 m à 4,26 m. L'indice des vides des sols argileux a été estimé sur la base de leurs teneurs en eau. Le tableau 8 présente les résultats obtenus.

Tableau 8 : Estimation de la perméabilité par des méthodes analytiques

Forage	Échantillon	Profondeur (m)	D10 ¹ (mm)	D60 ² (mm)	Indice des vides estimé	Teneur en eau (%)	Chapuis (2004) (m/s)	Kozeny-Carman (m/s)
F24-01	CF-03A (Remblai)	1,42 - 1,83	0,020	7,00	0,25	8,9	$1,7 \times 10^{-6}$	$4,0 \times 10^{-6}$
F24-01	CF-04 (Till)	1,83 – 2,44	0,030	1,60	0,87	31,7	$4,5 \times 10^{-5}$	$6,5 \times 10^{-5}$
F24-02	CF-04 (Till)	1,83 – 2,44	0,035	0,25	1,09	39,6	$8,9 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-4}$
F24-02	CF-05 (Till)	2,44 – 3,05	0,040	0,50	0,92	33,4	$7,9 \times 10^{-5}$	$1,2 \times 10^{-4}$
F24-02	CF-07 (Till)	3,66 – 4,26	0,040	5,00	1,47	53,3	$1,9 \times 10^{-4}$	$1,6 \times 10^{-4}$

(¹) Diamètre dont 10 % des particules sont de tailles inférieures

(²) Diamètre dont 60 % des particules sont de tailles inférieures

4 Géométrie existante

Deux sections transversales (A-A et B-B) ont été sélectionnées à proximité des forages F24-01 et F24-02 pour réaliser l'analyse de stabilité. La figure ci-dessous illustre l'emplacement de ces sections, profilée à partir des données d'arpentage (Stantec, 2024) ainsi que des données existantes de Lidar 2013 et bathymétriques 2023.

Réf. : Étude géotechnique et analyse de stabilité du barrage du Lac Tourbillon (No. 24-719) à Lac-Beauport, Québec

Les profils des coupes A-A et B-B montrent généralement un dénivelé d'environ 2,75 m de hauteur entre le sommet et les bas des talus, tant en amont qu'en aval. Les talus en amont ont été séparés en deux (2) sections. En partant de la base du talus, la première section d'environ 1,75 m et présente une inclinaison d'environ $10,5^\circ$ (5,4H : 1V). Par la suite, la deuxième section est d'une hauteur d'environ 1 m de hauteur et présente une inclinaison d'environ 18° à 20° (3 à 2,7H : 1V) par rapport à l'horizontale. En aval, l'inclinaison des talus est d'environ $25,0^\circ$ (2,1H:1V), par rapport à l'horizontale.

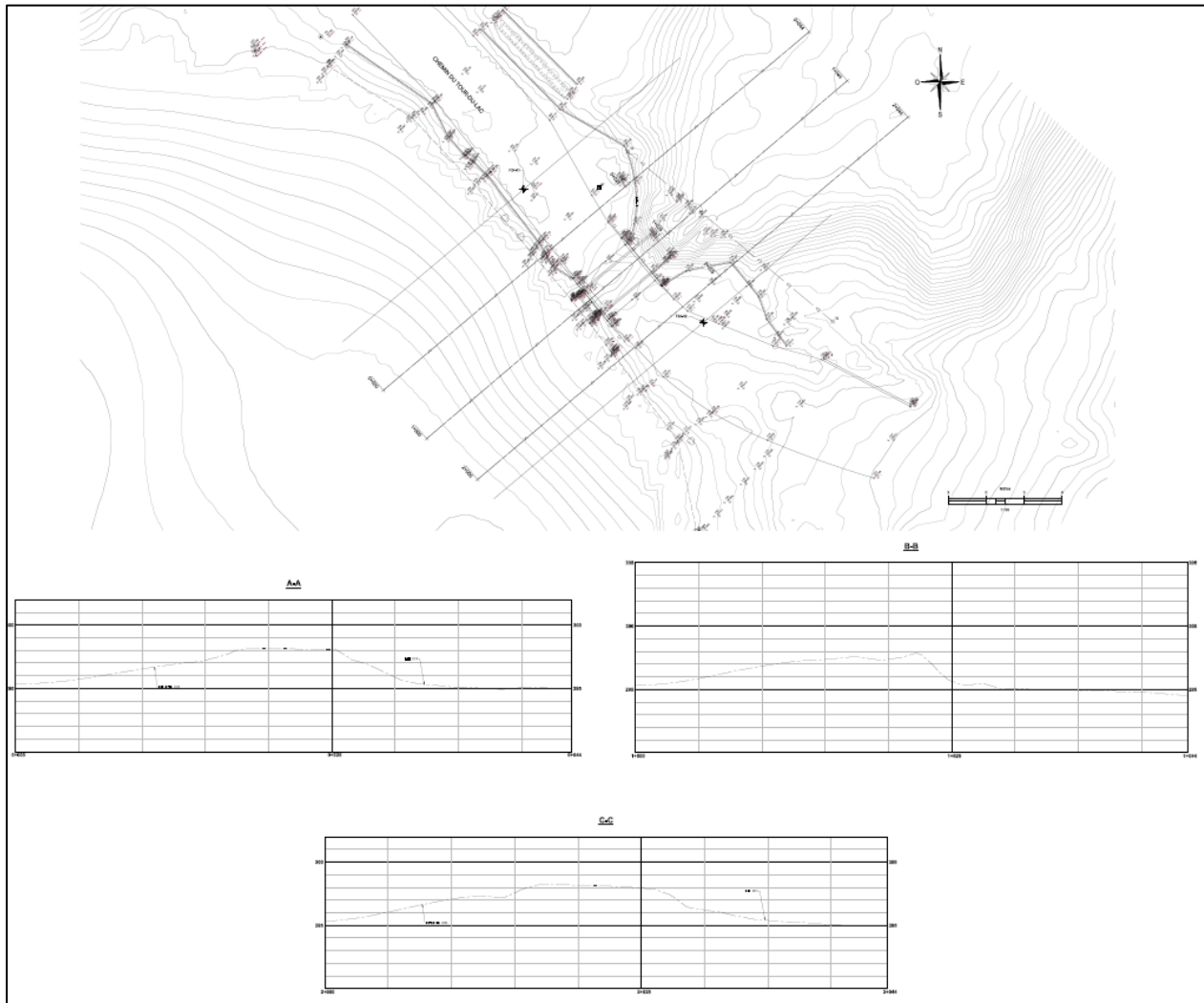


Figure 7 : Emplacement des forages F24-01 et F24-04, ainsi que les coupes transversales A-A à C-C

Réf. : Étude géotechnique et analyse de stabilité du barrage du Lac Tourbillon (No. 24-719) à Lac-Beauport, Québec

4.1 Potentiel de liquéfaction

Dans cette note technique, Stantec a réalisé une évaluation d'analyse simplifiée de liquéfaction aux droits des forages F24-01 et F24-02 en utilisant la méthode de Boulanger et Idriss (2014) en fonction des indices N mesurés lors des essais de pénétration standard (SPT). Les calculs ont été réalisés en considérant les paramètres sismiques définis dans le « *Code national du bâtiment (2020)* », soit une valeur d'accélération maximale du sol (AMS) ajustée pour un site de classe « **D** » à **0,449 g** pour une probabilité de dépassement de 2 % en 50 ans. L'évaluation a été basée sur les paramètres suivants :

- Une profondeur de la nappe phréatique stabilisée à 1,5 m.
- Une magnitude de séisme, Mw de 6,17 selon Ressources naturelles Canada.
- Il est à noter que la liquéfaction ne peut se produire que dans des sols saturés. Les sols situés au-dessus de la nappe phréatique ont été considérés comme non liquéfiables.
- La teneur en particules fines des sols analysés a été déterminée à partir d'analyses granulométriques réalisées sur certains échantillons du forage.

Les résultats d'analyse à l'emplacement de chaque forage sont présentés dans le tableau suivant. Les résultats de l'analyse indiquent que le facteur de sécurité contre la liquéfaction est inférieur à 1,0 dans le dépôt de till au droit du forage F24-01 et dans le remblai granulaire et le till au droit du forage F24-02.

Le tassement du sol post-liquéfaction dû à la dissipation des pressions interstitielles excessives dans les couches de sol liquéfié a été évalué à l'aide de la méthode d'Idriss et Boulanger, 2008. Le tassement dans chaque couche de sol liquéfiable a été estimé et le tassement cumulé a été évalué en fonction de la profondeur. L'ampleur du tassement cumulé augmente vers la surface du sol à mesure que la contribution de chaque couche liquéfiable s'ajoute. Le tassement estimé du sol après liquéfaction à la suite de l'événement sismique avec une période de retour de 2 475 ans est également présenté dans le tableau suivant.

Selon la méthode de calcul Idriss et Boulanger 2014, les tassements post-liquéfaction sont évalués 86 à 98 mm aux emplacements des forages F24-01 et F24-02 (ce qui représente le déplacement permanent vertical).

Tableau 9 : Résultats de l'analyse de liquéfaction selon les séismes provenant du CNB 2020

Location	Haut de l'horizon liquéfiable (m)	Bas de l'horizon liquéfiable (m)	Épaisseur des horizons liquéfiable (m) (m)	Facteur de sécurité contre la liquéfaction	Tassement anticipé (mm)
F24-01	1,8	5,4	3,6	0,4	98
F24-02	1,2	3,5	2,3	0,5 – 0,9	86

5 Analyse d'écoulement d'eau

Les recommandations géotechniques qui suivent ont été élaborées sur la base des informations fournies par le client, les observations des conditions au site et à partir des données de sols rencontrés dans les forages F24-01 et F24-02 réalisés dans le cadre de ce mandat.

Réf. : Étude géotechnique et analyse de stabilité du barrage du Lac Tourbillon (No. 24-719) à Lac-Beauport, Québec

Les analyses d'écoulement ont été réalisées à l'aide du logiciel SEEP/W, qui utilise la méthode des éléments finis pour modéliser en deux dimensions (2D) les flux d'eau et la distribution de la pression interstitielle dans les matériaux poreux. Le modèle d'écoulement a été résolu en régime permanent (*steady-state*), en supposant des conditions aux limites du modèle constantes dans le temps. Dans ce cadre, l'état d'équilibre est atteint lorsque la pression et les débits d'eau deviennent stables.

Le modèle d'écoulement développé dans SEEP/W inclut une modélisation des régimes saturés/non saturés. Dans ce type de système, la ligne phréatique correspond à une pression d'eau nulle plutôt qu'à une barrière physique. Cette méthode permet de représenter les flux traversant la ligne phréatique, résultant du mouvement entre les zones saturées et non saturées. Ainsi, l'infiltration peut avoir lieu aussi bien au-dessus qu'en dessous de la ligne phréatique, facilitant des chemins d'écoulement complexes.

5.1 Description du modèle

La figure 8 illustre la géométrie du modèle SEEP/W pour les coupes A-A et B-B. Ces coupes correspondent approximativement aux puits d'observation F24-01 et F24-02.

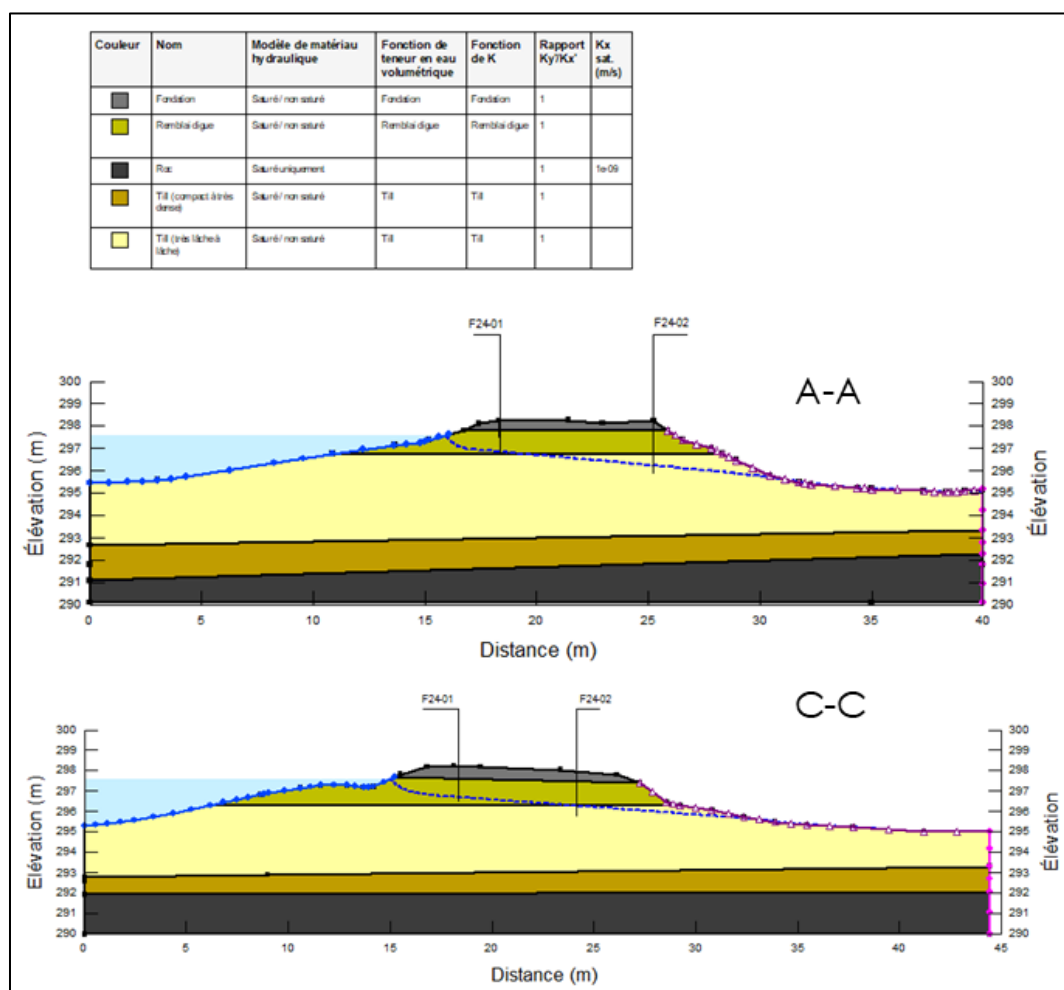


Figure 8 : Les géométries des modèles SEEP/W pour les coupes A-A et B-B

Réf. : Étude géotechnique et analyse de stabilité du barrage du Lac Tourbillon (No. 24-719) à Lac-Beauport, Québec

Le modèle comporte quatre unités hydrostratigraphiques :

1. Le remblai de la structure de chaussée;
2. Le remblai de la digue;
3. Le till naturel;
4. Le roc fracturé en surface.

Les valeurs de conductivité hydraulique appliquées dans les modèles SEEP/W sont présentées dans le tableau 10. Les valeurs ont été déterminées de manière itérative dans le modèle pour créer une correspondance avec les niveaux d'eau souterraine mesurés, en tenant compte des valeurs présentées dans les tableaux 7 et 8. Une série d'analyses d'écoulements a été effectuée pour obtenir la ligne phréatique similaire au niveau d'eau observée dans les piézomètres en appliquant le niveau d'eau normal dans le réservoir.

Tableau 10 : Les conductivités hydrauliques utilisées dans les modèles Seep/W

Matériaux	Modèle	Forage	Conductivité hydraulique, k_h (m/s)	k_h / k_v
Le remblai de la structure de chaussée	Saturé / non saturé	F24-01 et F24-02	$1,0 \times 10^{-3}$	1
Le remblai de la digue			$4,0 \times 10^{-6}$	
Le till naturel			$2,0 \times 10^{-4}$	
Roc fracturé	Saturé		$1,0 \times 10^{-9}$	

Les conditions aux limites du modèle, qui représentent l'interaction avec les éléments extérieurs à la zone modélisée, ainsi que les niveaux d'eau utilisés pour calibrer les modèles, sont présentées dans le tableau 11.

Les charges hydrostatiques aux limites amont et aval du modèle ont été estimées à partir des niveaux d'eau prévus dans le réservoir (normal et crue 100 ans) et du niveau du lit du cours d'eau en aval du déversoir (voir le tableau 11). Il est évident que le niveau de la nappe phréatique en aval du barrage était contrôlé par la géométrie du cours d'eau situé en aval du déversoir, qui draine deux digues séparées par le pont et le déversoir encastré. Ainsi, le niveau de la nappe phréatique en aval a été supposé être au niveau du cours d'eau, soit 295 m (figure 7, coupe B-B). La condition limite de la *Surface d'exfiltration potentielle (Seepage face)* a été appliquée à la moitié inférieure de la pente en aval et à la surface de terrain pour permettre au solveur interne du SEEP/W de déterminer l'emplacement exact de la face d'infiltration. L'horizon inférieur du modèle, à l'élévation 290 m, est considérée comme imperméable.

Le maillage final des modèles d'éléments finis comprend 58 556 (A-A) à 62 638 (B-B) éléments, répartis en Quads et Triangles. Une taille maximale d'élément de 0,05 m a été imposée aux couches de remblai de la digue et de till naturel. Ces zones sont la plus critique du modèle pour la convergence en raison des variations abruptes de la vitesse et de la charge hydraulique. Les charges hydrauliques aux piézomètres et les gradients hydrauliques au pied du barrage ne sont pas influencés par l'utilisation d'un maillage plus fin. Ainsi, les résultats sont indépendants du maillage.

Réf. : Étude géotechnique et analyse de stabilité du barrage du Lac Tourbillon (No. 24-719) à Lac-Beauport, Québec

Tableau 11 : Niveaux d'eau utilisés dans l'analyse

Emplacement	Conditions	Condition aux limites du modèle	Élévation (m)
Amon	Niveau d'eau au lac : Normal	Niveau d'eau statique	297,39
	Niveau d'eau au lac : Crue (Récurrence 100 ans)		297,57
F24-01 / Amont	Niveau d'eau mesuré dans le forage / Emplacement	N/A	296,52
F24-02 / Aval		N/A	295,83
Aval	La pente en aval et la surface de terrain	Surface d'exfiltration	Zéro m/s
Aval	Niveau d'eau en aval : dans le cours d'eau	Niveau d'eau statique	95,0

5.2 Résultats de l'analyse des infiltrations et érosion interne

Les modèles calibrés ont été utilisés pour simuler la ligne phréatique à travers du barrage et les gradients hydrauliques lors d'épisodes de niveau d'eau maximal du réservoir (crue 100 ans). La figure ci-dessous présente les résultats du modèle SEEP/W pour les coupes A-A et C-C. Les courbes d'équipotentiels hydrauliques du modèle sont présentées à la figure 9, la direction de l'écoulement d'eau est perpendiculaire aux courbes équipotentiels.

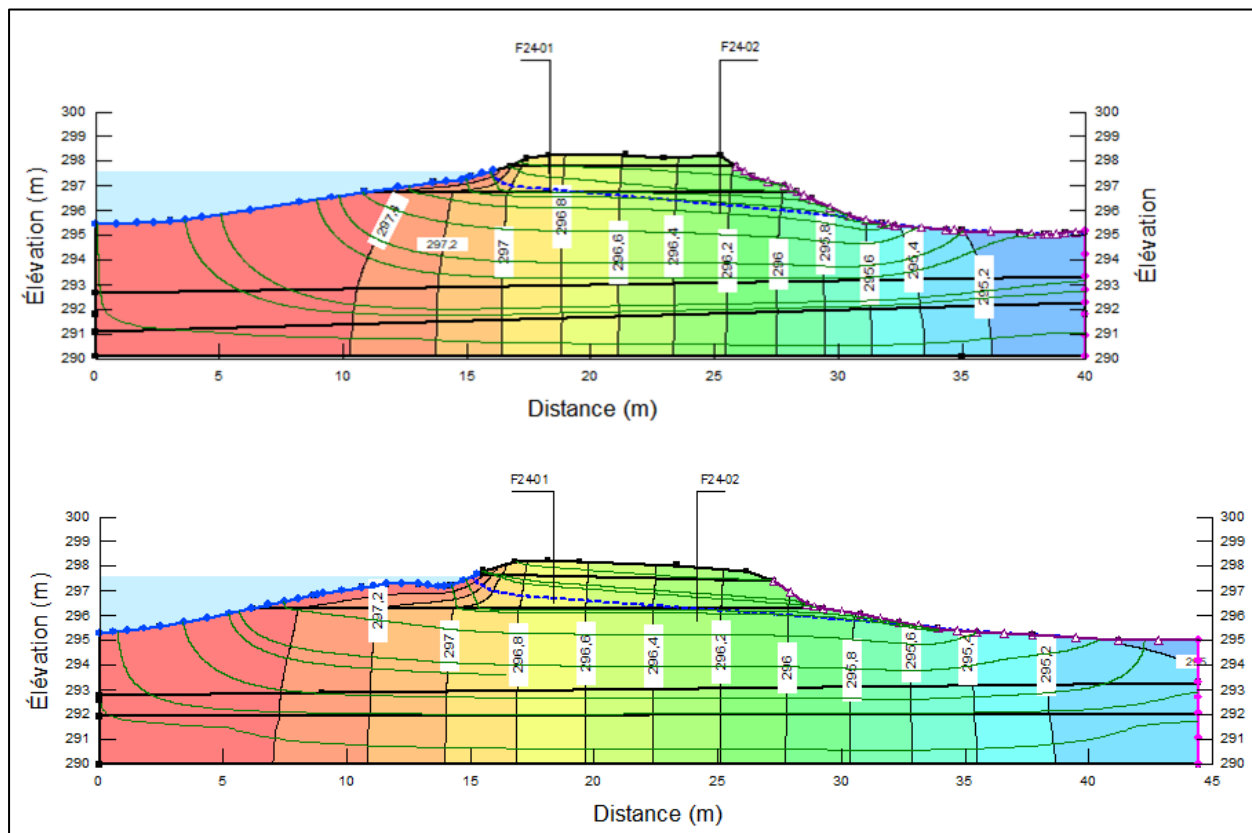


Figure 9 : Les équipotentiels hydrauliques, les lignes d'écoulements d'eau et ligne phréatique supposée à travers le barrage sous le niveau du crue 100 ans

Réf. : Étude géotechnique et analyse de stabilité du barrage du Lac Tourbillon (No. 24-719) à Lac-Beauport, Québec

L'érosion régressive se produit lorsque l'érosion commence à un point de sortie et progresse vers l'arrière, formant un renard hydraulique. Une analyse du risque d'érosion régressive se porte principalement sur sa phase initiale, sur les conditions déclencheurs pouvant éroder les particules de sol à l'exutoire de l'écoulement. Le risque est évalué en fonction du rapport entre le gradient critique ($i_{critique}$) vertical et le gradient actuel (i) à l'exutoire de l'écoulement, qui se trouve derrière le mur pour ce projet. Les conditions d'écoulement ascendant qui entraînent un gradient de sortie de 1,0 représentent une condition de contrainte effective nulle, par conséquent, les gradients de sortie ne doivent pas être supérieurs à 1,0.

Le facteur de sécurité contre la formation d'un renard hydraulique, un phénomène d'érosion interne très dangereux, est généralement considéré comme $i_{critique} / i$, où le gradient de sortie critique, $i_{critique}$, est généralement considéré comme compris entre 0,85 et 1,1. Le facteur de sécurité ciblé est généralement compris entre 2,0 et 4,0.

Le gradient hydraulique en aval du barrage présenté dans le tableau ci-dessous correspond à un facteur de sécurité contre la formation d'un renard hydraulique de plus que 4,0, ce qui répond aux exigences du projet.

Tableau 12 : Gradients hydrauliques critiques calculés en aval de la digue

Emplacement	Gradient XY hydraulique	$i_{critique} / i$
	En aval du mur	
A-A	0,2	> 4
C-C	0,2	> 4

6 Analyse de Stabilité sans liquéfaction des sols

Une analyse de stabilité a été effectuée sur les coupes A-A et C-C. Les données sur le sol et les eaux souterraines recueillies à partir des forages effectués en haut du talus ont été utilisées pour modéliser les conditions du sol en vue de l'analyse de la stabilité du barrage.

Les analyses de stabilité du talus ont été réalisées à l'aide du logiciel SLOPE/W de la suite *GeoStudio* 2024.1.0, basé sur la méthode d'équilibre limite. La méthode d'analyse *Morgenstern-Price* a été utilisée pour évaluer la stabilité du talus, avec l'option « entrée - sortie » pour contraindre les arcs des cercles de glissement à une gamme de profondeurs réalistes. Une profondeur de surface de glissement minimale de 1,0 m est utilisée pour exclure les surfaces de glissement superficielles.

Le tableau ci-dessous présente les paramètres géotechniques utilisés dans le cadre de ces analyses de stabilité. Les paramètres de sols utilisés pour les analyses de stabilité ont été estimés sur la base des valeurs SPT, des résultats d'essais en laboratoire, des corrélations empiriques provenant de la littérature, ainsi que de l'expérience de Stantec. Un modèle du sol simplifié, mais représentatif a été développé pour l'analyse de la stabilité des pentes.

Réf. : Étude géotechnique et analyse de stabilité du barrage du Lac Tourbillon (No. 24-719) à Lac-Beauport, Québec

Tableau 13 : Paramètres géotechniques des sols pour analyses de stabilité

Matériel	Compacité	Forage	γ (kN/m ³)	Propriétés drainées	
				c' (kPa)	Φ' (°)
Fondation granulaire	-	F24-01 et F24-02	21	0	34
Remblai granulaire	-		19	0	29
Dépôt de till	Très lâche à lâche		19	0	28
	Compact à très dense		19	0	33

La synthèse des modèles constitutifs des matériaux utilisés dans la stabilité des talus est la suivante :

- Pour l'analyse à court terme et à long terme, le matériau granulaire a été modélisé à l'aide de la méthode de contrainte effective, Mohr-Coulomb (MC);
- Pour l'analyse de stabilité en conditions pseudo-statiques, la force statique horizontale a été prise en compte dans la modélisation. La force équivaut à 50 % de l'accélération maximale du sol, soit 0,224 g pour une probabilité de 2 % en 50 ans. La valeur est conforme aux valeurs CNBC 2020 pour la classe de site D et a été obtenue à partir du site Web de Ressources naturelles Canada. Le niveau d'eau du lac est supposé à un niveau de 297,39 m pour l'analyse pseudo-statique;
- Une surcharge de 16 kPa est appliquée sur la largeur de la chaussée. Cette surcharge équivaut à un remblai d'une hauteur de 0,80 m comme recommandé par le Code canadien des ponts routiers (2019).

Les critères d'analyse de stabilité du talus portent sur les facteurs de sécurité suivants :

- Facteur de sécurité minimal de 1,5 à long terme (condition statique);
- Facteur de sécurité minimal de 1,0 en cas de séisme (condition pseudo-statique).

6.1 Résultats des analyses de stabilité sans liquéfaction des sols

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-dessous et les analyses de stabilité effectuées sont présentées à l'annexe E.

Tableau 14 : Résultats des analyses de stabilité pour les pentes existantes

Coupe	Emplacement	Facteur de sécurité (FS)	
		Analyse statique	Analyse pseudo-statique
		Niveau d'eau : Crue 100 ans	Niveau d'eau : Normal
		Propriétés drainées	
		FS requis : 1,5	FS requis : 1,0
		Rupture critique	Rupture critique
A-A	Amont	1,9	1,0
	Aval	1,2	0,7
C-C	Amont	2,4	1,0
	Aval	1,5	0,8

Réf. : Étude géotechnique et analyse de stabilité du barrage du Lac Tourbillon (No. 24-719) à Lac-Beauport, Québec

Selon les résultats de l'analyse de stabilité en conditions statiques, les pentes des coupes A-A et C-C sont généralement stables, à l'exception de la pente aval de la coupe A-A, qui présente une précarité de stabilité de 25 % pour atteindre la valeur minimale requise en condition statique (1,5).

Les pentes amont seraient stables en cas d'événement sismique avec une probabilité de dépassement annuel de 2 % en 50 ans (périodicité de 2 475 ans). Cependant, les pentes aval nécessitent une amélioration de 25 % à 45 % pour atteindre le facteur de sécurité minimum requis (1,0).

Les graphiques démontrant les cercles de rupture hypothétique sont présentés à l'annexe E.

7 Analyse statique avec sols liquéfiables : post-liquéfaction

Une analyse post-liquéfaction pour quantifier la réduction du facteur de sécurité que causerait un événement de liquéfaction a été effectuée. Les valeurs de résistance en cisaillement résiduel du sable liquéfié ont été estimées selon la figure 8.28 du Manuel canadien d'ingénierie des fondations (2023). Les valeurs de résistance résiduelle ont été estimées sur la base de la limite inférieure dans la figure 10. Le tableau 15 montre les valeurs résiduelles de résistance au cisaillement du sable liquéfié. Le tableau 16 présente les facteurs de sécurité post-liquéfaction calculés.

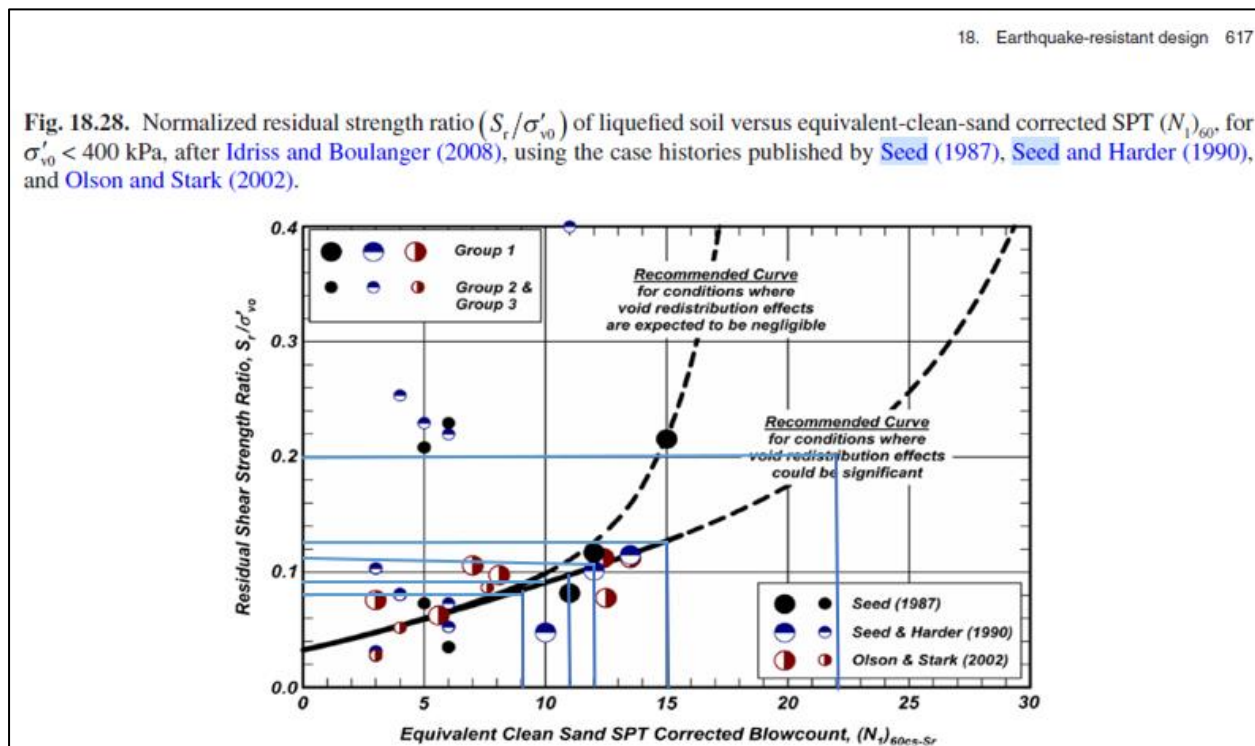


Figure 10 : Résistance en cisaillement résiduel du sable liquéfié

Réf. : Étude géotechnique et analyse de stabilité du barrage du Lac Tourbillon (No. 24-719) à Lac-Beauport, Québec

Tableau 15 : Résistance en cisaillement résiduel du sable liquéfié

Forage	Prof. (m)	Élévation (m)	SPT	$N_{1,60,CS}$	σ'_{v0}	S_r/σ'_{v0}	Sr (kPa)	Appliqué dans le modèle
F24-01	2.1	296.01	2	9	35.7	0.08	3	3
	3.3	294.79	6	15	47.6	0.13	6	6
	3.9	294.18	3	10	50.6	0.09	5	
	4.5	293.57	4	12	59.8	0.11	7	
	5.2	292.96	11	22	65.9	0.20	13	13
F24-02	2.7	295.48	2	9	41.9	0.08	3	3
	3.3	294.92	6	15	47.6	0.13	6	6

Dans l'analyse statique complétée au moyen du Logiciel Slope/ W, cette valeur est insérée comme une valeur de cohésion pour le sable liquéfié.

Tableau 16 : Facteur de sécurité calculé post-liquéfaction

Coupe	Forage	Location	Facteur de sécurité requis	Facteur de sécurité obtenu
A-A	F24-01 et F24-02	Amont	1,2 – 1,3	1,5
		Aval		0,7
C-C		Amont		2,1
		Aval		0,9

Les valeurs du facteur de sécurité (FS) calculées pour les pentes amont des deux coupes respectent les valeurs minimales de stabilité. Cependant, les valeurs de FS calculés pour les pentes aval sont de 35 % (B-B) à 75 % (A-A) inférieures aux exigences minimales. Ces cercles de glissement potentiel affecteraient l'ensemble du corps du barrage, impliqué dans un échec total de la digue (figure 11). Les résultats des analyses sont présentés sur les figures à l'annexe B.

Réf. : Étude géotechnique et analyse de stabilité du barrage du Lac Tourbillon (No. 24-719) à Lac-Beauport, Québec

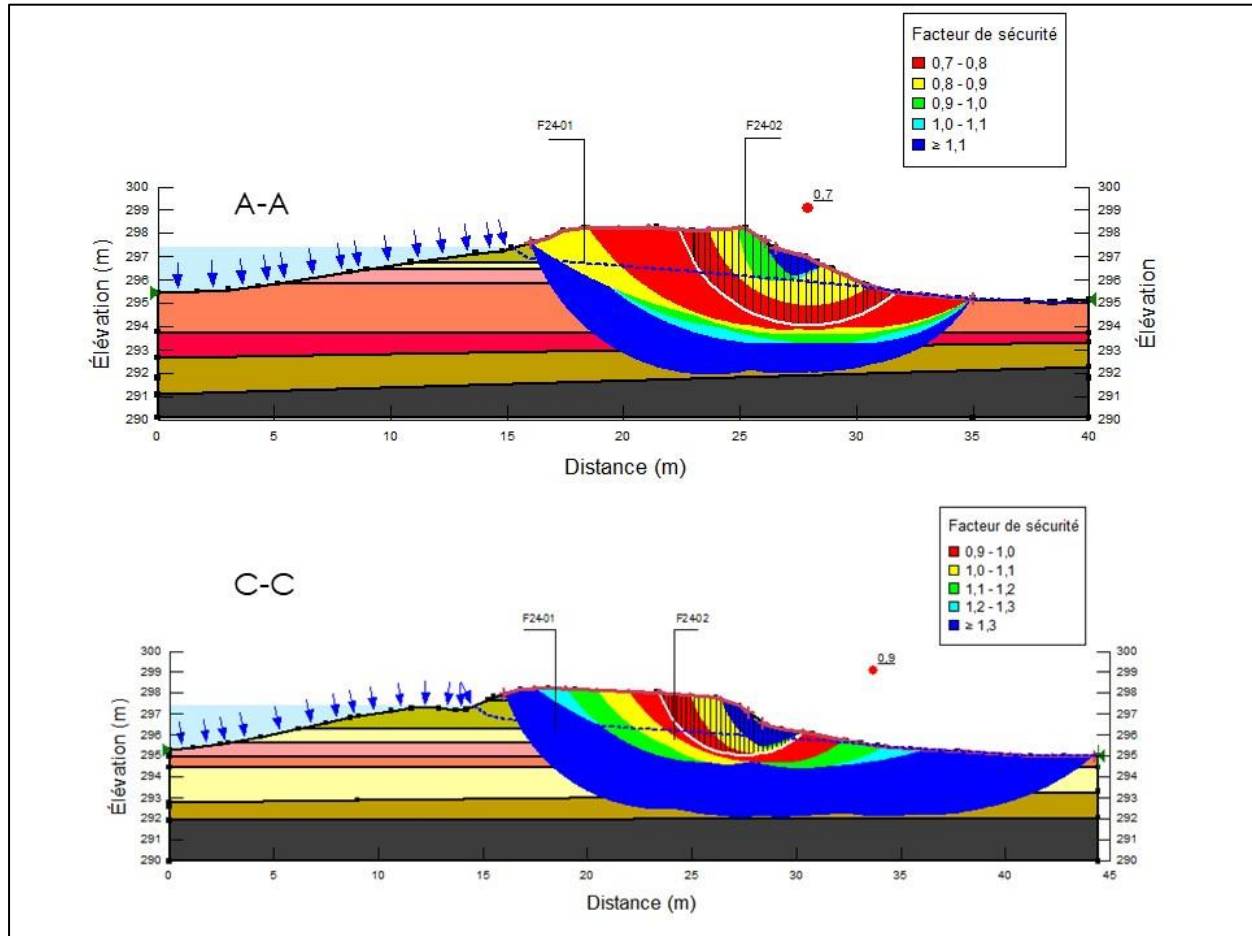


Figure 11 : Cercles de glissement post-liquéfaction des coupes A-A et C-C

8 Résumé

Une analyse simplifiée de liquéfaction a été réalisée aux emplacements des forages F24-01 et F24-02 en utilisant la méthode d'Idriss et Boulanger (2014) et les données d'essais SPT, conformément aux paramètres sismiques définis dans le Code national du bâtiment (2020). Les résultats indiquent que le facteur de sécurité contre la liquéfaction est inférieur à 1,0 dans le till naturel aux deux forages.

Deux coupes transversales ont été sélectionnées pour évaluer la stabilité du barrage à partir des données Lidar et de bathymétrie. Les pentes existantes en amont présentent une inclinaison de 10,5° à 20,0°, tandis que les pentes en aval présentent une inclinaison d'environ 25°.

Une analyse de stabilité a été réalisée pour évaluer les pentes amont et aval des coupes proposées avant et après liquéfaction. Avant liquéfaction, les facteurs de sécurité respectent généralement les critères minimaux requis pour les conditions statiques.

Réf. : Étude géotechnique et analyse de stabilité du barrage du Lac Tourbillon (No. 24-719) à Lac-Beauport, Québec

Cependant, les facteurs de sécurité pour les pentes en aval de la digue ne respectent pas l'exigence minimale en condition statique. Après liquéfaction, une analyse utilisant le logiciel Slope/W a permis d'intégrer la cohésion réduite du sable liquéfié dans les calculs. Les résultats pour des pentes en aval montrent que, même après un événement de liquéfaction, les facteurs de sécurité restent inférieurs à la valeur minimale requise pour assurer la stabilité des pentes. Les cercles de glissement hypothétique indiquent un risque de déstabilisation et par conséquent un échec total de la digue.

L'analyse de la vitesse d'exfiltration au pied du talus des deux coupes par un modèle d'écoulement d'eau démontre que le risque d'une érosion régressive (renard hydraulique) est peu probable.

Les tassements post-liquéfaction ont été estimés à l'aide de la méthode d'Idriss et Boulanger (2008). Ils varient entre 86 mm et 98 mm, augmentant cumulativement vers la surface. Ces valeurs représentent des déplacements verticaux permanents après un événement sismique avec une période de retour de 2 475 ans.

9 Recommandations

Il est recommandé de mettre en place des mesures correctives pour atteindre les objectifs suivants :

- Rendre les sols sous le barrage et le déversoir non liquéfiables.
- Stabiliser la pente en aval.

Pour rendre le till non liquéfiable jusqu'à une profondeur d'environ 6 m sous la crête du barrage, il est probable que des méthodes d'amélioration du sol telles que l'installation de colonnes de pierre compactées (ballastées) puissent être nécessaires.

Pour obtenir un barrage avec des facteurs de sécurité appropriés, des pentes en aval plus plates doivent être conçues.

En plus de ce qui précède, il est recommandé de retirer tous les arbres et broussailles des digues formant le barrage ; le système racinaire peut créer des chemins de drainage qui peuvent conduire à une érosion interne.

10 Références

Chapuis, R. P. (2004). Predicting the saturated hydraulic conductivity of sand and gravel using effective diameter and void ratio. *Canadian geotechnical journal*, 41(5), 787-795.

Idriss, I. M., and Boulanger, R. W. (2008). Soil liquefaction during earthquakes. Monograph MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, 261 pp.

Olson, S. M., & Stark, T. D. (2002). Liquefied strength ratio from liquefaction flow failure case histories. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(3), 629-647.

Seed, R. B., and Harder, L. F. (1990). "SPT-based analysis of cyclic pore pressure generation and undrained residual strength." Proc.

Manuel Canadien d'ingénierie des fondations (2013). Société canadienne de géotechnique.

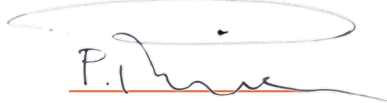
Réf. : Étude géotechnique et analyse de stabilité du barrage du Lac Tourbillon (No. 24-719) à Lac-Beauport, Québec

11 Clôture

Cette note a été préparée par Pouyan Pirnia, ing., Ph.D., et révisée par Raymond Haché, ing., M.Sc.

Nous espérons que les informations présentées ici répondent à vos besoins actuels. Si vous avez des questions ou avez besoin d'informations supplémentaires, n'hésitez pas à communiquer avec nous.

STANTEC EXPERTS-CONSEILS LTÉE



Pouyan Pirnia, ing., Ph.D.
Ingénieur – Géotechnique
Cell : (418) 446-2178
pouyan.pirnia@stantec.com

Raymond Haché, Ing., M.Sc.
Directeur, Ingénieur – Géotechnique
Cell : (613) 2980661
raymond.hache@stantec.com

Pièce jointe : Annexe A – Énoncé de conditions générales
 Annexe B – Plan de localisation des forages
 Annexe C – Rapports de forage
 Annexe D – Rapports d'essais de laboratoire
 Annexe E – Résultats des analyses de stabilité de talus

ANNEXE A
Énoncé de conditions générales

ÉNONCÉ DES CONDITIONS GÉNÉRALES

UTILISATION DU PRÉSENT RAPPORT : Le présent rapport a été préparé pour le seul bénéfice du client ou de son agent et il ne peut être utilisé par une tierce partie sans le consentement expressément écrit de Stantec Experts-conseils Ltée et du client. La responsabilité de toute utilisation du présent rapport par une tierce partie relève de cette dernière.

FONDEMENT DU RAPPORT : Les renseignements, les opinions ou les recommandations contenus dans le présent rapport sont en accord avec la compréhension actuelle de Stantec Experts-conseils Ltée relativement au projet spécifique au site, comme décrit par le client. Leur applicabilité se limite aux conditions du site au moment de l'investigation ou de l'étude. Si le projet spécifique au site proposé diffère de la description indiquée dans le présent rapport ou s'il est modifié, ou si les conditions du site ont changé, alors le présent rapport n'est plus valide à moins que le client demande à Stantec Experts-conseils Ltée de réviser et de mettre à jour le rapport afin qu'il reflète les modifications apportées au projet ou l'évolution des conditions du site.

NORMES DE CONDUITE : La préparation du présent rapport ainsi que tous les travaux connexes ont été réalisés conformément aux normes de conduite acceptées dans l'État ou la province où a lieu la prestation du service professionnel précis fourni au client. Aucune autre garantie n'est donnée.

INTERPRÉTATION DES CONDITIONS DU SITE : Dans ce rapport, les descriptions du sol, du socle rocheux ou des autres matériaux ainsi que les énoncés concernant leur état sont basés sur les conditions du site constatées par Stantec Experts-conseils Ltée au moment de réaliser le travail et aux emplacements précis des essais ou des échantillonnages. Les classifications et les énoncés concernant les conditions sont établis conformément aux pratiques normalement acceptées, lesquelles sont discrétionnaires par nature; aucune description spécifique ne doit être considérée comme exacte, mais plutôt comme un reflet du comportement attendu des matériaux. L'extrapolation des conditions in situ ne peut être faite que dans une certaine étendue limitée au-delà des points d'échantillonnages et d'essais. L'étendue dépend de la variabilité des conditions du sol, du socle rocheux et de l'eau souterraine, selon l'influence des processus géologiques, des activités de construction et de l'utilisation du site.

CONDITIONS VARIABLES OU INATTENDUES : Dans l'éventualité où les conditions réelles du site ou les conditions souterraines diffèrent de celles décrites dans le présent rapport ou constatées aux emplacements d'essais, Stantec Experts-conseils Ltée doit en être avisée immédiatement afin de déterminer si les conditions variables ou inattendues sont importantes et s'il est nécessaire de réévaluer les conclusions ou les recommandations du rapport. Stantec Experts-conseils Ltée n'est pas responsable envers toute partie tierce pour les dommages encourus si elle n'est pas avisée des changements des conditions du site ou des conditions souterraines dès leur découverte.

PLANIFICATION, CONCEPTION OU CONSTRUCTION : Les plans de développement ou de conception et les spécifications doivent être révisés par Stantec Experts-conseils Ltée, et ce, suffisamment de temps avant le début de la prochaine étape du projet (acquisition de propriété, soumission, construction, etc.), afin de confirmer que le présent rapport tient entièrement compte des caractéristiques du projet élaboré et que le contenu du présent rapport a été correctement interprété. Durant la construction, des services spécialisés d'assurance de la qualité (observations sur le terrain et essais) seront nécessaires dans le cadre de l'évaluation des conditions souterraines et des travaux de préparation du site. Le travail sur le site lié aux recommandations contenues dans le présent rapport ne doit être effectué qu'en présence d'un ingénieur géotechnique qualifié; Stantec Experts-conseils Ltée ne peut être tenue responsable du travail réalisé sur le site en son absence.

ANNEXE B
Plan de localisation des forages et des
résultats analytiques

\\ca0182-pptfss01\shared_projects\158100609\4_Geotechnique\dessins\6.Figures&Logs\158100609.300-01.dwg PRINTED: Nov 12, 2024



Stantec Experts-conseils ltée
100, boulevard Alexis-Nihon, bureau 110
Saint-Laurent, Québec H4M 2N6
Tél: 514.739.0706
Fax: 514.739.8499
www.stantec.com

Note importante :
Toutes les dimensions montrées sur cette figure sont approximatives et l'utilisateur est responsable de les vérifier. Stantec devrait être avisée de toute erreur ou omission dans les plus brefs délais.

Légende :

-  **F24-xx** Forage 2024 (Stantec)
-  Bâtiment (approx.)
-  Bordure/Trottoir (approx.)
-  Lot (approx.)
-  Route (approx.)
-  Eau (approx.)

Coordonnées géodésiques (SCOPQ NAD83 MTM-7)

N° sondage	Est (m)	Nord (m)	Élévation (m)
F24-01	248413,8	5202755,1	298,12
F24-02	248428,0	5202744,5	298,22

Échelle graphique :



Échelle : 1/500

Source :
© Dessin sur image tirée de Forêt Ouverte 2024
© Image tirée de Google Earth 2024

Client :

Municipalité de Lac-Beauport

Projet :
Étude d'évaluation de la stabilité du barrage du lac
Tourbillon No 24-719

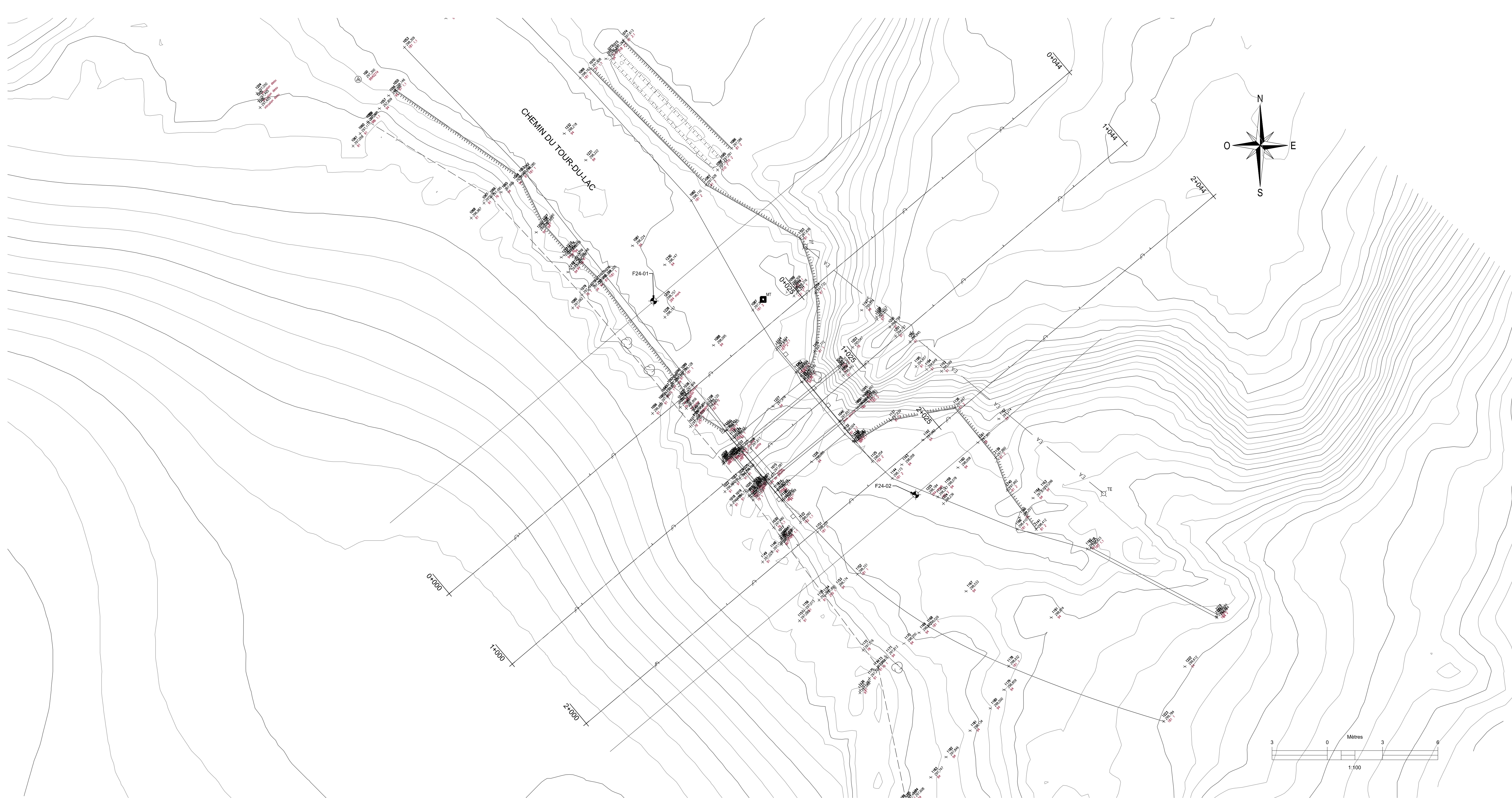
Site :
29 à 33, chemin du Barrage Lac Tourbillon à
Lac Beauport, Québec

Titre de la figure :

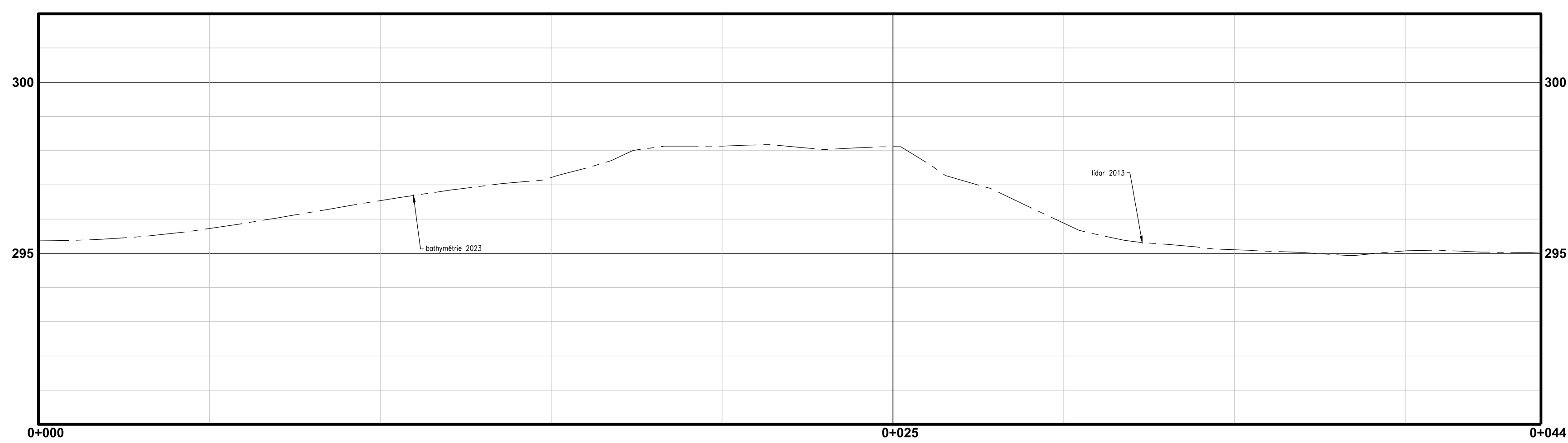
Localisation des forages

No. de projet : 158100609.300	Dessiné par : S. Veillette, tech.
Date : 2024-10-24	Vérifié par : P. Pirnia, ing., Ph.D.
Figure n° : 01	Page : 1 de 1

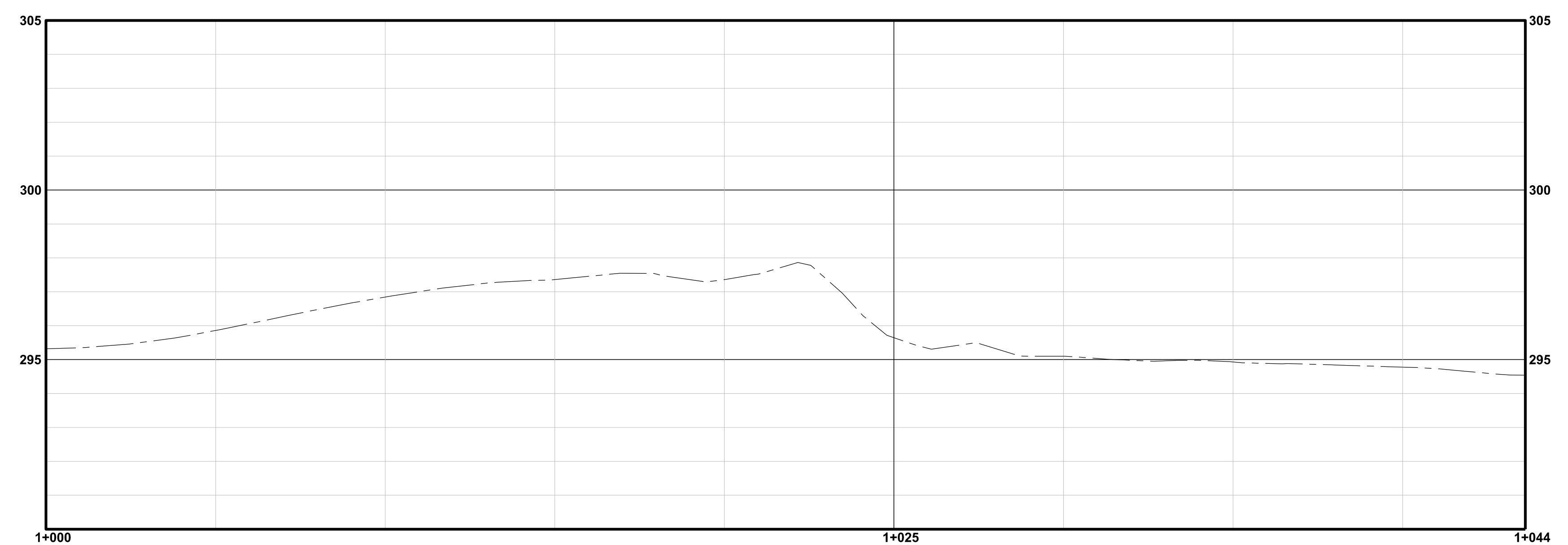




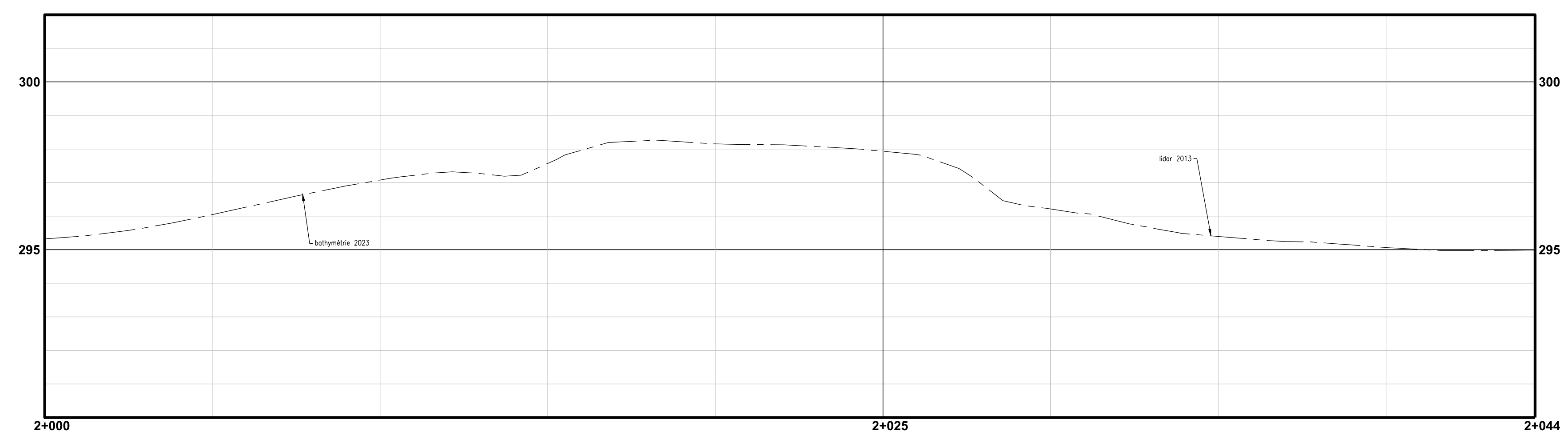
A-A



B-B



C-C



ANNEXE C

Rapports de forage

Projet : Étude d'évaluation de la stabilité du barrage du lac Tourbillon No 24-719	Coordonnée : X : 248413,8 Y : 5202755,1 Type de sondage : Tarière et tubage Équipement : Géoprobe Type d'échantillonneur : B, H, N Type de carottier : NQ	Système Géo.: MTM-NAD83 Zone: 7 Figure : 01	Sondage : F24-01 Page : 1 de 1 Date de début : 2024-10-02 Inspecteur : M. Dali, tech. Profondeur : 8,64 m Élévation : 298,12 m
---	---	--	---

TYPE D'ÉCHANTILLON		TERMINOLOGIE QUALITATIVE		TERMINOLOGIE QUANTITATIVE		SYMBOLES		NAPPE PHRÉATIQUE 		
CF	Cuillère fendue	Argile	< 0,002 mm	Traces	< 10 %	N	Indice de pénétration standard (ASTM D 1586)		Date	Profondeur
CFC	Échantillonnage continu	Silt	0,002 - 0,08 mm	Un peu	10 - 20 %			Lecture 1	2024-10-21	1,48 m
CR	Carottier à diamants	Sable	0,08 - 5 mm	Adjectif (...eux)	20 - 35 %	Nc	Indice de pénétration au cône (BNQ 2501-145)	Lecture 2	2024-11-25	1,60 m
TA/TR	Tarière	Gravier	5 - 80 mm	et (ex: et gravier)	> 35 %			Remarques : Mesure par tube		
TM	Tube à parois minces	Cailloux	80 - 200 mm	mot principal	Fraction dominante	RQD	Indice de la qualité du roc (%)			
TS	Tube shelby	Blocs	> 200 mm							
MA	Échantillon manuel									

ÉTAT DE L'ÉCHANTILLON	CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES SOLS	INDICE DE QUALITÉ DU ROC	ESPACEMENT DES DISCONTINUITÉS
Remanié Intact (tube à parois minces) Perdu Carotté (forage au diamant)	COMPACTITÉ Très lâche Lâche Compact Dense Très dense INDICE "N" 0 - 4 4 - 10 10 - 30 30 - 50 > 50 CONSISTANCE Très molle Molle Ferme Raide Très raide Dure Cu OU Su (kPa) < 12 12 - 25 25 - 50 50 - 100 100 - 200 > 200	QUALIFICATIF Très mauvaise Mauvaise Moyenne Bonne Excellente RQD < 25 % 25 - 50 % 50 - 75 % 75 - 90 % 90 - 100 %	Très serré < 20 mm Serré 20 - 60 mm Rapproché 60 - 200 mm Moyennement espacé 200 - 600 mm Espacé 600 - 2000 mm Très espacé 2000 - 6000 mm Éloigné > 6000 mm

STRATIGRAPHIE										ÉCHANTILLONS					ESSAIS			REMARQUES
PROFONDEUR (m)	PROFONDEUR (pi)	ÉLÉVATION (m)	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION DES SOLS ET DU ROC	SYMBOLE	ÉTAT	TYPE N°	SOUS - ÉCHANTI.	CALIBRE	RECUPÉRATION (%)	N - RQD	Essai de pénétration standard	COUPS/150mm	NIVEAU D'EAU / VENUE D'EAU	AG : analyse granulo. S : sédimentométrie C : consolidation oedo. w : teneur en eau w _L : limite liquide w _p : limite plastique d _r : densité relative k : perméabilité Fc : compression simple MO : matière organique AC : analyses chimiques TAS : taux d'agressivité sols	× : N (pen. standard) ▽ : Nc (pen. dyn.) ■ : Cu intact □ : Cu remanié ◆ : Su intact ◇ : Su remanié	W _p W _L W _I 30 60 90 120	
		298,12	0,00	Enrobé bitumineux.														
		298,04	0,08	Fondation granulaire :			CF-01	A	H	86		15-15-12-5						
		297,87	0,25	Sable et gravier, traces de silt, gris, humide.			CF-02	B	N	71		7-10-8-9						
1				- Pierre concassée de calibre apparent 0-20 mm.														
		296,70	1,42	Remblai granulaire :			CF-03	A	B	50	12	6-7-5-5				AG, S		
5				Gravier et sable, un peu de silt, traces d'argile, brun à brun-verdâtre, humide.				B										
2				Dépôt naturel de till :			CF-04		B	58	2	1-1-1-1				AG, S		
				Gravier sableux et silteux à sable silteux, un peu de gravier, traces d'argile, brun, saturé, très lâche à compact.			CF-05		B	50	11	7-1-10-3						
3				- Présence de matières organiques en surface du dépôt.			CF-06		B	38	6	1-3-3-2						
							CF-07		B	83	3	1-0-3-5						
4							CF-08		B	54	4	0-2-2-1						
15							CF-09		B	63	11	3-5-6-13						
5							CF-10		B	50	27	5-10-17-28						
							CF-11		B	100	R	50 / 3 cm						
6				- Devenant très dense.			CF-12		B	78	R	7-50 / 8 cm						
7																		
		290,80	7,32	Socle rocheux :			CR-13		NQ	83	15							
8				Shale, gris-rougeâtre, de très mauvaise qualité.														
		289,48	8,64	FIN DU FORAGE														

Remarques générales:	Vérifié par : P. Pirmia, ing., Ph. D. Date : 2025-02-20
----------------------	--

Projet : Étude d'évaluation de la stabilité du barrage du lac Tourbillon No 24-719	Coordonnée : X : 248428,0 Y : 5202744,5 Type de sondage : Tarière et tubage Équipement : Géoprobe Type d'échantillonneur : B, H, N Type de carottier : NQ	Système Géo.: MTM-NAD83 Zone: 7 Figure : 01	Sondage : F24-02 Page : 1 de 1 Date de début : 2024-10-02 Inspecteur : M. Dali, tech. Profondeur : 7,70 m Élévation : 298,22 m
---	---	--	--

TYPE D'ÉCHANTILLON		TERMINOLOGIE QUALITATIVE		TERMINOLOGIE QUANTITATIVE		SYMBOLES		NAPPE PHRÉATIQUE 		
CF	Cuillère fendue	Argile	< 0,002 mm	Traces	< 10 %	N	Indice de pénétration standard (ASTM D 1586)		Date	Profondeur
CFC	Échantillonnage continu	Silt	0,002 - 0,08 mm	Un peu	10 - 20 %			Lecture 1	2024-10-21	2,32 m
CR	Carottier à diamants	Sable	0,08 - 5 mm	Adjectif (...eux)	20 - 35 %	Nc	Indice de pénétration au cône (BNQ 2501-145)	Lecture 2	2024-11-25	2,39 m
TA/TR	Tarière	Gravier	5 - 80 mm	et (ex: et gravier)	> 35 %			Remarques : Mesure par tube		
TM	Tube à parois minces	Cailloux	80 - 200 mm	mot principal	Fraction dominante	RQD	Indice de la qualité du roc (%)			
TS	Tube shelby	Blocs	> 200 mm							
MA	Échantillon manuel									

ÉTAT DE L'ÉCHANTILLON	CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES DES SOLS	INDICE DE QUALITÉ DU ROC	ESPACEMENT DES DISCONTINUITÉS
Remanié Intact (tube à parois minces) Perdu Carotté (forage au diamant)	COMPACTITÉ Très lâche Lâche Compact Dense Très dense INDICE "N" 0 - 4 4 - 10 10 - 30 30 - 50 > 50 CONSISTANCE Très molle Molle Ferme Raide Dure	QUALIFICATIF Très mauvaise Mauvaise Moyenne Bonne Excellente RQD < 25 % 25 - 50 % 50 - 75 % 75 - 90 % 90 - 100 %	Très serré < 20 mm Serré 20 - 60 mm Rapproché 60 - 200 mm Moyennement espacé 200 - 600 mm Espacé 600 - 2000 mm Très espacé 2000 - 6000 mm Éloigné > 6000 mm

STRATIGRAPHIE					ÉCHANTILLONS							ESSAIS			REMARQUES		
PROFONDEUR (m)	PROFONDEUR (pi)	ÉLÉVATION (m)	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION DES SOLS ET DU ROC	SYMBOLE	ÉTAT	TYPE N°	SOUS - ÉCHANTI.	CALIBRE	RECUPÉRATION (%)	N - RQD	Essai de pénétration standard COUPS/150mm	NIVEAU D'EAU / VENUE D'EAU	AG : analyse granul. S : sédimentométrie C : consolidation oedo. w : teneur en eau w _L : limite liquide w _p : densité relative k : perméabilité Fc : compression simple MO : matière organique AC : analyses chimiques TAS : taux d'agressivité sols		× : N (pen. standard) ▽ : Nc (pen. dyn.) ■ : Cu intact □ : Cu remanié ◆ : Su intact ◇ : Su remanié	W _p W W _L 30 60 90 120
		298,22															
		0,00	298,14	Enrobé bitumineux.													
		0,08	297,61	Fondation granulaire : Sable et gravier, traces de silt, brun, humide.													
1		0,61		- Pierre concassée de calibre apparent 0-20 mm.													
		296,39	1,83	Remblai granulaire : Sable graveleux à un peu de gravier, un peu à traces de silt, brun, humide.													
2				Dépôt naturel de till : Gravier sableux et silteux à sable silteux, un peu de gravier, traces d'argile, brun, saturé, très lâche à compact.													
3				- Présence de matières organiques en surface du dépôt.													
4																	
5				- Devenant très dense.													
6		292,12	6,10	Socle rocheux : Shale, gris-rougeâtre, de très mauvaise qualité.													
7																	
8		290,52	7,70	FIN DU FORAGE													

Remarques générales:	Vérifié par : P. Pirmia, ing., Ph. D. Date : 2025-02-20
----------------------	--

ANNEXE D

Rapports d'essais de laboratoire

Client : Municipalité de Lac-Beauport

Échantillonné par : Mohamed Dali

Projet : Étude d'évaluation de la stabilité du barrage du lac

Date du prélèvement : 2 octobre, 2024

Tourbillon No 24-719

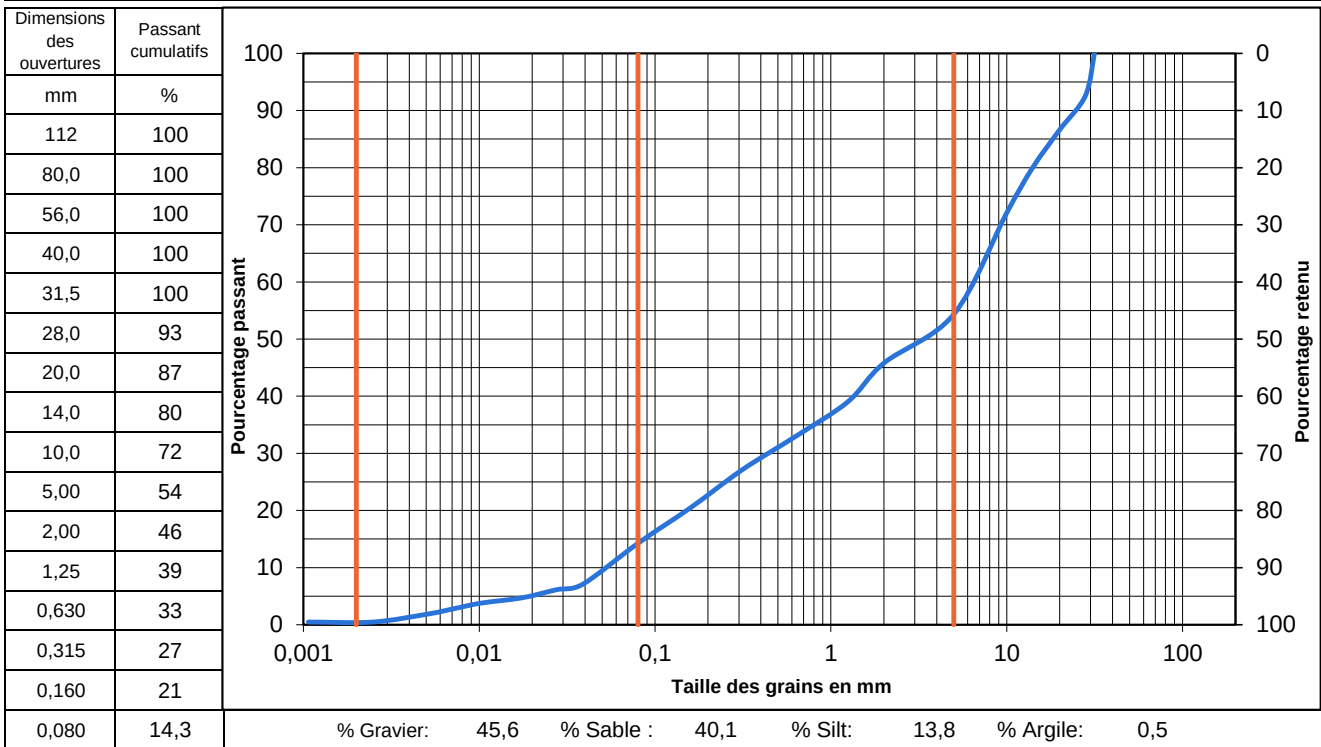
No de projet : 158100609

Type de matériaux : Gravier et sable, un peu de silt (GM)

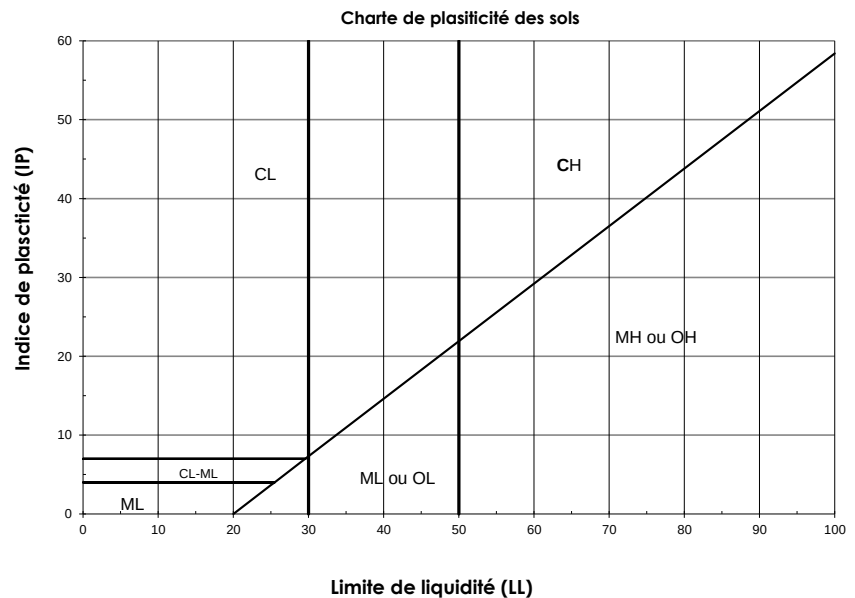
No d'échantillon : F24-01 CF-03A

Profondeur :	1,42 - 1,83m
--------------	--------------

Analyse granulométrique (BNQ 2501-025)



Autres essais

[illegible]

Remarques :

Préparé par :

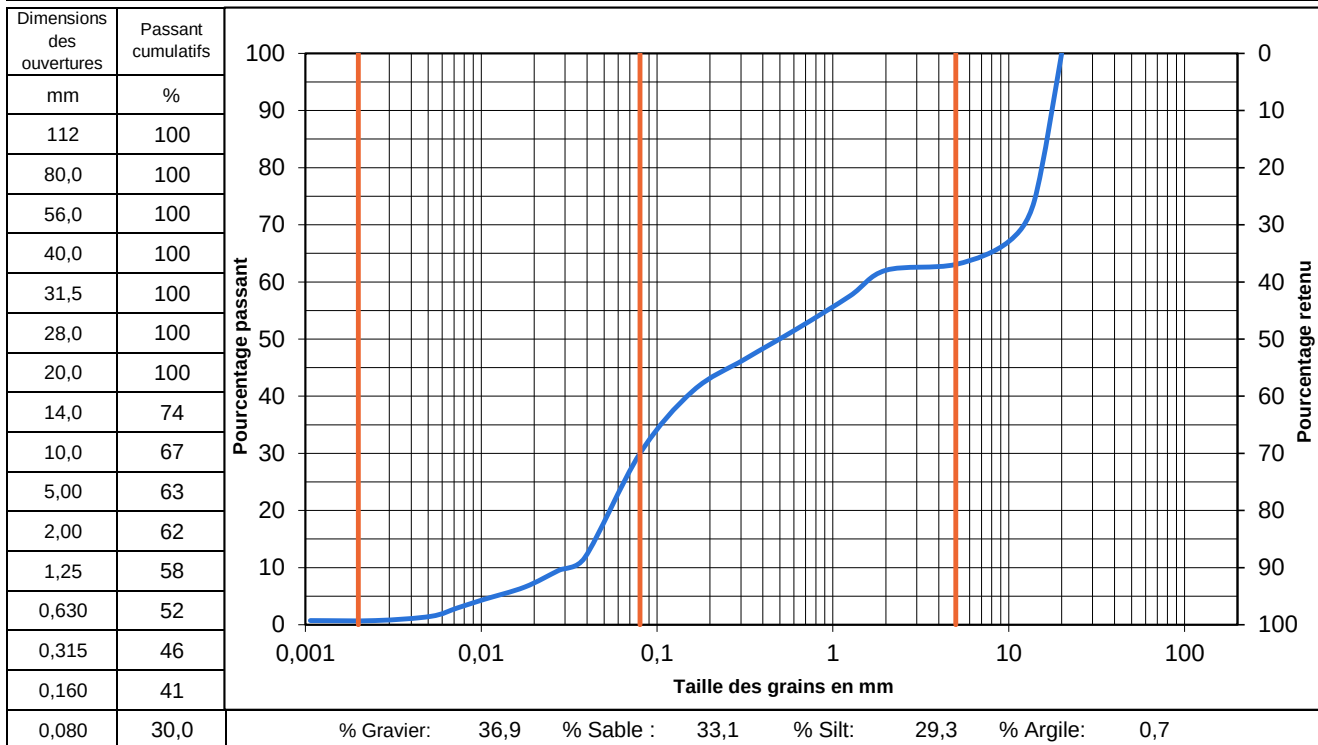
Benoit Cyr, géo.

Date : 22 octobre, 2024

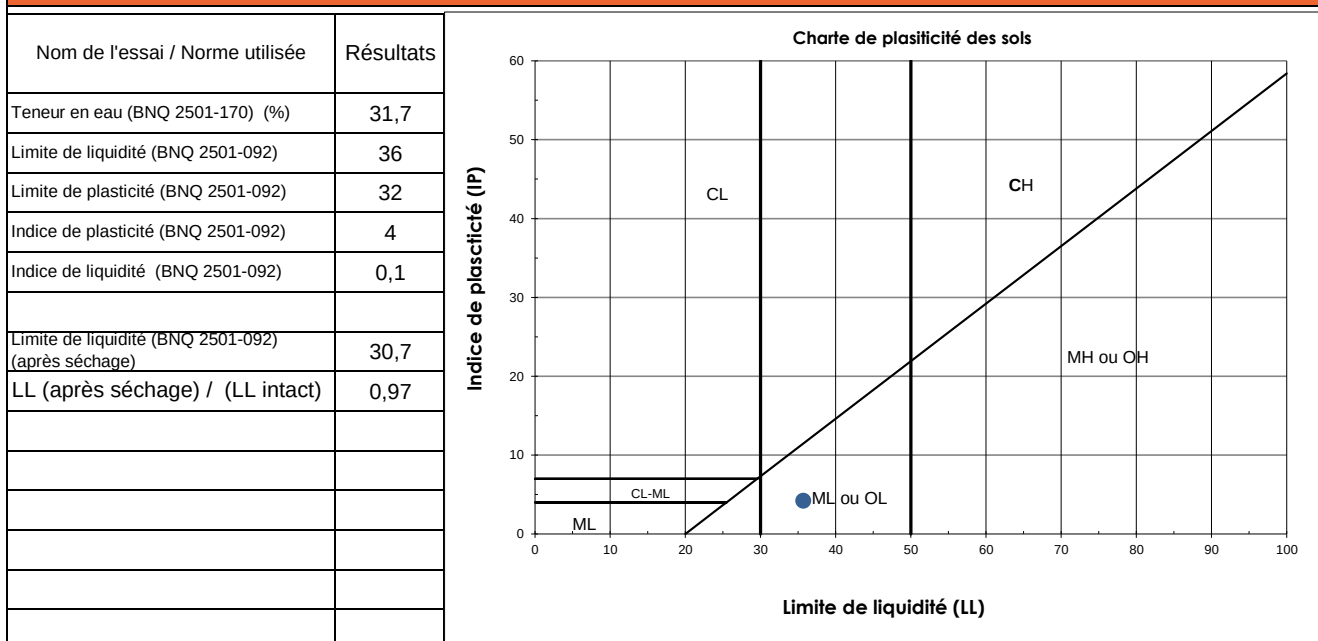


Client :	Municipalité de Lac-Beauport	Échantillonné par :	Mohamed Dali
Projet :	Étude d'évaluation de la stabilité du barrage du lac Tourbillon No 24-719	Date du prélèvement :	2 octobre, 2024
No de projet :	158100609	Type de matériaux :	Gravier sableux, silteux (GM)
No d'échantillon :	F24-01 CF-04		
Profondeur :	1,83 - 2,44m		

Analyse granulométrique (BNQ 2501-025)



Autres essais



Remarques :

Préparé par :

Benoit Cyr, géo.

Bj

Date : 26 février, 2025

Client : Municipalité de Lac-Beauport

Échantillonné par : Mohamed Dali

Projet : Étude d'évaluation de la stabilité du barrage du lac

Date du prélèvement : 2 octobre, 2024

Tourbillon No 24-719

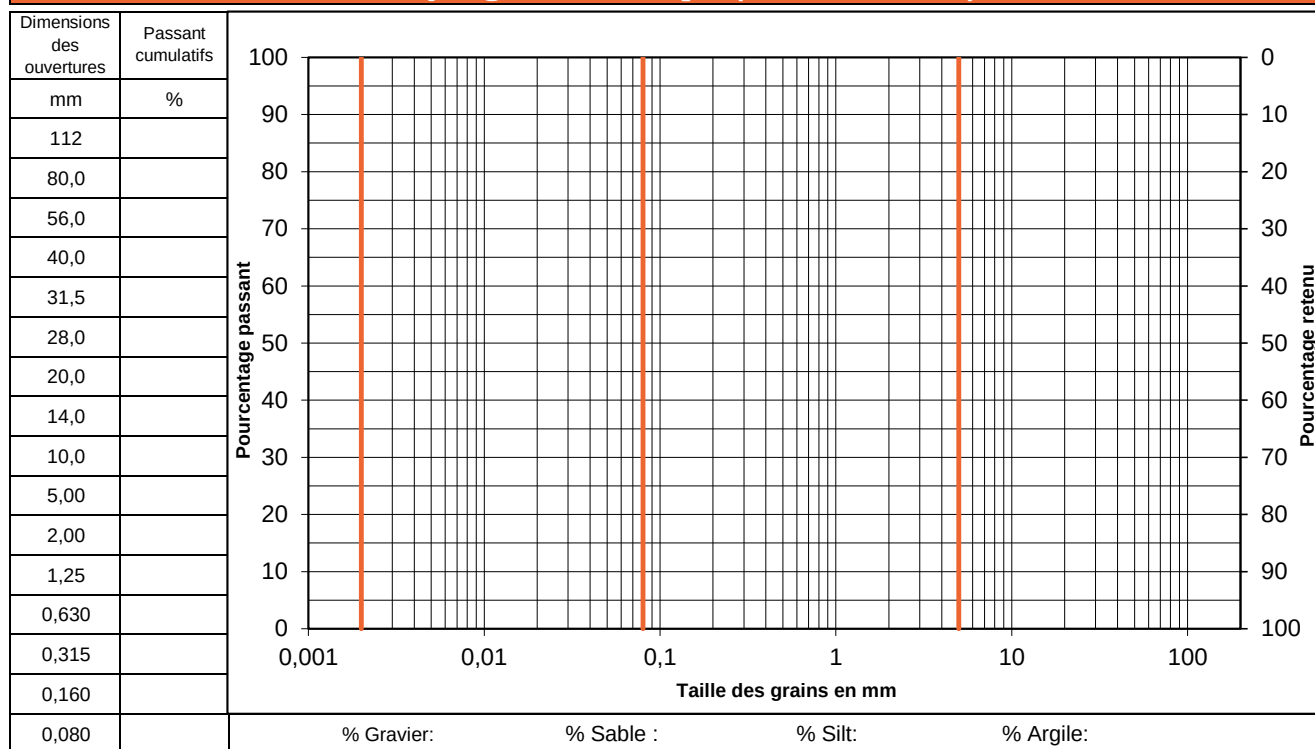
No de projet : 158100609

Type de matériaux : Argile de moyenne plasticité
(CL)

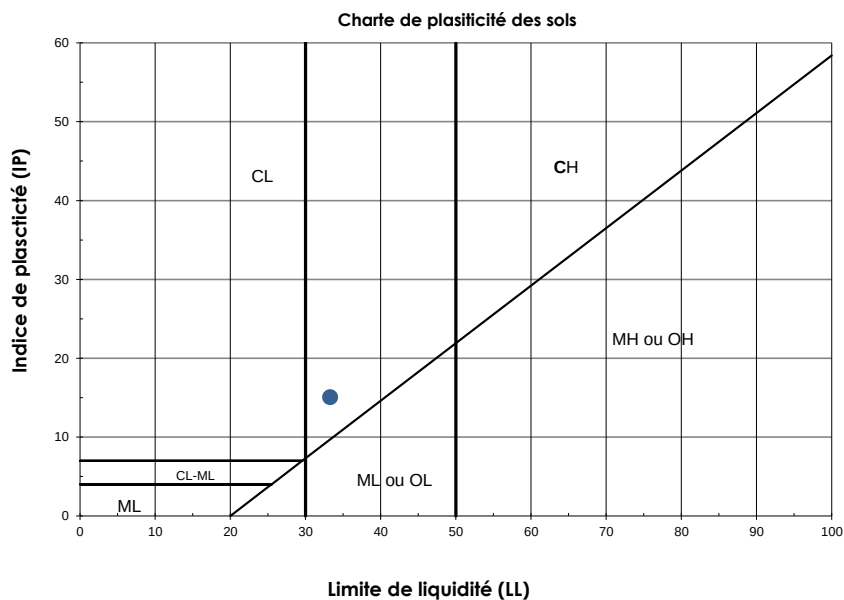
No d'échantillon : F24-01 CF-07B

Profondeur :	3,91 - 4,27m
--------------	--------------

Analyse granulométrique (BNQ 2501-025)



Autres essais

[illegible]

Remarques :

Préparé par :

Benoit Cyr, géo.

Date : 22 octobre, 2024

Client : Municipalité de Lac-Beauport

Échantillonné par : Mohamed Dali

Projet : Étude d'évaluation de la stabilité du barrage du lac

Date du prélèvement : 2 octobre, 2024

Tourbillon No 24-719

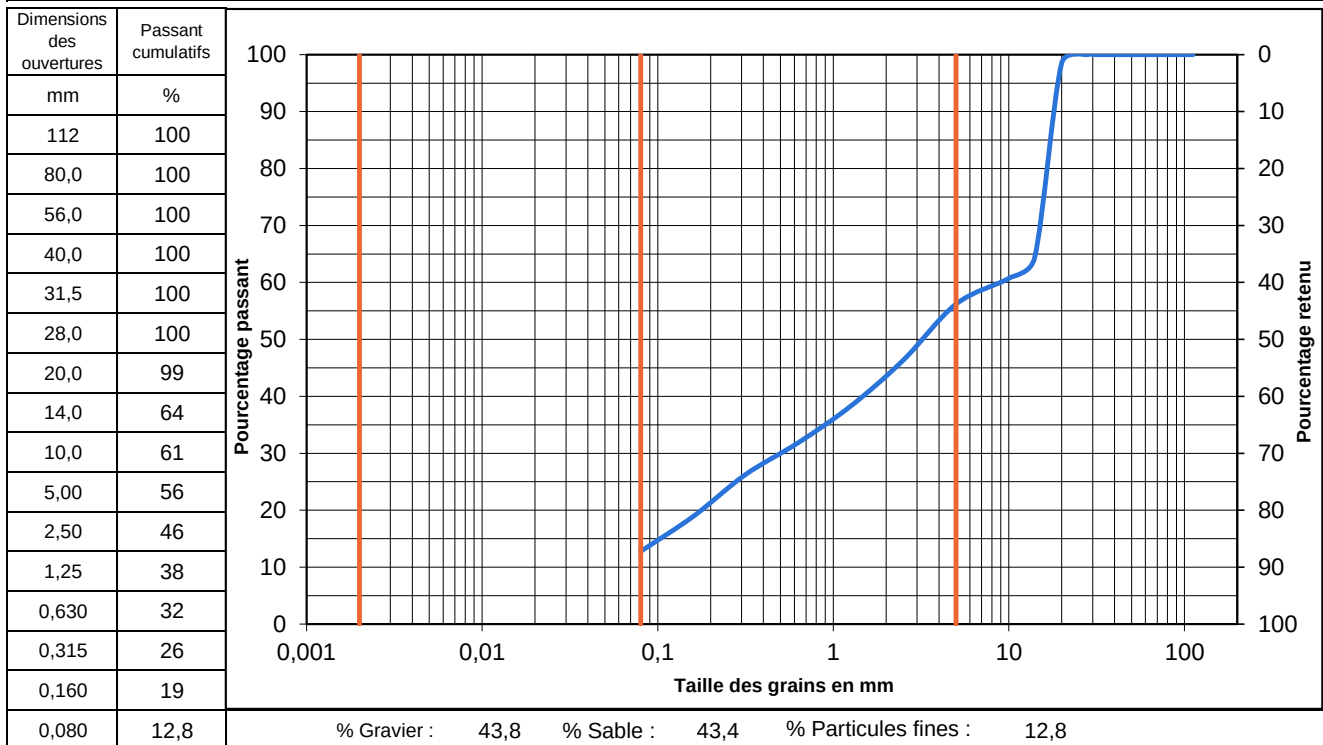
No de projet : 158100609

Type de matériaux : Gravier et sable, un peu de particules fines (GM)

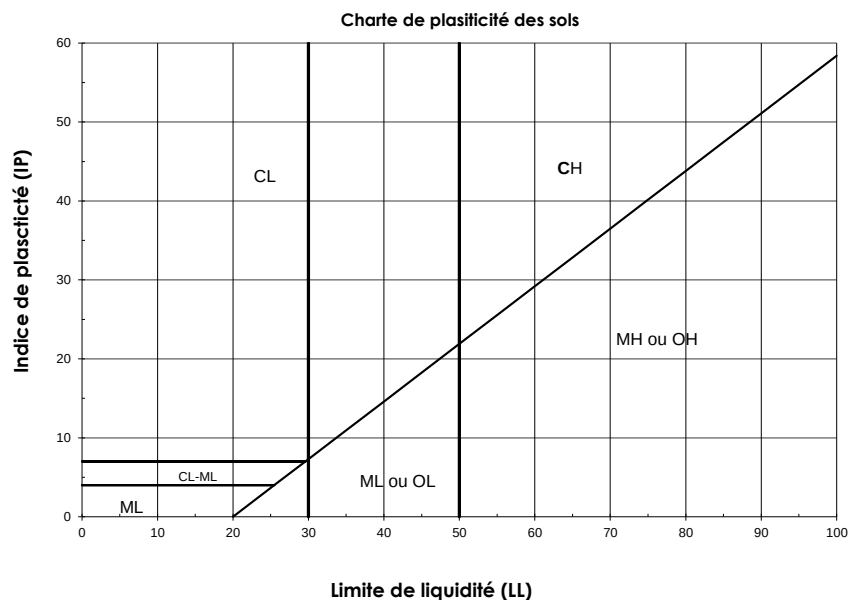
No d'échantillon :	F24-02 CF-08
--------------------	--------------

Profondeur :	4,26 - 4,87m
--------------	--------------

Analyse granulométrique (BNQ 2501-025)



Autres essais

[illegible]

Remarques :

Préparé par : Benoit Cyr, géo.

Date : 22 octobre, 2024

Client : Municipalité de Lac-Beauport

Échantillonné par : Mohamed Dali

Projet : Étude d'évaluation de la stabilité du barrage du lac

Date du prélèvement : 2 octobre, 2024

Tourbillon No 24-719

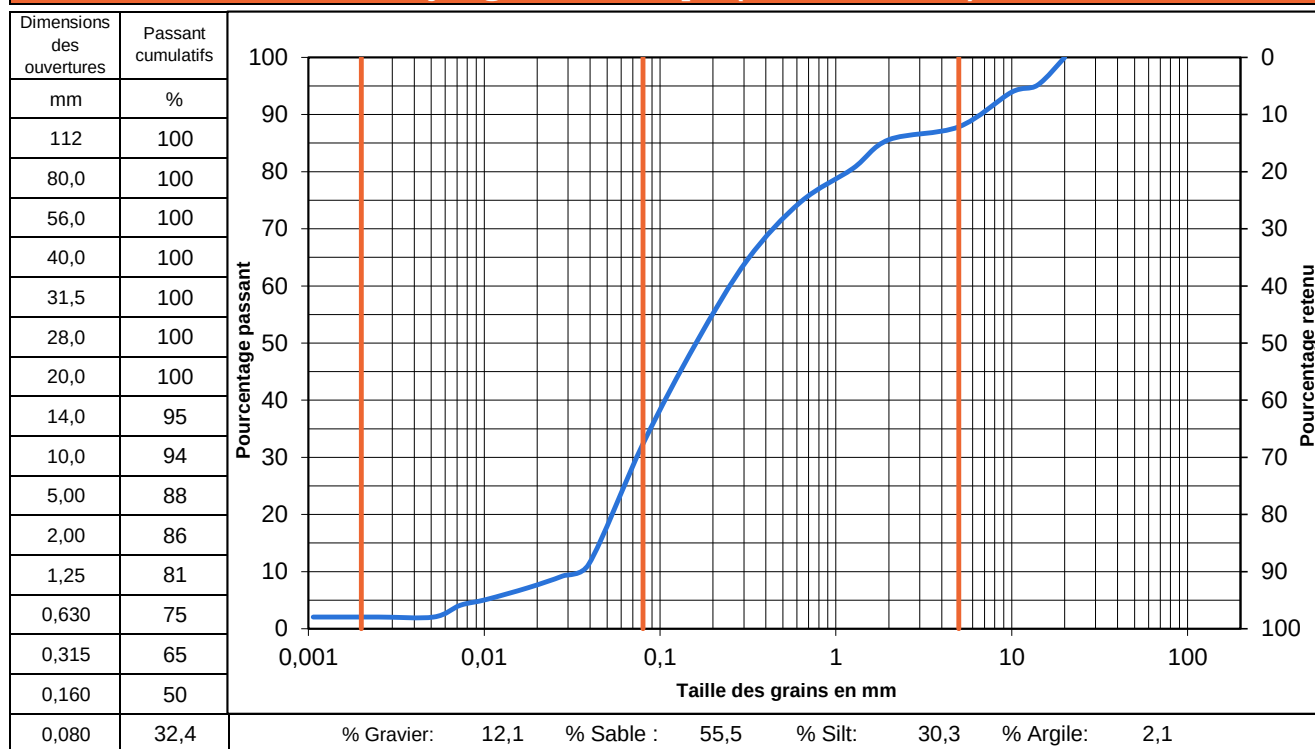
No de projet : 158100609

Type de matériaux : Sable silteux, un peu de gravier, traces d'argile (SM)

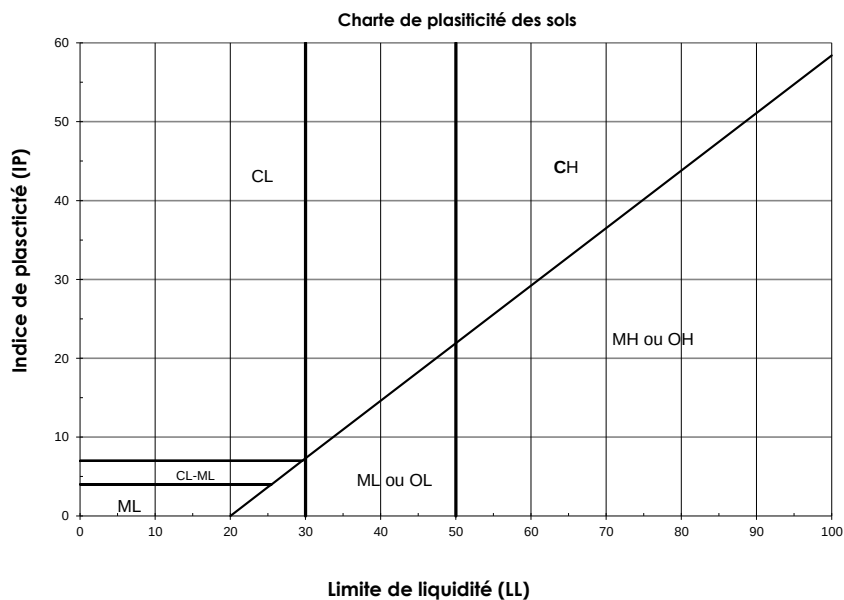
No d'échantillon :	F24-02 CF-04
--------------------	--------------

Profondeur :	1,83 - 2,44m
--------------	--------------

Analyse granulométrique (BNQ 2501-025)



Autres essais

[illegible]

Remarques :

Préparé par :

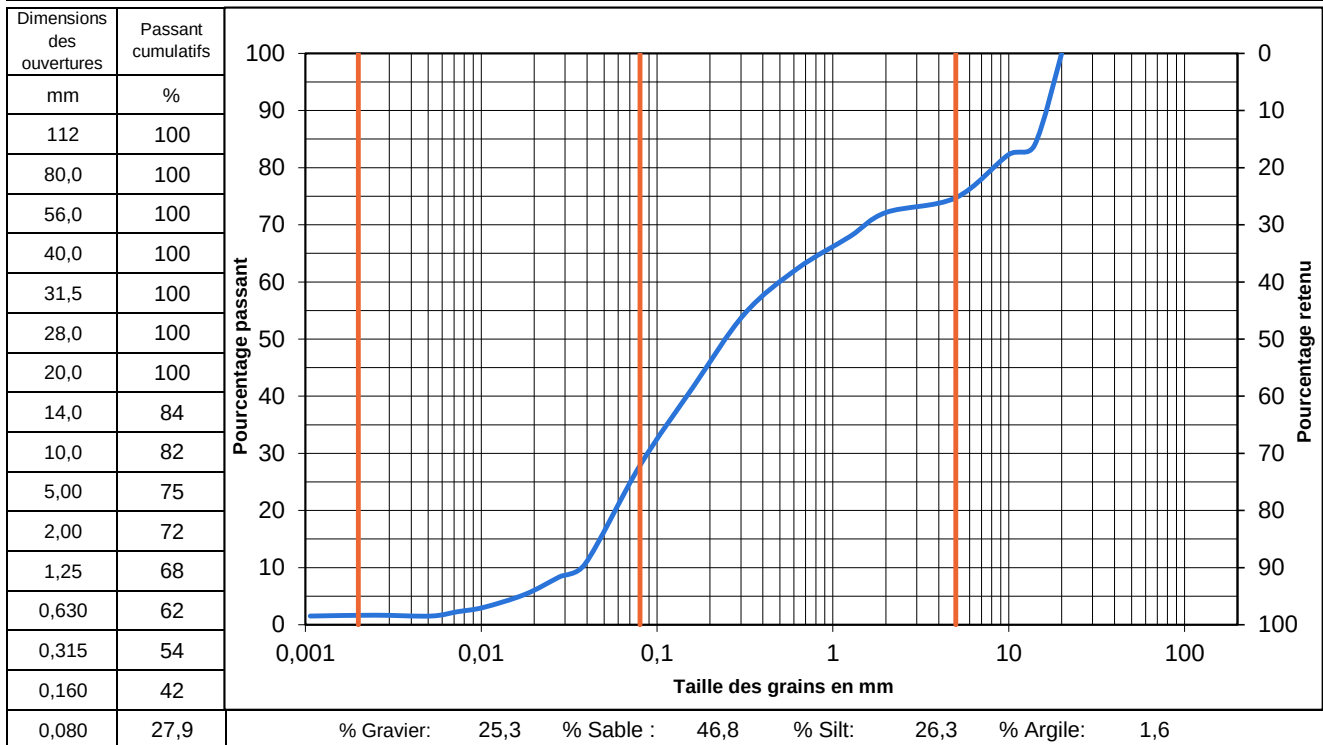
Benoit Cyr, géo.

Date : 22 octobre, 2024



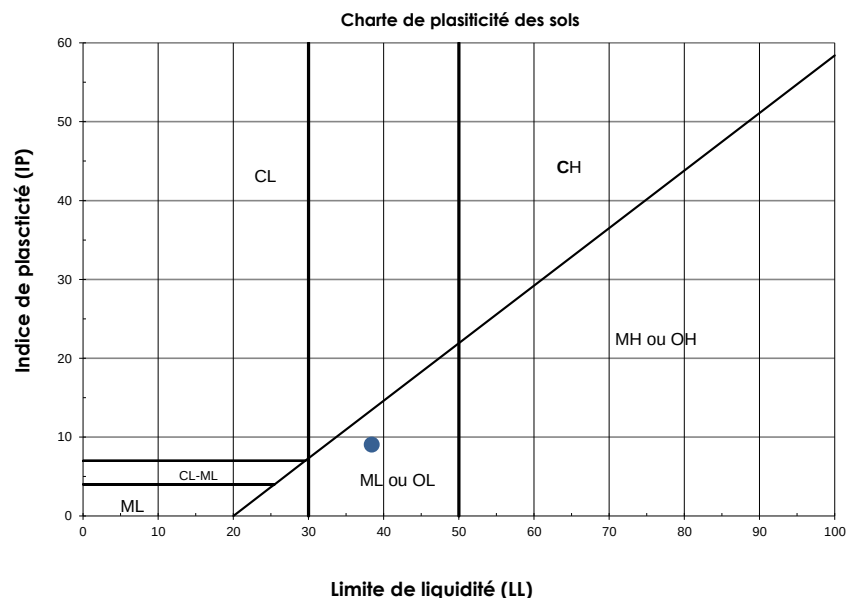
Client :	Municipalité de Lac-Beauport	Échantillonné par :	Mohamed Dali
Projet :	Étude d'évaluation de la stabilité du barrage du lac Tourbillon No 24-719	Date du prélèvement :	2 octobre, 2024
No de projet :	158100609	Type de matériaux :	Sable silteux, graveleux, traces d'argile (SM)
No d'échantillon :	F24-02 CF-05		
Profondeur :	2,44 - 3,05m		

Analyse granulométrique (BNQ 2501-025)



Autres essais

Nom de l'essai / Norme utilisée	Résultats
Teneur en eau (BNQ 2501-170) (%)	33,4
Limite de liquidité (BNQ 2501-092)	38
Limite de plasticité (BNQ 2501-092)	29
Indice de plasticité (BNQ 2501-092)	9
Indice de liquidité (BNQ 2501-092)	0,5



Remarques :

Préparé par :

Benoit Cyr, géo.

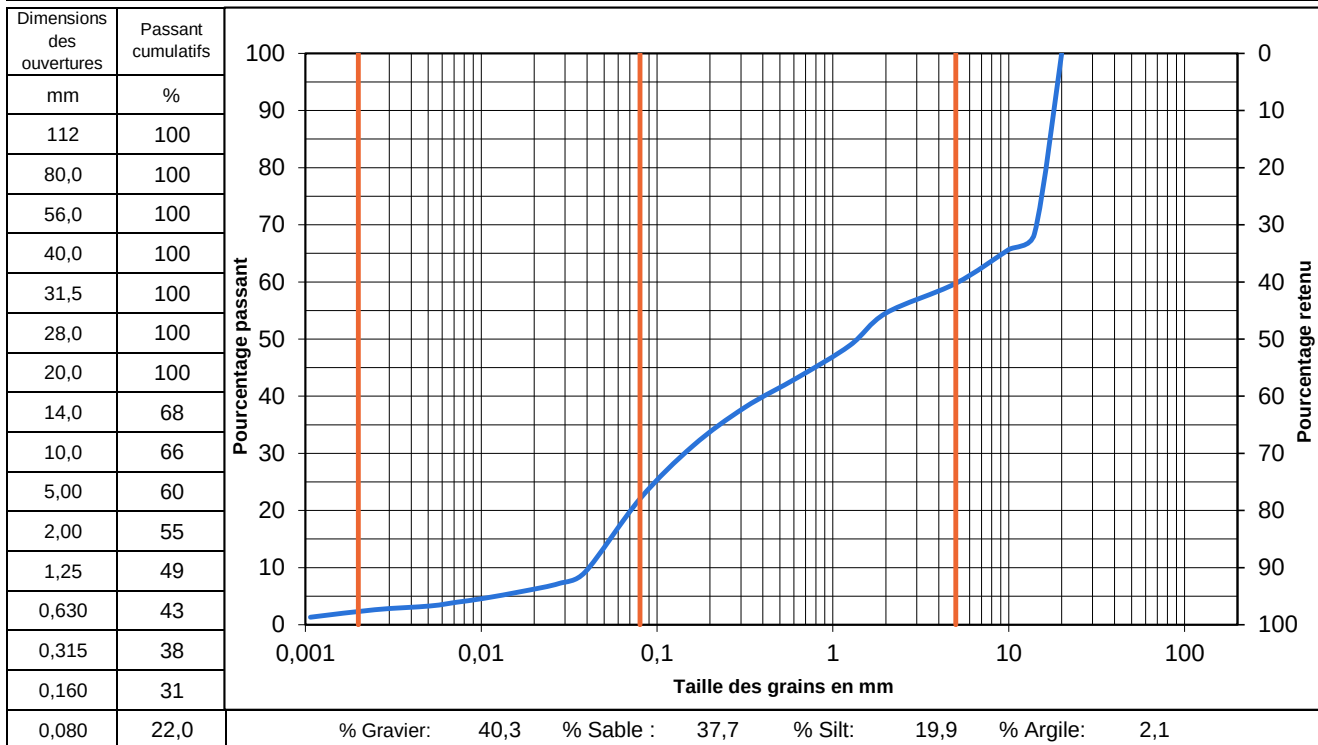
BJ

Date : 22 octobre, 2024

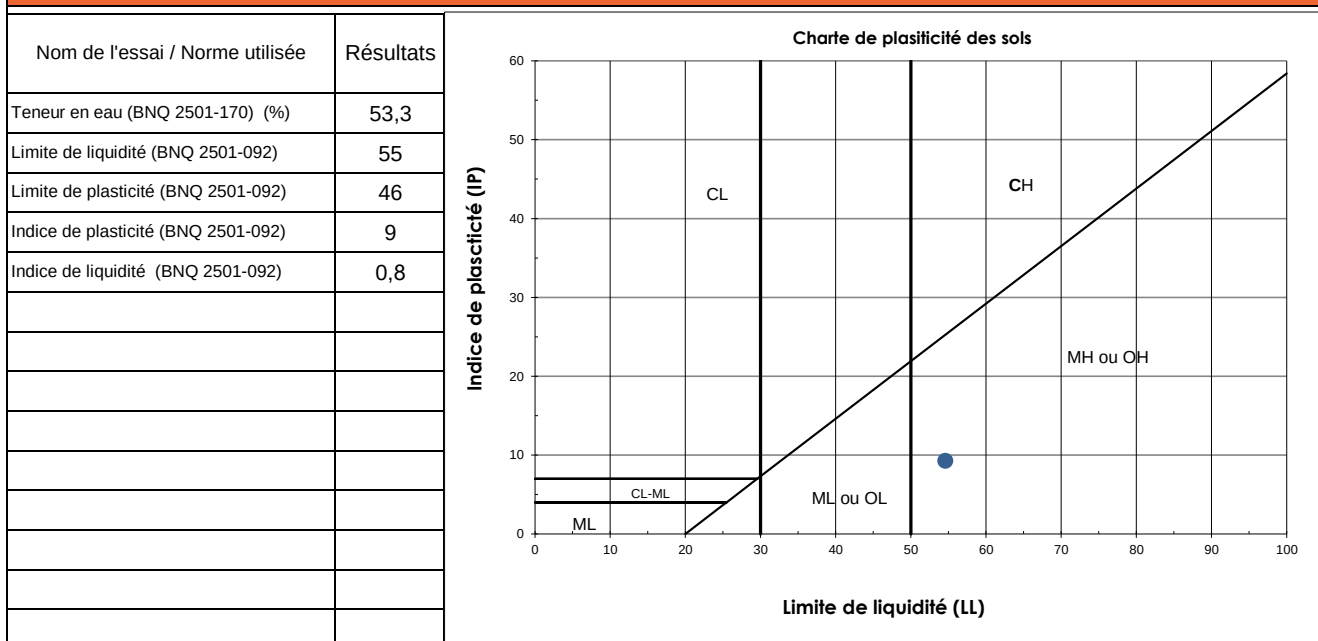


Client :	Municipalité de Lac-Beauport	Échantillonné par :	Mohamed Dali
Projet :	Étude d'évaluation de la stabilité du barrage du lac Tourbillon No 24-719	Date du prélèvement :	2 octobre, 2024
No de projet :	158100609	Type de matériaux :	Gravier et sable, un peu de silt, traces d'argile (GM)
No d'échantillon :	F24-02 CF-07		
Profondeur :	3,66 - 4,26m		

Analyse granulométrique (BNQ 2501-025)



Autres essais



Remarques :

Préparé par :

Benoit Cyr, géo.

BJ

Date : 22 octobre, 2024

**Stantec**2273 Rue Michelin
Laval QC, H7L 5B8**Détermination de la teneur en eau par séchage****LC 21-201****BNQ 2501-170**Projet: Étude d'évaluation de la stabilité du barrage du
No de projet: 158100609Date de l'essai: 2024-10-15
Réalisé par: N. PassoÉquipements utilisés : Balance : ☒ LAV-012 ☐ LAV-013

Teneur en eau							
Forage / tranchée No	F24-01	F24-01	F24-01	F24-01	F24-02	F24-02	F24-02
Échantillon	CF-03A	CF-04	CF-08	CF-09	CF-04	CF-05	CF-07
Profondeur (m)	1.42-1.83	1.83-2.44	4.27-4.87	4.87-5.47	1.83-2.44	2.44-3.05	2.44-3.05
Teneur en eau (%)	8,9	31,7	21,5	14,7	39,6	33,4	53,3
Remarques							
Forage / tranchée No	F24-02						
Échantillon	CF-08						
Profondeur (m)	4.26-4.87						
Teneur en eau (%)	43,2						
Remarques							

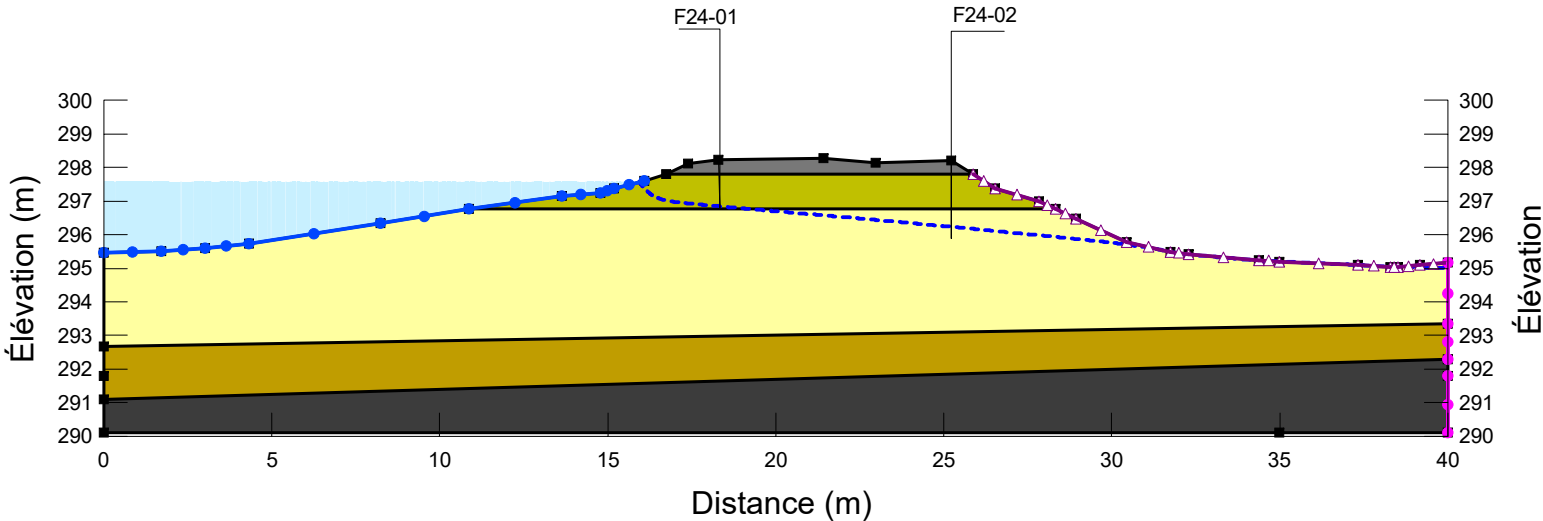
Révisé par : Benoit Cyr, géo.Date: 24-10-22

V:\01216\Laboratoire Laval\Résultats des Essais\158100609\158100609-F24-01-CF04.xlsx

ANNEXE E
Résultats des analyses de stabilité de talus

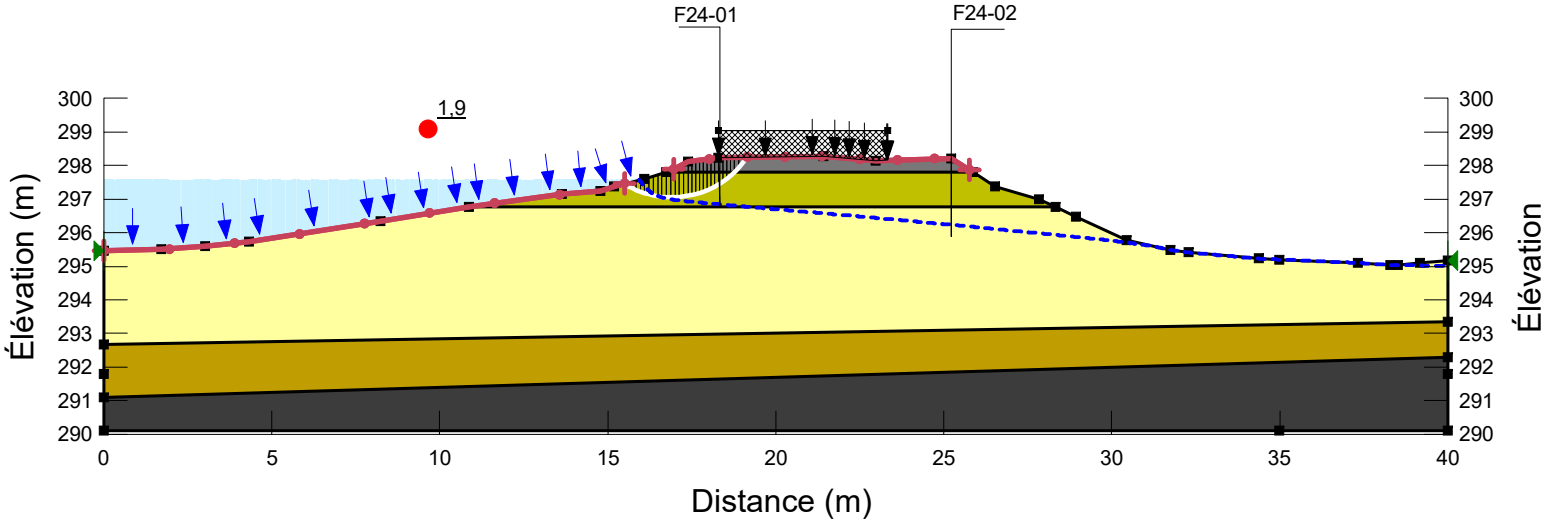
Couleur	Nom	Modèle de matériau hydraulique	Fonction de teneur en eau volumétrique	Fonction de K	Rapport K_y'/K_x'	Kx sat. (m/s)
	Fondation	Saturé / non saturé	Fondation	Fondation	1	
	Remblai digue	Saturé / non saturé	Remblai digue	Remblai digue	1	
	Roc	Saturé uniquement			1	1e-09
	Till (compact à très dense)	Saturé / non saturé	Till	Till	1	
	Till (très lâche à lâche)	Saturé / non saturé	Till	Till	1	

Analyse des écoulements
Coupe A-A
Niveau d'eau Crue 100 ans



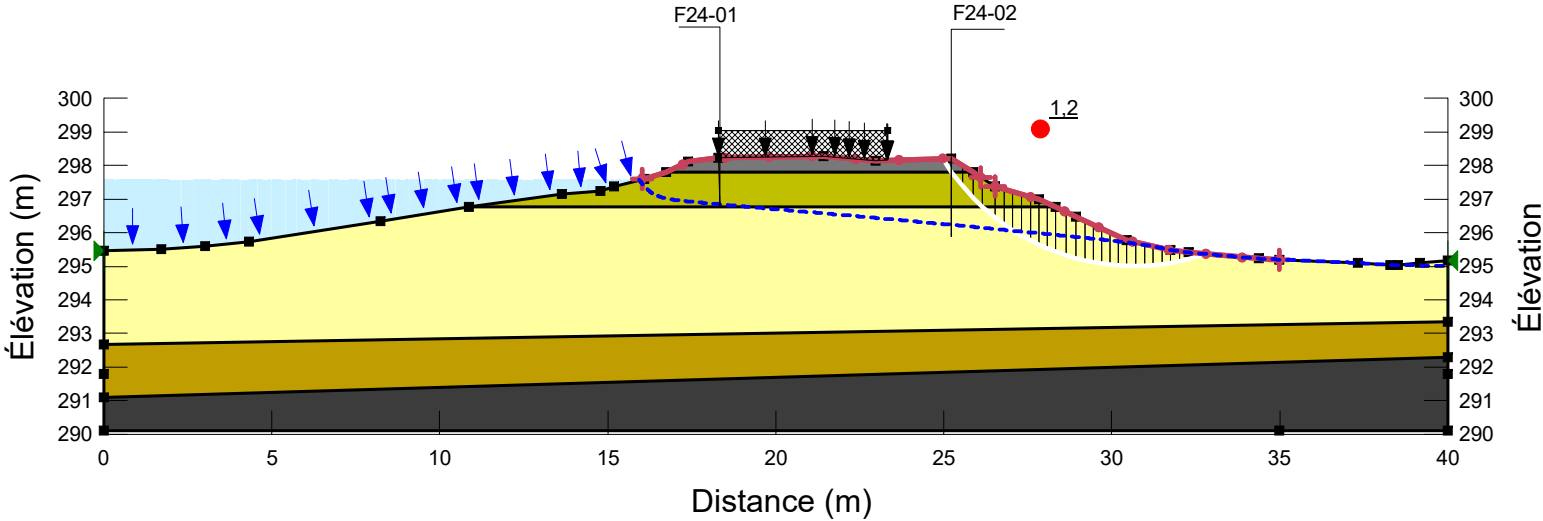
Couleur	Nom	Modèle de matériau de stabilité de pente	Poids volumique (kN/m³)	Cohésion effective (kPa)	Angle de frottement effectif (°)	Phi-B (°)
	Fondation	Mohr-Coulomb	21	0	34	0
	Remblai digue	Mohr-Coulomb	19	0	29	0
	Roc	Haute résistance	25			
	Till (compact à très dense)	Mohr-Coulomb	19	0	33	0
	Till (très lâche à lâche)	Mohr-Coulomb	19	0	28	0

Analyse statique
Pente amont
Coupe A-A
Niveau d'eau Crue 100 ans



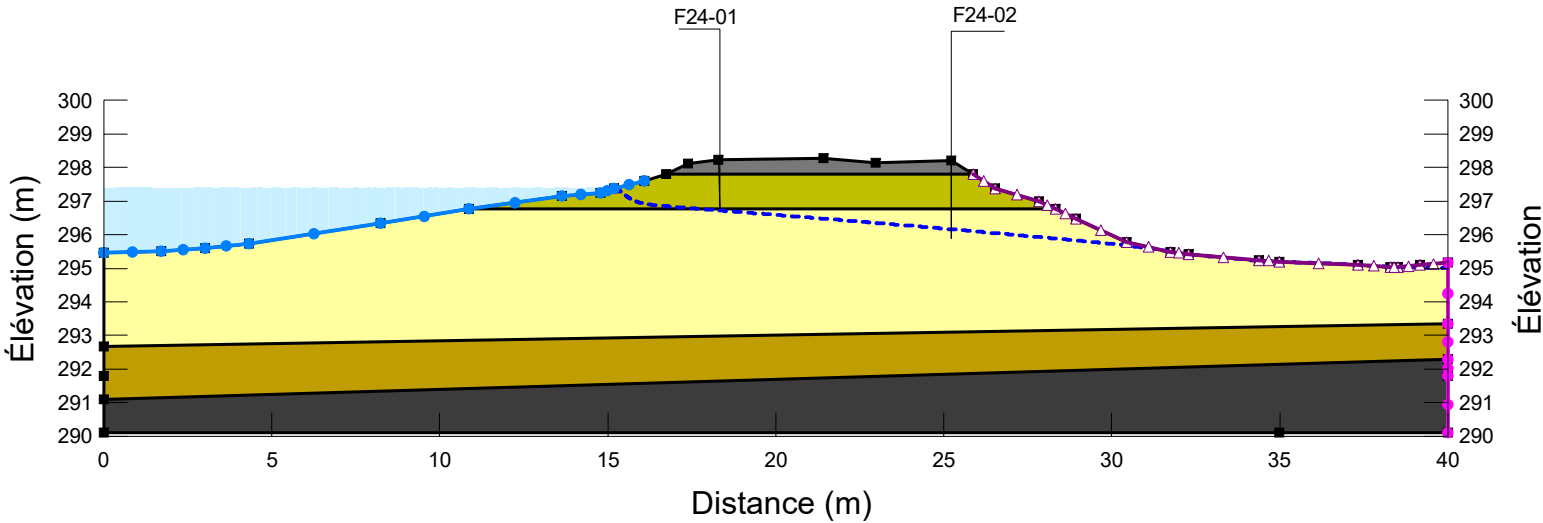
Couleur	Nom	Modèle de matériau de stabilité de pente	Poids volumique (kN/m³)	Cohésion effective (kPa)	Angle de frottement effectif (°)	Phi-B (°)
	Fondation	Mohr-Coulomb	21	0	34	0
	Remblai digue	Mohr-Coulomb	19	0	29	0
	Roc	Haute résistance	25			
	Till (compact à très dense)	Mohr-Coulomb	19	0	33	0
	Till (très lâche à lâche)	Mohr-Coulomb	19	0	28	0

Analyse statique
Pente aval
Coupe A-A
Niveau d'eau Crue 100 ans



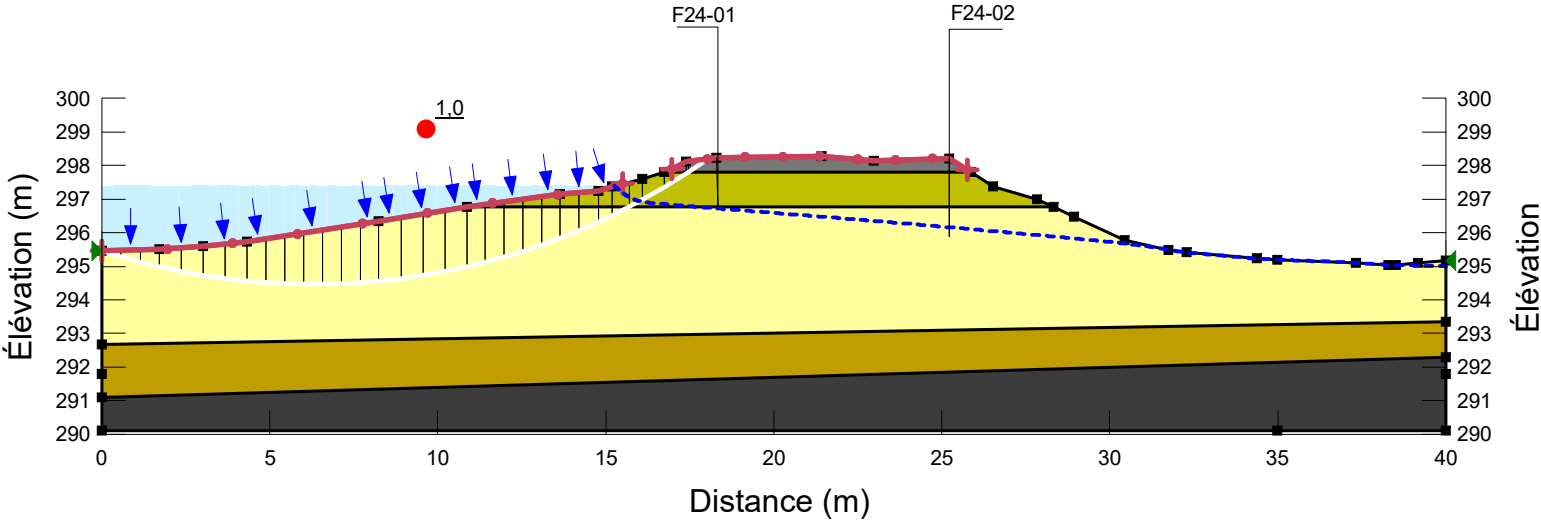
Couleur	Nom	Modèle de matériau hydraulique	Fonction de teneur en eau volumétrique	Fonction de K	Rapport K_y'/K_x'	K_x sat. (m/s)
	Fondation	Saturé / non saturé	Fondation	Fondation	1	
	Remblai digue	Saturé / non saturé	Remblai digue	Remblai digue	1	
	Roc	Saturé uniquement			1	1e-09
	Till (compact à très dense)	Saturé / non saturé	Till	Till	1	
	Till (très lâche à lâche)	Saturé / non saturé	Till	Till	1	

Analyse des écoulements
Coupe A-A
Niveau d'eau Normal



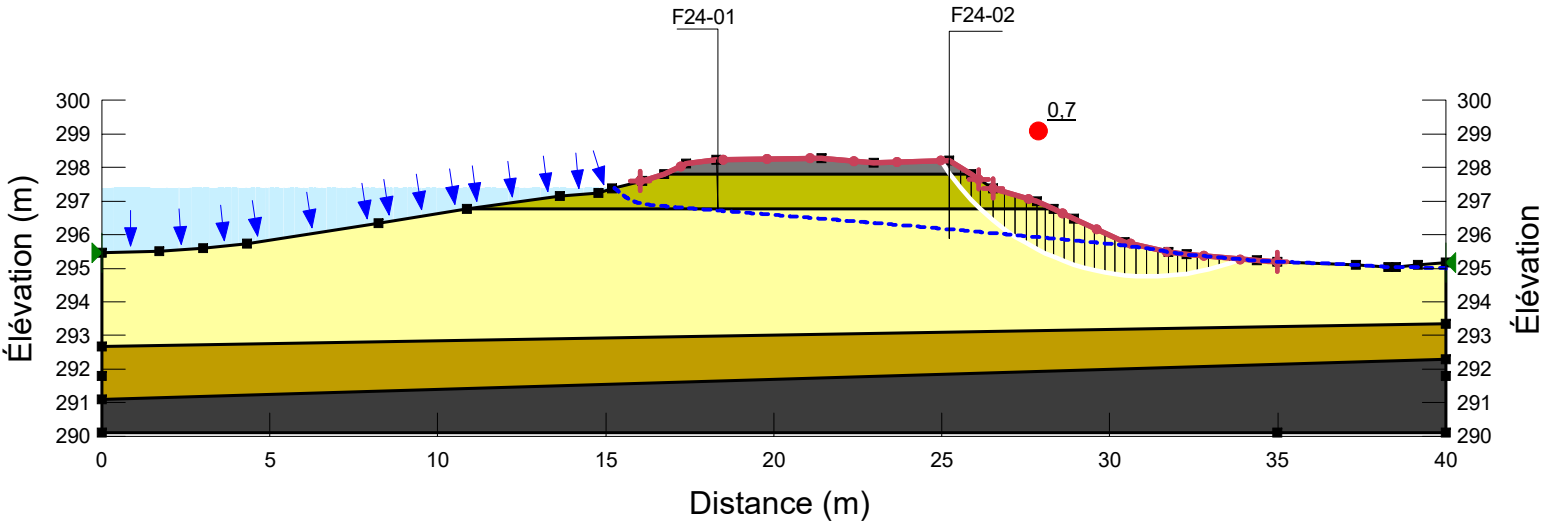
Couleur	Nom	Modèle de matériau de stabilité de pente	Poids volumique (kN/m³)	Cohésion effective (kPa)	Angle de frottement effectif (°)	Phi-B (°)
	Fondation	Mohr-Coulomb	21	0	34	0
	Remblai digue	Mohr-Coulomb	19	0	29	0
	Roc	Haute résistance	25			
	Till (compact à très dense)	Mohr-Coulomb	19	0	33	0
	Till (très lâche à lâche)	Mohr-Coulomb	19	0	28	0

Analyse pseudo-statique
Pente amont
Coupe A-A
Niveau d'eau Normal



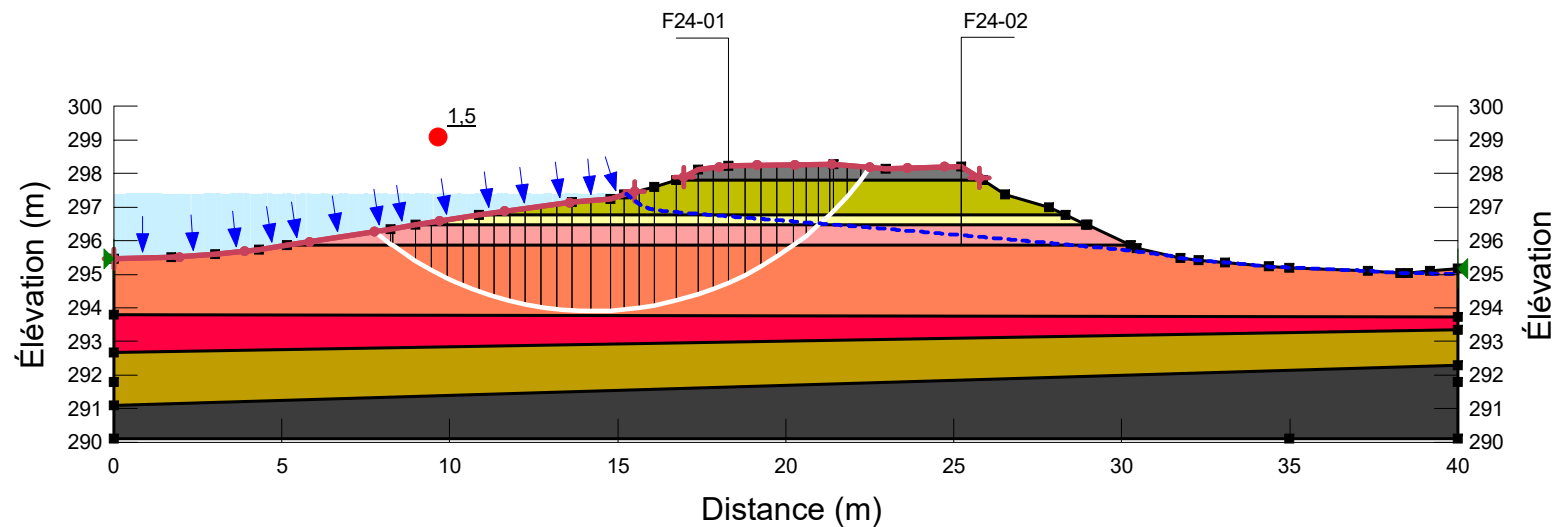
Couleur	Nom	Modèle de matériau de stabilité de pente	Poids volumique (kN/m³)	Cohésion effective (kPa)	Angle de frottement effectif (°)	Phi-B (°)
	Fondation	Mohr-Coulomb	21	0	34	0
	Remblai digue	Mohr-Coulomb	19	0	29	0
	Roc	Haute résistance	25			
	Till (compact à très dense)	Mohr-Coulomb	19	0	33	0
	Till (très lâche à lâche)	Mohr-Coulomb	19	0	28	0

Analyse pseudo-statique
Pente aval
Coupe A-A
Niveau d'eau Normal



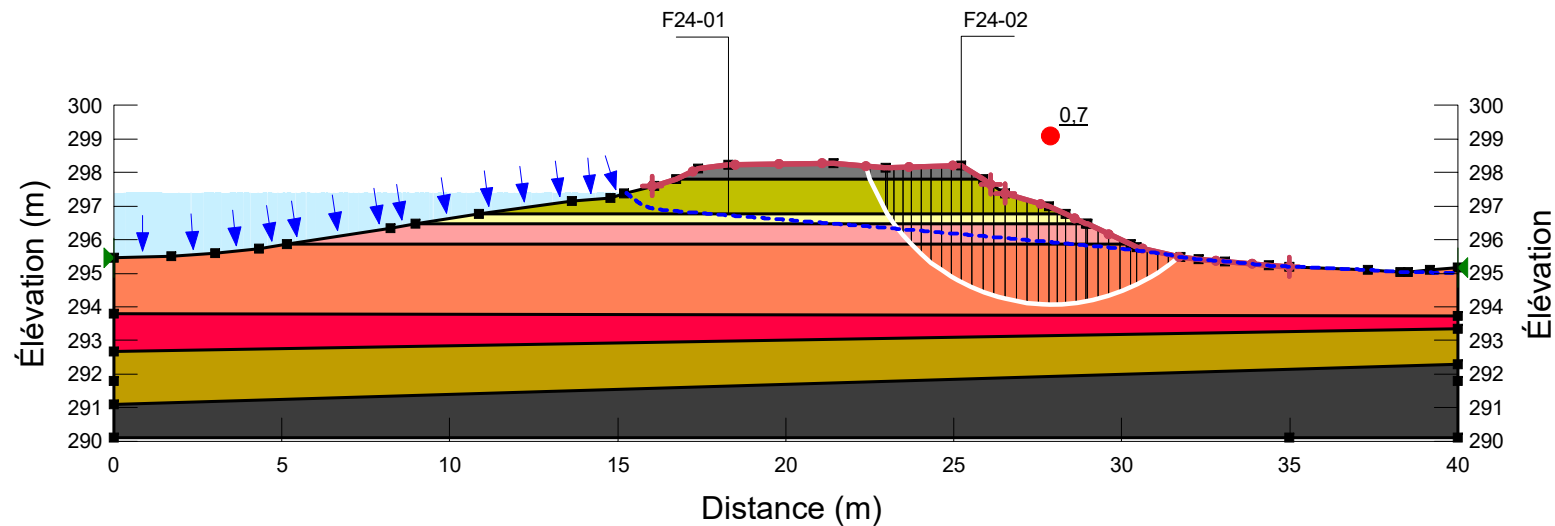
Couleur	Nom	Modèle de matériau de stabilité de pente	Poids volumique (kN/m³)	Résistance au cisaillement non drainée (kPa)	Cohésion effective (kPa)	Angle de frottement effectif (°)	Phi-B (°)
■	Fondation	Mohr-Coulomb	21		0	34	0
■	Remblai digue	Mohr-Coulomb	19		0	29	0
■	Roc	Haute résistance	25				
■	Till - (Post-liquéfaction) Sur=13	Non consolidé (Phi = 0)	19	13			
■	Till - (Post-liquéfaction) Sur=3	Non consolidé (Phi = 0)	19	3			
■	Till - (Post-liquéfaction) Sur=6	Non consolidé (Phi = 0)	19	6			
■	Till (compact à très dense)	Mohr-Coulomb	19		0	33	0
■	Till (très lâche à lâche)	Mohr-Coulomb	19		0	28	0

Analyse post liquéfaction
Pente amont
Coupe A-A
Niveau d'eau Normal



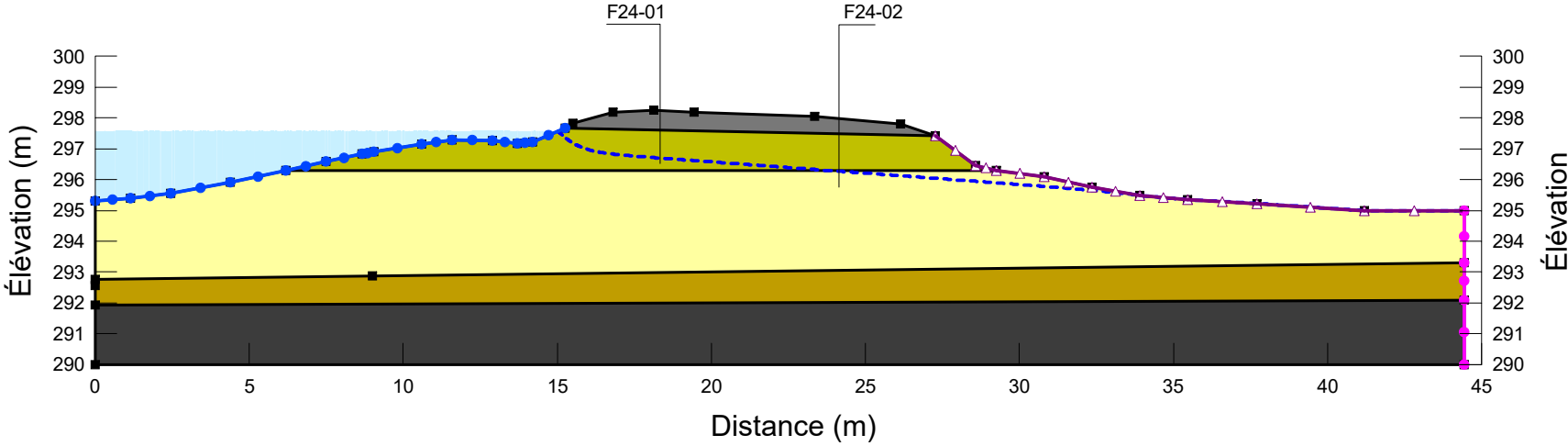
Couleur	Nom	Modèle de matériau de stabilité de pente	Poids volumique (kN/m³)	Résistance au cisaillement non drainée (kPa)	Cohésion effective (kPa)	Angle de frottement effectif (°)	Phi-B (°)
■	Fondation	Mohr-Coulomb	21		0	34	0
■	Remblai digue	Mohr-Coulomb	19		0	29	0
■	Roc	Haute résistance	25				
■	Till - (Post-liquéfaction) Sur=13	Non consolidé (Phi = 0)	19	13			
■	Till - (Post-liquéfaction) Sur=3	Non consolidé (Phi = 0)	19	3			
■	Till - (Post-liquéfaction) Sur=6	Non consolidé (Phi = 0)	19	6			
■	Till (compact à très dense)	Mohr-Coulomb	19		0	33	0
■	Till (très lâche à lâche)	Mohr-Coulomb	19		0	28	0

Analyse post liquéfaction
Pente aval
Coupe A-A
Niveau d'eau Normal



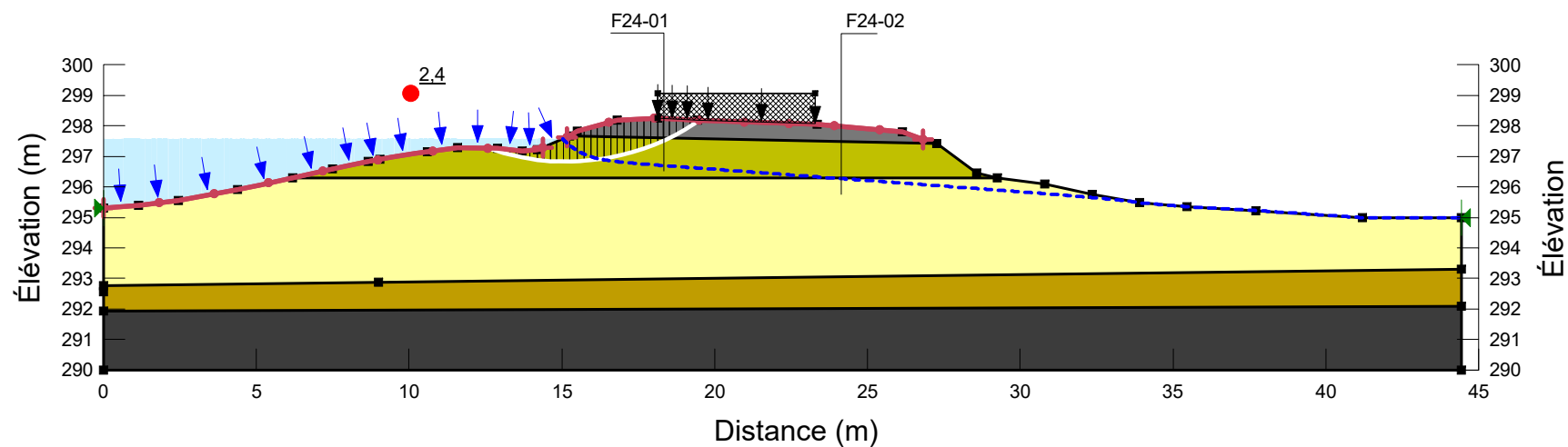
Couleur	Nom	Modèle de matériau hydraulique	Rapport K_y'/K_x'	Kx sat.
	Fondation	Saturé / non saturé	1	
	Remblai digue	Saturé / non saturé	1	
	Roc	Saturé uniquement	1	1e-09
	Till (compact à très dense)	Saturé / non saturé	1	
	Till (très lâche à lâche)	Saturé / non saturé	1	

Analyse des écoulements
 Coupe B-B
 Niveau d'eau crue 100 ans



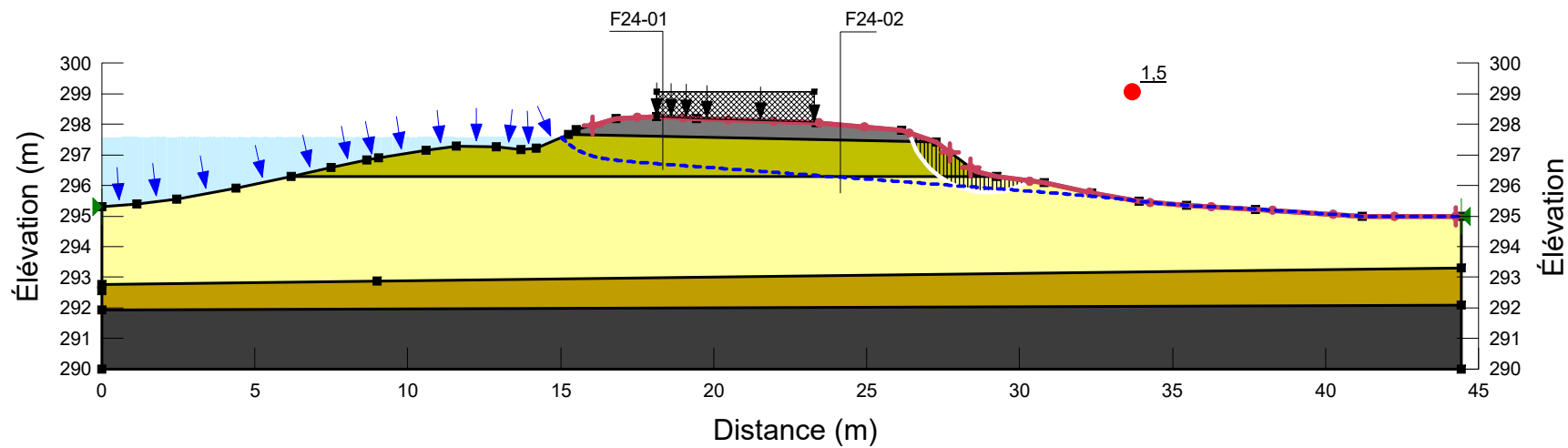
Couleur	Nom	Modèle de matériau de stabilité de pente	Poids volumique	Cohésion effective	Angle de frottement effectif
	Fondation	Mohr-Coulomb	21	0	34
	Remblai digue	Mohr-Coulomb	19	0	29
	Roc	Haute résistance	25		
	Till (compact à très dense)	Mohr-Coulomb	19	0	33
	Till (très lâche à lâche)	Mohr-Coulomb	19	0	28

Analyse statique - Pente amont
Coupe B-B
Niveau d'eau crue 100 ans



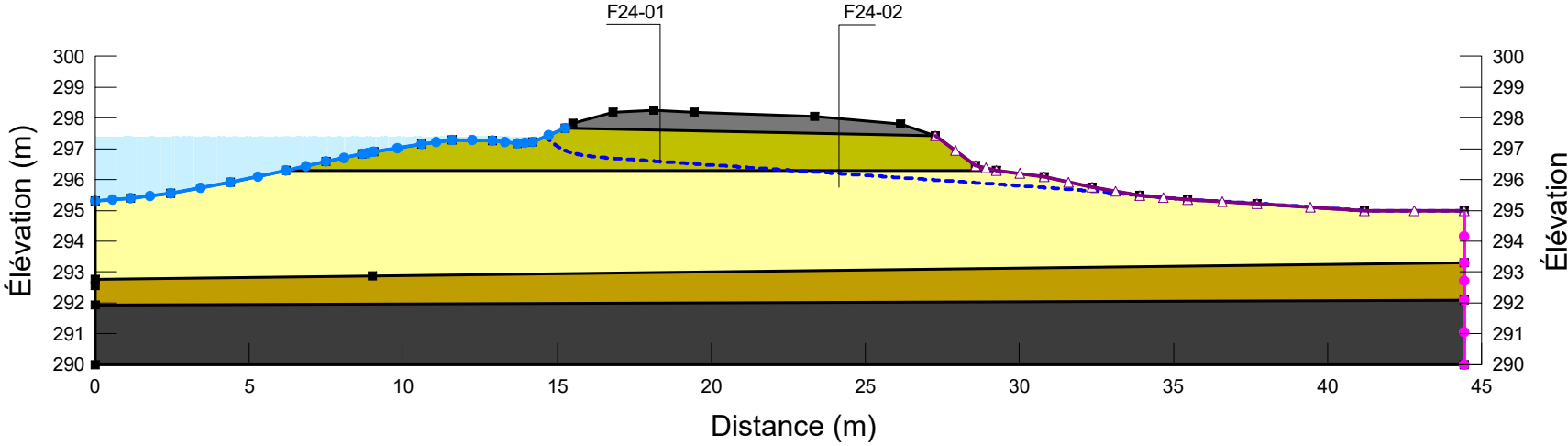
Couleur	Nom	Modèle de matériau de stabilité de pente	Poids volumique	Cohésion effective	Angle de frottement effectif
	Fondation	Mohr-Coulomb	21	0	34
	Remblai digue	Mohr-Coulomb	19	0	29
	Roc	Haute résistance	25		
	Till (compact à très dense)	Mohr-Coulomb	19	0	33
	Till (très lâche à lâche)	Mohr-Coulomb	19	0	28

Analyse statique - Pente aval
Coupe B-B
Niveau d'eau crue 100 ans



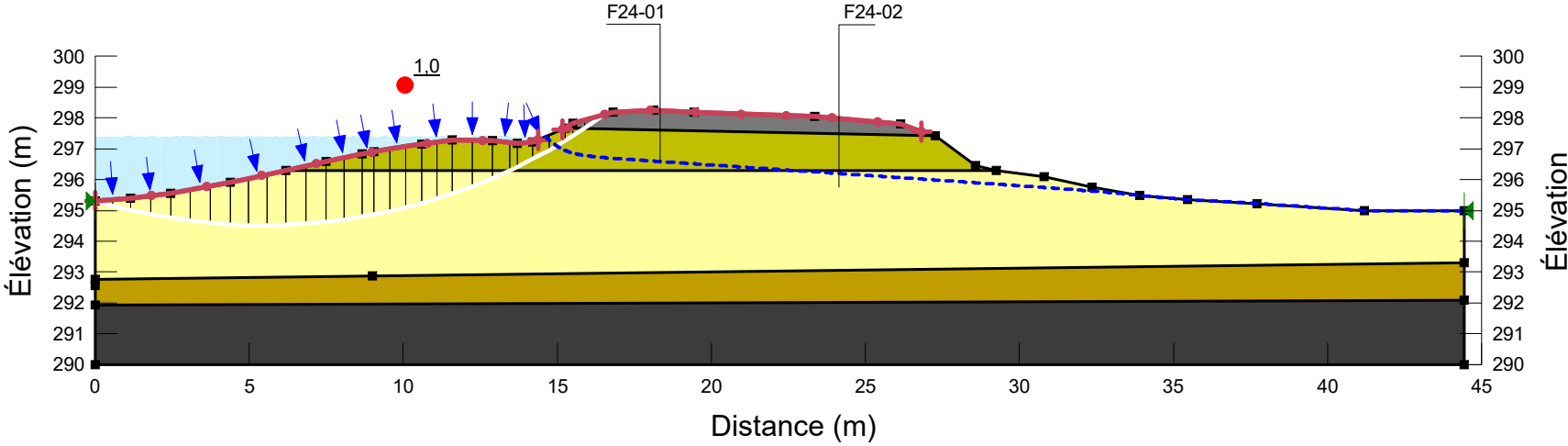
Couleur	Nom	Modèle de matériau hydraulique	Rapport K_y'/K_x'	Kx sat.
	Fondation	Saturé / non saturé	1	
	Remblai digue	Saturé / non saturé	1	
	Roc	Saturé uniquement	1	1e-09
	Till (compact à très dense)	Saturé / non saturé	1	
	Till (très lâche à lâche)	Saturé / non saturé	1	

Analyse des écoulements
 Coupe B-B
 Niveau d'eau Normal



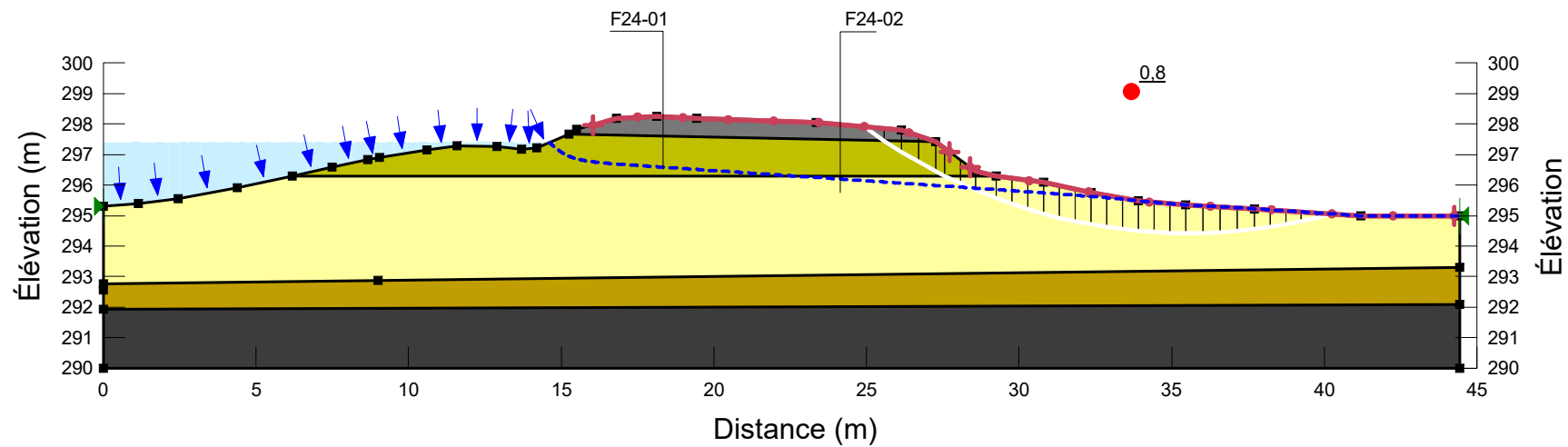
Couleur	Nom	Modèle de matériau de stabilité de pente	Poids volumique	Cohésion effective	Angle de frottement effectif
	Fondation	Mohr-Coulomb	21	0	34
	Remblai digue	Mohr-Coulomb	19	0	29
	Roc	Haute résistance	25		
	Till (compact à très dense)	Mohr-Coulomb	19	0	33
	Till (très lâche à lâche)	Mohr-Coulomb	19	0	28

Analyse pseudo-statique
Pente amont
Coupe B-B
Niveau d'eau Normal



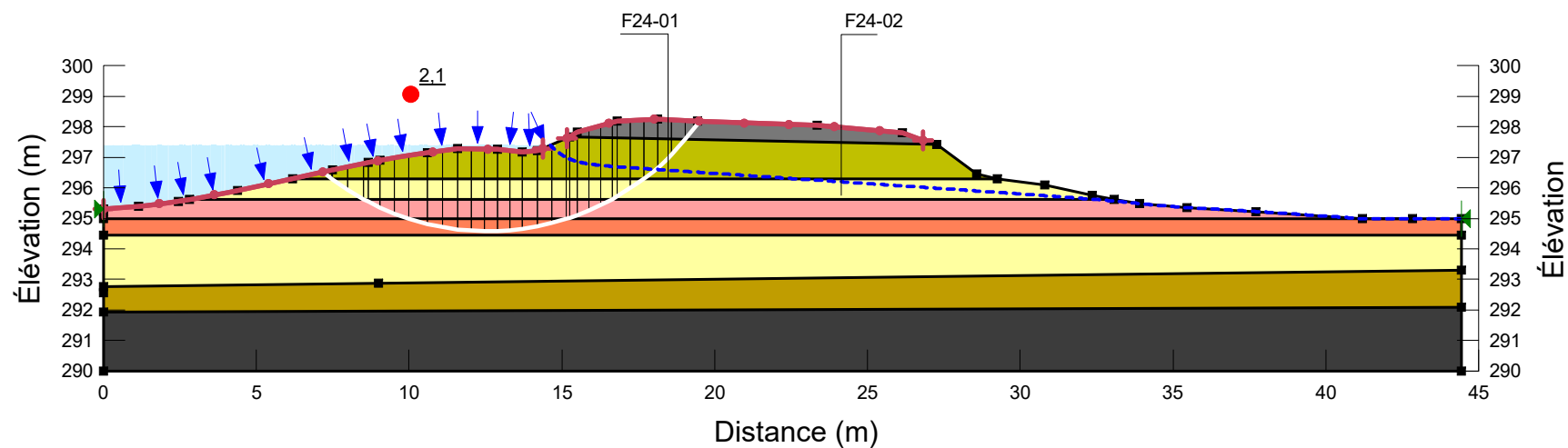
Couleur	Nom	Modèle de matériau de stabilité de pente	Poids volumique	Cohésion effective	Angle de frottement effectif
	Fondation	Mohr-Coulomb	21	0	34
	Remblai digue	Mohr-Coulomb	19	0	29
	Roc	Haute résistance	25		
	Till (compact à très dense)	Mohr-Coulomb	19	0	33
	Till (très lâche à lâche)	Mohr-Coulomb	19	0	28

Analyse pseudo-statique
Pente aval
Coupe B-B
Niveau d'eau Normal



Couleur	Nom	Modèle de matériau de stabilité de pente	Poids volumique	Résistance au cisaillement non drainée	Cohésion effective	Angle de frottement effectif
■	Fondation	Mohr-Coulomb	21		0	34
■	Remblai digue	Mohr-Coulomb	19		0	29
■	Roc	Haute résistance	25			
■	Till - (Post-liquéfaction) Sur=3	Non consolidé (Phi = 0)	19	3		
■	Till - (Post-liquéfaction) Sur=6	Non consolidé (Phi = 0)	19	6		
■	Till (compact à très dense)	Mohr-Coulomb	19		0	33
■	Till (très lâche à lâche)	Mohr-Coulomb	19		0	28

Analyse post liquéfaction
Pente amont
Coupe B-B
Niveau d'eau Normal



Couleur	Nom	Modèle de matériau de stabilité de pente	Poids volumique	Résistance au cisaillement non drainée	Cohésion effective	Angle de frottement effectif
	Fondation	Mohr-Coulomb	21		0	34
	Remblai digue	Mohr-Coulomb	19		0	29
	Roc	Haute résistance	25			
	Till - (Post-liquéfaction) Sur=3	Non consolidé (Phi = 0)	19	3		
	Till - (Post-liquéfaction) Sur=6	Non consolidé (Phi = 0)	19	6		
	Till (compact à très dense)	Mohr-Coulomb	19		0	33
	Till (très lâche à lâche)	Mohr-Coulomb	19		0	28

Analyse post liquéfaction
Pente aval
Coupe B-B
Niveau d'eau Normal

