

BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546)

ÉTUDE D'ÉVALUATION DE LA SÉCURITÉ

MUNICIPALITÉ DE SAINTE-ANNE-DES-LACS

JUILLET 2024





BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546)

ÉTUDE D'ÉVALUATION DE LA SÉCURITÉ

MUNICIPALITÉ DE SAINTE-ANNE-DES-LACS

VERSION FINALE

PROJET N° : CA0019924.4595
DATE : JUILLET 2024

WSP CANADA INC.
1135, BOULEVARD LEBOURGNEUF
QUÉBEC (QUÉBEC) G2K 0M5

TÉLÉPHONE : +1 418-623-2254
TÉLÉCOPIEUR : +1 418-624-1857
WSP.COM

SIGNATURES

PRÉPARÉE PAR

Serge Laforce, ing., M. Ing.
Nº OIQ : 128063

Pierre-Olivier Maltais, ing. M.Sc.
Nº OIQ : 5040591

Vincent Carrier, ing., M.Sc.
Nº OIQ : 5079982

RÉVISÉE PAR

Michel Dolbec, ing., MBA
Nº OIQ : 34184

Le présent rapport a été préparé par WSP Canada Inc. (WSP) pour le compte de la Municipalité de Sainte-Anne-des-Lacs conformément à l'entente de services professionnels. La divulgation de tout renseignement faisant partie du présent rapport incombe uniquement au destinataire prévu. Son contenu reflète le meilleur jugement de WSP à la lumière des informations disponibles au moment de la préparation du rapport. Toute utilisation que pourrait en faire une tierce partie ou toute référence ou toutes décisions en découlant sont l'entièvre responsabilité de ladite tierce partie. WSP n'accepte aucune responsabilité quant aux dommages, s'il en était, que pourrait subir une tierce partie à la suite d'une décision ou d'un geste basé sur le présent rapport. Cet énoncé de limitation fait partie du présent rapport.

L'original du document technologique que nous vous transmettons a été authentifié et sera conservé par WSP pour une période minimale de 10 ans. Étant donné que le fichier transmis n'est plus sous le contrôle de WSP et que son intégrité n'est pas assurée, aucune garantie n'est donnée sur les modifications ultérieures qui peuvent y être apportées.

ÉMISSION/RÉVISION	PRÉPARÉ POUR	DATE
Préliminaire	Municipalité de Sainte-Anne-des-Lacs	28 juin 2024
Finale	Municipalité de Sainte-Anne-des-Lacs	12 juillet 2024

ÉQUIPE DE RÉALISATION

MUNICIPALITÉ DE SAINTE-ANNE-DES-LACS

Directeur Mathieu Langlois, géogr., M. Env.
Service de l'environnement

WSP CANADA INC. (WSP)

Chargé de projet Michel Dolbec, ing., MBA

Hydrologie et hydraulique Serge Laforce, ing., M. Ing.

Géotechnique Pierre-Olivier-Maltais, ing. M.Sc.
Vincent Carrier, ing., M. Sc.
Charles Desgagnés, CPI.

Arpentage Daphné Poitras, tech.

Cartographie Dominic Delorme, tech.
Pierre-André Bastin, tech.

Chargé qualité Régis Audeux, tech.

Traitement de texte et édition Nancy Galarneau, adj. administrative

Référence à citer :

WSP. 2024. *Barrage du lac Loiselle (X2181546) – Étude d'évaluation de la sécurité*. Rapport final de WSP Canada Inc. à la Municipalité de Sainte-Anne-des-Lacs. 52 p. et annexes.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	1
1.1	MISE EN CONTEXTE	1
1.2	OBJECTIFS.....	1
2	PRÉSENTATION DU BARRAGE	2
2.1	LOCALISATION DU BARRAGE	2
2.2	HISTORIQUE DES INTERVENTIONS	2
2.3	DESCRIPTION DU BARRAGE.....	2
3	ÉTAT ET COMPORTEMENT DU BARRAGE	4
3.1	ACTIVITÉS DE SURVEILLANCE	4
3.2	ÉVALUATION DE L'ÉTAT ET DU COMPORTEMENT	4
3.2.1	DIGUE EN TERRE.....	5
3.2.2	DÉVERSOIR	5
3.2.3	OPINION SUR L'ÉTAT DU BARRAGE X2181546	5
3.2.4	CONCLUSIONS DU RAPPORT D'INSPECTION.....	5
3.3	ANALYSE DES DONNÉES D'AUSCULTATION	6
3.4	FONCTIONNALITÉ ET FIABILITÉ DES APPAREILS D'ÉVACUATION.....	6
4	ANALYSE HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE	7
4.1	CARACTÉRISTIQUES DES BASSINS VERSANTS ..	7
4.2	CARACTÉRISATION DES CRUES – MÉTHODE RATIONNELLE	9
4.2.1	STATION MÉTÉOROLOGIQUE UTILISÉE	9
4.2.2	PARAMÈTRES DE CALCUL	9
4.2.3	DÉBITS DE CRUE	10
4.2.4	DÉBIT MODULE AU BARRAGE.....	11
4.2.5	APPORTS INTERMÉDIAIRES.....	11
4.3	GESTION DU BARRAGE	11
4.4	CAPACITÉ D'ÉVACUATION.....	11
4.4.1	DÉTERMINATION DE L'ÉLÉVATION DU DÉVERSOIR ..	11
4.4.2	COURBE D'ÉVACUATION	12
4.5	CAPACITÉ DE RETENUE	12

5	ÉTUDE DE RUPTURE	13
5.1	APPROCHE GLOBALE	13
5.2	DÉTERMINATION DU POINT D'ATTÉNUATION.....	13
5.3	CARACTÉRISATION DU TERRITOIRE EN AVAL ...	13
5.4	CALCULS HYDRAULIQUES	15
5.4.1	DESCRIPTION DU MODÈLE HYDRAULIQUE NUMÉRIQUE.....	15
5.4.2	VALIDATION DU MODÈLE HYDRAULIQUE	16
5.4.3	SCÉNARIOS ÉTUDIÉS.....	16
5.4.4	CARACTÉRISTIQUES DE LA BRÈCHE	16
5.5	RÉSULTATS DE LA PROPAGATION DE L'ONDE DE RUPTURE	18
5.5.1	SCÉNARIO 1 – RUPTURE EN TEMPS SEC	18
5.5.2	SCÉNARIO 2 – RUPTURE EN CRUE DE RÉCURRENCE 100 ANS.....	19
5.5.3	SCÉNARIO 3 – RUPTURE EN CRUE DE RÉCURRENCE 1 000 ANS.....	21
6	NIVEAU DES CONSÉQUENCES	23
7	CRUE DE SÉCURITÉ	24
7.1	INTRODUCTION.....	24
7.2	CRUE DE SÉCURITÉ DU BARRAGE DU LAC LOISELLE	24
7.2.1	APPLICATION DE L'ARTICLE 21 DU RSB.....	24
7.2.2	APPLICATION DE L'ARTICLE 21.1 DU RSB.....	24
7.2.3	APPLICATION DE L'ARTICLE 22 DU RSB.....	24
7.2.4	APPLICATION DE L'ARTICLE 23 DU RSB.....	24
7.2.5	APPLICATION DE L'ARTICLE 24 DU RSB.....	25
7.2.6	CRUE DE SÉCURITÉ DU BARRAGE DU LAC LOISELLE.....	25
7.3	REVANCHE HYDRAULIQUE	25
7.4	ANALYSE DU POURTOUR DU RÉSERVOIR.....	25
7.5	RÉSUMÉ DES CARACTÉRISTIQUES HYDROLOGIQUES ET HYDRAULIQUES.....	25
8	STABILITÉ DU BARRAGE	27
8.1	REVUE DE LA DOCUMENTATION EXISTANTE.....	27

8.1.1	SYNTHÈSE DE LA STRATIGRAPHIE OBSERVÉE.....	27
8.1.2	EAU SOUTERRAINE	28
8.1.3	LEVÉS GÉOPHYSIQUES.....	28
8.2	ANALYSE D'ÉCOULEMENT	29
8.2.1	MÉTHODOLOGIE	29
8.2.2	COUPES TYPES ÉTUDIÉES	30
8.2.3	PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES DES SOLS.....	31
8.2.4	RÉSULTATS DES ANALYSES D'ÉCOULEMENT	33
8.3	POTENTIEL D'ÉROSION INTERNE.....	33
8.3.1	POTENTIEL D'INITIATION DE L'ÉROSION RÉGRESSIVE AU PIED DE L'OUVRAGE.....	33
8.3.2	POTENTIEL DE SUFFUSION DES SOLS	34
8.3.3	CONTINUATION DE L'ÉROSION INTERNE.....	36
8.3.4	DISCUSSION SUR LE POTENTIEL D'INITIATION DE L'ÉROSION INTERNE DU BARRAGE LOISELLE	36
8.4	STABILITÉ DES PENTES.....	37
8.4.1	MÉTHODOLOGIE	37
8.4.2	PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES SOLS.....	37
8.4.3	RÉSULTATS DES ANALYSES DE STABILITÉ.....	38
8.5	ÉVALUATION DE LA SÉCURITÉ SISMIQUE	38
8.5.1	CHOIX DU SÉISME DE DIMENSIONNEMENT	38
8.5.2	ÉVALUATION DU POTENTIEL DE LIQUÉFACTION.....	39
8.5.3	COMPORTEMENT POST-SISMIQUE.....	40
9	SYNTHÈSE.....	43
9.1	INTRODUCTION.....	43
9.2	CONFORMITÉ DU BARRAGE AUX NORMES MINIMALES DE SÉCURITÉ RELATIVES À LA RÉSISTANCE AUX CRUES	43
9.2.1	NIVEAU DES CONSÉQUENCES ET CRUE DE SÉCURITÉ	43
9.2.2	REVANCHE DISPONIBLE	43
9.2.3	ANALYSE DE LA TOPOGRAPHIE DU POURTOUR DU RÉSERVOIR	43
9.3	ÉTAT ET PÉRENNITÉ DES OUVRAGES	43
9.3.1	ÉTAT DU BARRAGE	43
9.3.2	FONCTIONNALITÉ ET FIABILITÉ DES ÉVACUATEURS	43
9.3.3	STABILITÉ DES OUVRAGES.....	44

9.4	EXPLOITATION DU BARRAGE	44
9.4.1	CLASSEMENT DU BARRAGE	44
9.4.2	SURVEILLANCE	45
9.4.3	PLAN DE GESTION DES EAUX RETENUE	45
9.4.4	PLAN DES MESURES D'URGENCE	45
10	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	46
10.1	CONCLUSION	46
10.2	RECOMMANDATIONS	47
10.2.1	RECOMMANDATION EN LIEN AVEC LA SÉCURITÉ DU BARRAGE	47
10.2.2	RECOMMANDATIONS EN LIEN AVEC LES OPÉRATIONS, LA SURVEILLANCE ET LA PÉRENNITÉ DES OUVRAGES	47
10.2.3	RECOMMANDATIONS EN LIEN AVEC LA SÉCURITÉ DU PUBLIC	48
11	CORRECTIFS ET CALENDRIER DE MISE EN OEUVRE	50
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		51

TABLEAUX

TABLEAU 2.1	CARACTÉRISTIQUES ADMINISTRATIVES ET LOCALISATION DU BARRAGE DU LAC LOISELLE	2
TABLEAU 2.2	PRINCIPALES CARACTÉRISTIQUES DU BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546).....	3
TABLEAU 4.1	CARACTÉRISTIQUES DES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES CONSIDÉRÉES	9
TABLEAU 4.2	PARAMÈTRES DE CALCUL DE LA MÉTHODE RATIONNELLE POUR LES BASSINS VERSANTS AU DROIT DES BARRAGES DU LAC LOISELLE ET DU LAC MAROIS.....	10
TABLEAU 4.3	DÉBITS DE CRUE INSTANTANÉS ÉVACUÉS PAR LE BARRAGE SUIVANT LE LAMINAGE EFFECTUÉ PAR LE LAC LOISELLE.....	10
TABLEAU 4.4	DÉBITS DE CRUE INSTANTANÉS ÉVACUÉS PAR LE BARRAGE DU LAC MAROIS SUIVANT LE LAMINAGE EFFECTUÉ PAR CE LAC.....	11
TABLEAU 5.1	INVENTAIRE DES ÉLÉMENTS ET INFRASTRUCTURES SITUÉS EN AVAL DU BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546).....	13
TABLEAU 5.2	COEFFICIENTS DE MANNING SELON LE TYPE DE SURFACE	15
TABLEAU 5.3	SCÉNARIOS ÉTUDIÉS POUR LA CARACTÉRISATION DU NIVEAU DES CONSÉQUENCES ASSOCIÉS À LA RUPTURE.....	16
TABLEAU 5.4	CARACTÉRISTIQUES DE LA BRÈCHE SIMULÉE AU BARRAGE DU LAC LOISELLE	17

TABLEAU 5.5	NIVEAUX D'EAU POUR LE SCÉNARIO DE RUPTURE EN TEMPS SEC	19
TABLEAU 5.6	NIVEAUX D'EAU POUR LE SCÉNARIO DE RUPTURE EN CRUE DE RÉCURRENCE 100 ANS.....	20
TABLEAU 5.7	NIVEAUX D'EAU POUR LE SCÉNARIO DE RUPTURE EN CRUE DE RÉCURRENCE 1 000 ANS.....	22
TABLEAU 6.1	ÉLÉMENTS AFFECTÉS PAR LA RUPTURE DU BARRAGE DU LAC LOISELLE	23
TABLEAU 8.1	LISTE DES INTRANTS CONSULTÉS DANS LE CADRE DE L'ANALYSE DE STABILITÉ	27
TABLEAU 8.2	PARAMÈTRES HYDRAULIQUES DES MATÉRIAUX	33
TABLEAU 8.3	RÉSULTATS DES CALCULS DES GRADIENTS HYDRAULIQUES DE SORTIE	34
TABLEAU 8.4	DESCRIPTION DES ÉCHANTILLONS ANALYSÉS	35
TABLEAU 8.5	PROPRIÉTÉS GÉOTECHNIQUES DES MATÉRIAUX DE LA DIGUE	38
TABLEAU 8.6	RÉSULTATS DES ANALYSES DE STABILITÉ EN CONDITION STATIQUE	38
TABLEAU 8.7	ESTIMATION DE L'ACCÉLÉRATION EN CRÊTE DU BARRAGE LOISELLE.....	39
TABLEAU 8.8	PARAMÈTRES RÉSIDUELS DE L'HORIZON LIQUÉFIABLE DE SILT ET SABLE LÂCHE	41
TABLEAU 8.9	RÉSULTATS DES ANALYSES DE STABILITÉ EN CONDITION POST-SISMIQUE	41
TABLEAU 9.1	CLASSEMENT DU BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546).....	44

TABLEAU 10.1 PRINCIPALES CONCLUSIONS ISSUES DE L'ÉTUDE D'ÉVALUATION DE LA SÉCURITÉ DU BARRAGE DU LAC LOISELLE	46
TABLEAU 11.1 MESURES DE MITIGATION RECOMMANDÉES D'ICI LA RÉALISATION DES TRAVAUX DE MISE AUX NORMES DU BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546)	50
TABLEAU 11.2 EXPOSÉ DES CORRECTIFS ET CALENDRIER DE MISE EN ŒUVRE POUR LE BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546).....	50

FIGURES

FIGURE 4.1 COURBE D'ÉVACUATION DU BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546).....	12
FIGURE 5.1 REPRÉSENTATION SIMPLIFIÉE DE LA BRÈCHE (ENCADRÉ) AU BARRAGE DU LAC LOISELLE.....	17
FIGURE 8.1 INTERPRÉTATION DU LEVÉ EN SISMIQUE RÉFRACTION.....	28
FIGURE 8.2 INTERPRÉTATION DU LEVÉ EN MASW2D.....	29
FIGURE 8.3 VUE EN PLAN DU BARRAGE LOISELLE INDIQUANT L'EMPLACEMENT DES FORAGES ET DES COUPES MODÉLISÉES.....	30
FIGURE 8.4 SUSCEPTIBILITÉ DES MATERIAUX DES ÉCHANTILLONS DE SOL (WAN ET FELL, 2008)	35
FIGURE 10.1 ÉVIDENCES DE CIRCULATIONS SUR LE COUVERT DE GLACE DU LAC LOISELLE PHOTOGRAPHIE AÉRIENNE PRISE LE 17 JANVIER 2022 ET DISPONIBLE SUR GOOGLE EARTH PRO	49

CARTES

CARTE 4.1	DÉLIMITATION DU BASSIN VERSANT AU DROIT DU BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546)	8
-----------	---	---

ANNEXES

- A** FICHE TECHNIQUE DU BARRAGE
- B** RAPPORT DE VISITE DE RECENSEMENT
(MELCCFP, 2021)
- C** RAPPORT D'INSPECTION (WSP, 2022)
- D** CARTE DE RUPTURE (WSP, 2024)
- E** CALCULS DE STABILITÉ
- F** POTENTIEL DE LIQUÉFACTION
- G** CLASSEMENT
- H** ÉTUDE GÉOTECHNIQUE

1 INTRODUCTION

La Municipalité de Sainte-Anne-des-Lacs (la Municipalité) deviendra l'unique propriétaire d'ici décembre 2024 du barrage du lac Loiselle, car elle se portera acquéreuse de l'ensemble de la digue du barrage ainsi que du fond du lac. Auparavant, elle partageait la propriété de ce barrage avec la communauté religieuse de l'ordre hospitalier de Saint-Jean-de-Dieu.

Cet ouvrage, n°X2181546 au Répertoire des barrages du Québec, est situé sur le ruisseau Marois, sur le territoire de la municipalité de Saint-Anne-des-Lacs, dans la MRC des Pays-d'en-Haut, région administrative des Laurentides.

1.1 MISE EN CONTEXTE

Le barrage du lac Loiselle est de catégorie administrative « forte contenance ». Il est assujetti à la *Loi sur la sécurité des barrages* (LSB) et au règlement qui s'y rattache, le *Règlement sur la sécurité des barrages* (RSB). Il a été ajouté au répertoire récemment, au cours de l'année 2018, et doit faire l'objet d'une première évaluation de la sécurité (ÉS). Actuellement, le barrage fait l'objet d'une surveillance régulière selon les prescriptions de la réglementation.

Une étude de rupture du barrage a été réalisée en 2022 pour le compte de la Municipalité. Le document produit incluait certaines parties inhérentes au contenu d'une ÉS dont les aspects d'hydrologie, d'hydraulique, d'inspection du barrage et l'établissement du niveau des conséquences et de la crue de sécurité. Suivant cette étude, le niveau des conséquences en cas de rupture a été établi à « moyen » et la crue de sécurité fixée à la récurrence millénale.

Dans ce contexte, la présente évaluation de la sécurité (ÉS), est réalisée conformément à l'article 16 de la *Loi sur la sécurité des barrages* (LSB) et aux articles 48 et 49 du *Règlement sur la sécurité des barrages* (RSB).

1.2 OBJECTIFS

Ce document constitue la première ÉS du barrage X2181546 et les objectifs sont les suivants :

1. statuer sur la crue de sécurité du barrage;
2. statuer sur la sécurité des ouvrages en remblai;
3. statuer sur la fiabilité des appareils d'évacuation;
4. émettre des recommandations pour assurer la sécurité et la pérennité des ouvrages, le cas échéant.

2 PRÉSENTATION DU BARRAGE

2.1 LOCALISATION DU BARRAGE

Le barrage n°X2181546, érigé à l'extrême sud du lac Loiselle, est un barrage de catégorie administrative « forte contenance » selon la fiche du Répertoire des barrages du Québec (annexe A). Ce répertoire est maintenu par la Direction de la sécurité des barrages (DSB) du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). La localisation géographique et les caractéristiques administratives de ce barrage sont présentées au Tableau 2.1.

Tableau 2.1 Caractéristiques administratives et localisation du barrage du lac Loiselle

Numéro au répertoire des barrages du Québec	X2181546
Lac/rivière	lac Loiselle
Latitude	45° 51' 52"
Longitude	-74° 7' 30"
Municipalité	Sainte-Anne-des-Lacs
Municipalité régionale de comté (MRC)	Les Pays-d'en-Haut
Région administrative	Laurentides
Zone sismique	4
Nom et adresse du propriétaire #1 et personne contact	<p>Municipalité de la paroisse de Sainte-Anne-des-Lacs 773, chemin de Sainte-Anne-des-Lacs, Sainte-Anne-des-Lacs (Québec) J0R 1B0</p> <p>Personne contact : Mathieu Langlois, Directeur du service de l'environnement 773 chemin Sainte-Anne-des-Lacs Sainte-Anne-des-Lacs (Québec) J0R 1B0</p>

2.2 HISTORIQUE DES INTERVENTIONS

Selon la fiche du barrage, celui-ci aurait été construit en 1980. Cependant, le barrage du lac Loiselle est déjà identifié sur une carte topographique datant de 1959 (BANQ, 2024), ce qui témoigne que celui-ci serait en fait construit depuis plus longtemps. L'année exacte de sa construction est toutefois inconnue.

2.3 DESCRIPTION DU BARRAGE

La description du barrage du lac Loiselle est effectuée à partir de la fiche du Répertoire des barrages du Québec du MELCCFP (annexe A), du rapport de visite de recensement réalisé par le MELCCFP en 2021 (annexe B) et du rapport d'inspection du barrage et des relevés topographiques réalisés par WSP en 2022 (annexe C).

Le barrage du lac Loiselle est de type digue en terre et il est fondé sur le till. La digue en terre semble avoir été construite à partir d'un cran de roc en rive gauche jusqu'au canal déversoir, lequel est aménagé au roc.

Les principales caractéristiques du barrage sont résumées au Tableau 2.2. Il est important de noter qu'en l'absence de plans de construction ou de réparations de l'ouvrage, l'élévation de la crête du déversoir a été déterminée à l'aide du relevé d'arpentage réalisé par WSP en juillet 2022 ainsi que du modèle numérique de terrain (MNT) fourni par le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP, 2022).

Tableau 2.2 Principales caractéristiques du barrage du lac Loiselle (X2181546)

CARACTÉRISTIQUES DU BARRAGE	
Numéro au répertoire des barrages du Québec	X2181546
Année de construction	Antérieure à 1959 ⁽¹⁾
Type de barrage	Digue en terre ^{(2) et (7)}
Fondation	Till ^{(2) et (7)}
Superficie du réservoir (ha)	2,18 ⁽³⁾
Capacité de retenue (m ³)	53 900 ⁽⁴⁾
Longueur totale du barrage (m)	156 ⁽²⁾
Niveau maximal de la crête de la digue – Situé en rive gauche (m)	312,50 ⁽⁶⁾
Niveau minimal de la crête de la digue (m)	311,70 ⁽⁶⁾
Niveau normal d'exploitation correspondant au débit module annuel (m)	310,91
Niveau minimal du terrain naturel au pied aval du barrage (m)	304,30 ⁽⁶⁾
Hauteur du barrage (m)	8,20 ⁽⁶⁾
Hauteur de retenue (m)	6,61
Utilisations	Récréatif et villégiature ⁽²⁾²⁰²³
Instrumentation	Aucune
CARACTÉRISTIQUES DU CANAL D'ÉVACUATION	
Type de déversoir	Seuil fixe en roc
Élévation minimale de la crête déversante du déversoir associé au canal (m)	310,90 ⁽⁶⁾
Largeur de déversement (m)	2,5 ⁽⁵⁾

1 Carte topographique du Canada à l'échelle de 1 :50 000, 1959.

2 Fiche du barrage (annexe A).

3 Géobase du réseau hydrographique du Québec.

4 Les calculs de la capacité de retenue du barrage sont présentés à la section 4.5 et considèrent la bathymétrie du lac (Université de Montréal, 2009).

5 Rapport d'inspection (annexe B).

6 Déterminée à l'aide du relevé d'arpentage réalisé par WSP en 2022.

7 Investigations géotechniques.

3 ÉTAT ET COMPORTEMENT DU BARRAGE

3.1 ACTIVITÉS DE SURVEILLANCE

La vérification de l'état du barrage au moyen d'une inspection de sa structure doit être effectuée dans le cadre de l'étude d'évaluation de la sécurité du barrage. À cet effet, le 14 juillet 2022, monsieur Vincent Carrier ingénieur géotechnicien chez WSP, a effectué l'inspection du barrage du lac Loiselle.

Le rapport d'inspection complet du barrage est disponible à l'annexe C. Il est possible de trouver dans cette annexe les fiches d'inspection présentant les éléments du barrage qui ont fait l'objet d'une analyse visuelle par l'ingénieur. À même ces listes, il est possible de constater et d'apprécier l'état de chacune des composantes individuelles de l'ouvrage. Un document photographique, qui accompagne les fiches d'inspection afin de préciser certains constats ou commentaires, est également présenté à l'annexe C du rapport d'inspection.

En plus de l'inspection réalisée dans le cadre de l'étude d'évaluation de la sécurité du barrage, la détermination de l'état et du comportement de celui-ci a également été réalisée à l'aide des rapports de surveillance, d'auscultation et d'inspection (anciennement rapports d'inspection statutaires).

3.2 ÉVALUATION DE L'ÉTAT ET DU COMPORTEMENT

L'état du barrage a été établi lors de l'inspection de ses composantes et son comportement a été évalué en comparant les observations faites avec les informations antérieures disponibles. L'état général des barrages est qualifié selon la nomenclature utilisée dans le RSB, à savoir :

- **très bon** : le barrage ne présente aucune anomalie ou comporte de minimes détériorations locales considérées normales ou sans conséquence;
- **bon** : le barrage ne présente que des détériorations mineures ou des anomalies qui ne mettent pas en cause le bon fonctionnement de ses éléments;
- **acceptable** : le barrage présente des détériorations qui demandent des réparations sans cependant représenter un danger à court terme pour la structure; un tel état nécessite des travaux d'entretien et de réfection à court ou moyen terme, sans quoi le barrage deviendra de plus en plus vulnérable. Le barrage peut également présenter des anomalies qui n'affectent pas sa sécurité à court terme, mais qui nécessitent un suivi particulier;
- **pauvre ou inconnu** : le barrage présente une ou plusieurs détériorations graves pouvant mettre en cause sa stabilité, rendre inopérantes certaines de ses parties ou présenter des anomalies graves qui sont susceptibles de compromettre sa sécurité ou encore, il est impossible de se prononcer sur son état.

Dans le présent chapitre, seul l'état général des différentes composantes du barrage est présenté. Le rapport d'inspection de l'annexe C peut être consulté pour plus de détails.

3.2.1 DIGUE EN TERRE

L'état de cette section du barrage est jugé « **acceptable** » au sens de la définition du RSB.

3.2.2 DÉVERSOIR

L'état de cette section du barrage est jugé « **acceptable** » au sens de la définition du RSB.

3.2.3 OPINION SUR L'ÉTAT DU BARRAGE X2181546

L'état de la digue en terre et de l'appareil d'évacuation ont été établi à « **acceptable** ». Dans ces conditions, l'état général du barrage du lac Loiselle (X2181546) est dans un état jugé « **acceptable** » au sens du RSB.

3.2.4 CONCLUSIONS DU RAPPORT D'INSPECTION

Dans son ensemble, malgré les anomalies du barrage observées et présentées dans ce rapport d'inspection, le barrage du lac Loiselle (X2181546) est dans un état qualifié comme étant « **acceptable** » selon les critères du RSB.

De façon générale, il est recommandé de procéder aux travaux correctifs suivants.

À court terme :

- procéder à l'enlèvement des arbres morts dans le bief amont du déversoir;
- corriger l'écoulement du déversoir en aval afin qu'il ne soit plus dirigé vers le pied aval de la digue en terre. Ce correctif devrait inclure le rehaussement, l'imperméabilisation et la protection contre l'érosion du mur guideau existant;
- procéder à un suivi de la condition de zone humide au pied aval de la digue en terre par le biais de visites plus fréquentes au site (ex : crue, étiage, automne).

À moyen terme :

- adoucir la pente du talus aval;
- protéger le pied de talus contre l'érosion;
- aménager un fossé collecteur des écoulements potentiels en pied de talus aval;
- procéder à un contrôle de la végétation (talus amont, crête et talus aval);
- procéder à des travaux de protection contre l'érosion du parement amont jusqu'à la revanche en crête;
- procéder à une intervention au droit du pont de bois traversant le déversoir afin de limiter le risque de restrictions hydrauliques en cas d'obstruction.

Enfin, considérant la nature de la majorité de ces travaux, WSP est d'avis que la réalisation de ceux-ci pourra être effectuée dans le cadre de travaux visant la mise aux normes du barrage. À cet effet, une recommandation en ce sens sera émise.

3.3 ANALYSE DES DONNÉES D'AUSCULTATION

Aucun appareil d'instrumentation n'est présent sur le site du barrage et par conséquent, aucune analyse n'est possible.

3.4 FONCTIONNALITÉ ET FIABILITÉ DES APPAREILS D'ÉVACUATION

Dans le cadre de l'évaluation de la sécurité d'un barrage, la fonctionnalité et la fiabilité des appareils d'évacuation doivent être établies. Cette évaluation est effectuée à l'aide du *Guide sur l'évaluation de la fiabilité des appareils d'évacuation* publié en 2010 par la DSB (DSB, 2010).

L'évacuation des débits est assurée uniquement par un canal déversoir d'environ 2,5 m de largeur et aucune possibilité de gestion des niveaux d'eau n'est possible, limitant ainsi les risques pouvant être associés aux interventions humaines. Toutefois, la fonctionnalité et la fiabilité des appareils d'évacuation sont établies à « **acceptable** » considérant les aspects suivants :

- largeur du déversoir relativement étroite par rapport aux débris potentiels;
- présence de branches et d'un tronc d'arbre observés en amont;
- passerelle au-dessus du déversoir pouvant occasionner ou favoriser une obstruction;
- site accessible en conditions de crues.

4 ANALYSE HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE

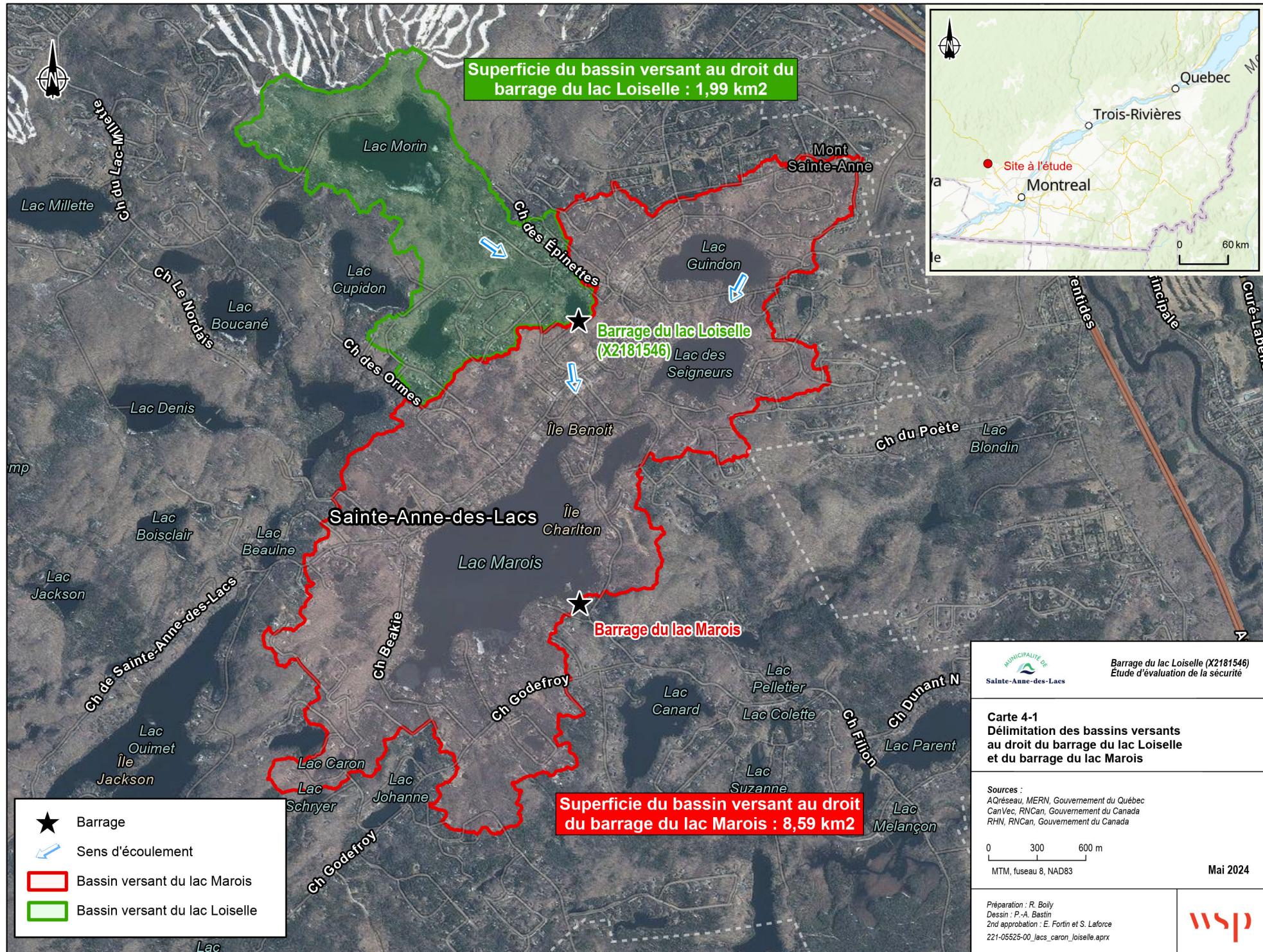
4.1 CARACTÉRISTIQUES DES BASSINS VERSANTS

Selon la fiche technique du barrage du lac Loiselle (annexe A), la superficie du bassin versant au droit de l'ouvrage est de 1,91 km². La délimitation du bassin versant, présentée sur la Carte 4.1, a été validée dans le cadre de la présente étude et la superficie s'établit plutôt à 1,99 km². Ce bassin versant est majoritairement boisé et a un relief plutôt montagneux. Selon les données répertoriées, la superficie des lacs au sein du bassin versant est de 0,31 km² (RNCan, 2021) et celle des milieux humides est de 0,1 km² (Canards Illimités Canada et MELCC, 2020).

Le lac Loiselle se déverse dans un cours d'eau sans nom, lequel se rejette dans le lac Marois à environ 675 m en aval du barrage du lac Loiselle. Le niveau d'eau du lac Marois est contrôlé par un barrage et celui-ci a été retiré du *Répertoire* puisque celui-ci a une hauteur inférieure à un mètre (Otis, 2024). Par conséquent, ce barrage qui portait le numéro X0005018, n'est donc plus considéré comme un barrage au sens de la LSB.

Afin d'évaluer l'atténuation de l'onde de rupture à l'embouchure du cours d'eau sans nom dans le lac Loiselle, WSP a également caractérisé les débits de crues au droit du barrage du lac Marois de manière à obtenir les niveaux de ce lac pour différentes conditions hydrologiques.

Selon l'ancienne fiche technique du barrage du lac Marois, la superficie du bassin versant au droit de ce barrage est de 9,6 km². Toutefois, la délimitation du bassin versant, présentée sur la Carte 4.1, a été validée dans le cadre de la présente étude et la superficie s'établit plutôt à 8,59 km². Ce bassin versant est majoritairement boisé et a un relief plutôt montagneux. Selon les données répertoriées, la superficie des lacs au sein du bassin versant est de 1,66 km² (RNCan, 2021) et celle des milieux humides est de 0,34 km² (Canards Illimités Canada et MELCC, 2020).



4.2 CARACTÉRISATION DES CRUES – MÉTHODE RATIONNELLE

Les débits de crues au droit des barrages du lac Loiselle et du lac Marois ont été calculés avec la méthode rationnelle, telle que décrite dans le *Manuel de conception des ponceaux* du ministère des Transports du Québec (MTQ, 2020). Cette méthode s'applique aux bassins versants d'une superficie inférieure à 25 km².

4.2.1 STATION MÉTÉOROLOGIQUE UTILISÉE

Trois stations hydrométriques ont été considérées pour calculer les intensités de précipitations, soit les stations Saint-Jérôme (n° 7037400), Sainte-Agathe-des-Monts (n° 7036762) et Montréal Mirabel International A (n° 7035290) opérées par Environnement et Changement climatique Canada (2021). La station Saint-Jérôme (n° 7037400) a été retenue, car elle est la plus près du site à l'étude. Les intensités de précipitations ont donc été calculées à partir des données Intensité-Durée-Fréquence (IDF) de cette station. Le Tableau 4.1 présente les caractéristiques des stations météorologiques considérées.

Tableau 4.1 Caractéristiques des stations météorologiques considérées

ID	NOM	ANNÉES D'ENREGISTREMENT	LATITUDE	LONGITUDE	DISTANCE APPROX. DU SITE ⁽¹⁾ (km)	I ⁽²⁾ (mm/h)
7037400	Saint-Jérôme	1971-1999 (24 années)	45,80	-74,05	9,3	48,2
7036762	Sainte-Agathe-des-Monts	1966-1992 (27 années)	46,05	-74,28	24,0	48,7
7035290	Montréal Mirabel International A	1976-2008 (22 années)	45,67	-74,03	23,1	46,3

1. Distance à vol d'oiseau entre la station météorologique et le barrage du lac Loiselle.

2. Intensité de la pluie de durée de 1 h, de récurrence 1 :100 ans.

4.2.2 PARAMÈTRES DE CALCUL

Les paramètres de calculs de la méthode rationnelle pour les bassins versants au droit des barrages du lac Loiselle et du lac Marois sont présentés au Tableau 4.2.

Tableau 4.2 Paramètres de calcul de la méthode rationnelle pour les bassins versants au droit des barrages du lac Loiselle et du lac Marois

PARAMÈTRE	BASSIN VERSANT AU DROIT DU BARRAGE DU LAC LOISELLE	BASSIN VERSANT AU DROIT DU BARRAGE DU LAC MAROIS
Superficie du bassin versant (km ²)	1,99	8,59
Superficies des lacs et milieux humides (km ²)	0,42	2,00
Longueur du cours d'eau (km)	2,98	4,92
Pente 85-10 du cours d'eau (%)	2,2	1,7
Pente moyenne du bassin versant (%)	14,0	14,6
Classification hydrologique des sols (-)	B ⁽¹⁾	B ⁽¹⁾
Coefficient de ruissellement pondéré (-)	0,36	0,39
Temps de concentration (minutes)	102	138
Intensité de précipitation 1 :100 ans (mm/h)	30,6 ⁽²⁾	28,9 ⁽²⁾

1. Selon les cartes de l'IRDA (2008).

2. Pour une durée équivalente au temps de concentration.

4.2.3 DÉBITS DE CRUE

Le Tableau 4.3 et le Tableau 4.4 résument les résultats de la méthode rationnelle pour les bassins versants au droit des barrages du lac Loiselle et du lac Marois, respectivement. Plus précisément, ces tableaux présentent les intensités de précipitations, les débits de pointe et les débits de pointe unitaires. Il est important de noter qu'aucune majoration des débits n'a été effectuée pour tenir compte de l'effet des changements climatiques.

Notons également qu'aucune donnée IDF n'est disponible pour la crue 1 000 ans à la station Saint-Jérôme. Les données IDF utilisées pour calculer l'intensité de pluie et le débit de pointe de la crue de récurrence 1 000 ans ont donc plutôt été calculés par interpolation à partir des données IDF disponibles pour les crues de récurrences 2 ans à 100 ans.

Tableau 4.3 Débits de crue instantanés évacués par le barrage suivant le laminage effectué par le lac Loiselle

PÉRIODE DE RETOUR (année)	INTENSITÉ DE PRÉCIPITATIONS (mm/h)	DÉBIT DE POINTE (m ³ /s)	DÉBIT DE POINTE UNITAIRE (l/s/ha)
2	13,1	1,5	7,71
10	20,9	2,4	12,3
25	24,9	2,9	14,6
50	27,7	3,2	16,3
100	30,6	3,6	18,0
1 000	40,5	4,7	23,8

Tableau 4.4 Débits de crue instantanés évacués par le barrage du lac Marois suivant le laminage effectué par ce lac

PÉRIODE DE RETOUR (année)	INTENSITÉ DE PRÉCIPITATIONS (mm/h)	DÉBIT DE POINTE (m ³ /s)	DÉBIT DE POINTE UNITAIRE (l/s/ha)
2	10,7	5,4	6,23
10	16,9	8,5	9,87
25	20,1	10,1	11,7
50	22,4	11,2	13,1
100	24,7	12,4	14,4
1000	32,6	16,3	19,0

4.2.4 DÉBIT MODULE AU BARRAGE

Le débit module est déterminé à partir des débits d'étiage aux stations hydrométriques du Québec (MELCC, 2022a). La station Doncaster (040129), la station le plus près du site d'étude (26 km), a été retenue pour le calcul de débits d'étiage. Le débit spécifique d'étiage $Q_{2,7}$, représentant le débit d'étiage de sept jours consécutifs d'une période de retour de 2 ans, a été utilisé. Ce débit spécifique est de 3,95 l/s/km², donc les débits modules utilisés pour le lac Loiselle et le lac Marois sont de 0,008 m³/s et 0,034 m³/s respectivement. Ces débits seront utilisés pour représenter le scénario de rupture de l'ouvrage du lac Loiselle en conditions de temps sec.

4.2.5 APPORTS INTERMÉDIAIRES

Une analyse sommaire des apports de débits intermédiaires entre le barrage X2181546 et la limite aval du modèle, soit l'embouchure du lac Marois, a été effectuée. Ces apports ont été jugés négligeables en raison de la faible taille des bassins versants des fossés et cours d'eau intermédiaires comparativement à celle du bassin versant au droit du lac Loiselle.

4.3 GESTION DU BARRAGE

Le seul ouvrage d'évacuation du barrage du lac Loiselle est un canal déversoir s'écoulant à même le roc, sans ouvrages de contrôle. Aucune gestion du barrage n'est donc possible.

4.4 CAPACITÉ D'ÉVACUATION

4.4.1 DÉTERMINATION DE L'ÉLÉVATION DU DÉVERSOIR

Compte tenu que le niveau des conséquences d'une rupture du barrage du lac Loiselle a été déterminé préliminairement à « moyen » ou « important », un relevé topographique et bathymétrique du barrage à l'étude et du secteur en aval a été effectué. En l'absence de plans de construction ou de réparations de l'ouvrage, l'élévation de la crête du déversoir a été

déterminée à l'aide des relevés d'arpentage et suivant les relevés, cette élévation est de 310,86 m.

4.4.2 COURBE D'ÉVACUATION

La Figure 4.1 présente l'élévation approximative des niveaux d'eau dans le réservoir du barrage du lac Loiselle en fonction du débit. Cette courbe a été déterminée selon la géométrie du canal déversoir qui a été détaillée avec les relevés réalisés sur le barrage.

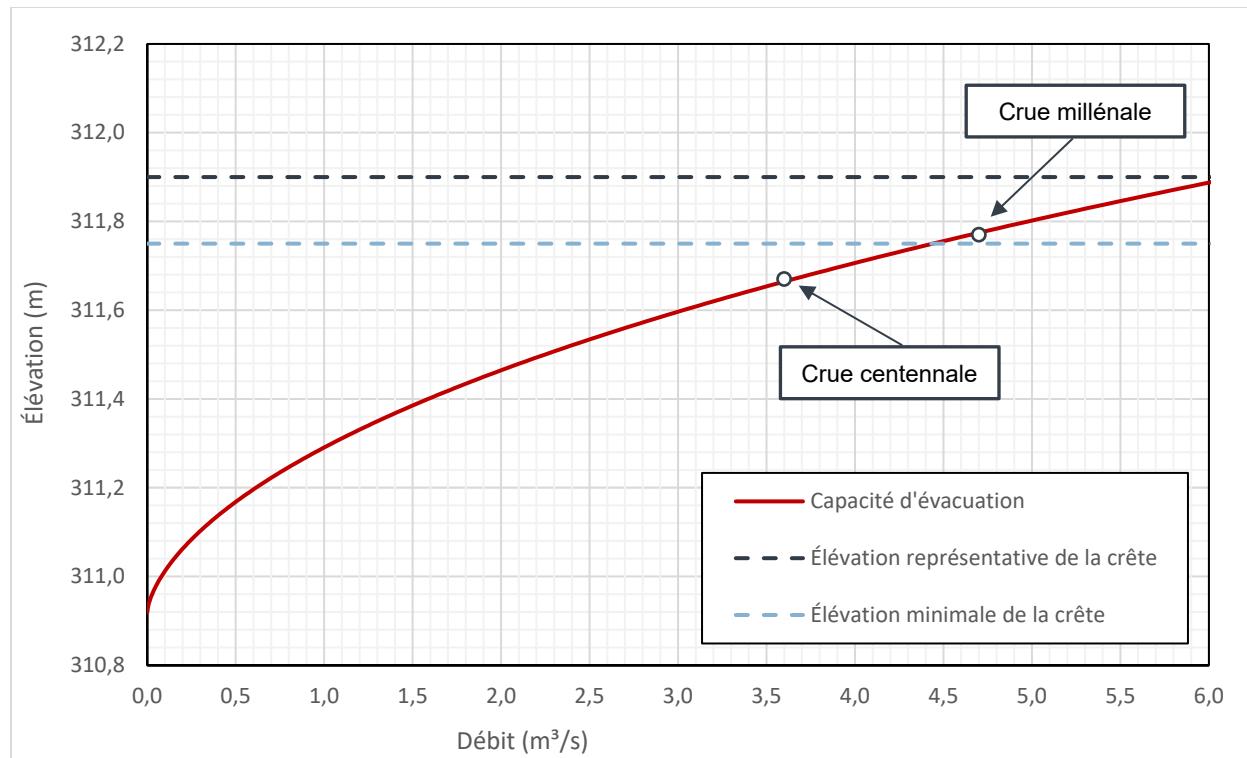


Figure 4.1 Courbe d'évacuation du barrage du lac Loiselle (X2181546)

4.5 CAPACITÉ DE RETENUE

La capacité de retenue du barrage a été calculée en considérant la bathymétrie du lac Loiselle et le niveau associé au débit module soit 310,91 m. La capacité de retenue du barrage est donc évaluée à 53 900 m^3 .

5 ÉTUDE DE RUPTURE

5.1 APPROCHE GLOBALE

Une modélisation hydraulique bidimensionnelle (2D) a été effectuée afin de simuler les effets d'une rupture du barrage du lac Loiselle. Le débit module ainsi que les débits de crues instantanés pour les récurrences centennale et millénale sont d'abord simulées dans le modèle hydraulique afin d'établir les conditions hydrauliques avant rupture. Ensuite, une rupture du barrage est provoquée afin d'analyser la vitesse et l'entendue de la propagation de l'onde de rupture en aval de l'ouvrage.

Des scénarios de rupture sont simulés pour les différentes conditions de crues précédemment identifiées. Étant donné la géométrie et le type de construction du barrage du lac Loiselle, une seule géométrie de brèche a été considérée.

5.2 DÉTERMINATION DU POINT D'ATTÉNUATION

Le lac Marois, situé environ 675 m en aval du barrage du lac Loiselle est considéré comme étant le point d'atténuation puisque qu'il peut laminer de façon importante, voire complètement les crues en aval du barrage à l'étude. Les simulations hydrauliques ont effectivement confirmé cette hypothèse puisque le niveau d'eau dans le lac Marois au droit de son ouvrage de régulation (X0005018) n'est pas influencé par l'onde de rupture en provenance du barrage du lac Loiselle.

5.3 CARACTÉRISATION DU TERRITOIRE EN AVAL

Un inventaire de l'ensemble des éléments et infrastructures situés en aval du barrage du lac Loiselle jusqu'au lac Marois est présenté au Tableau 5.1. Le niveau des conséquences associé à ces éléments est également présenté. Les seuils d'inondation sont déterminés à partir des élévations relevées sur le terrain par WSP lors de la visite du 14 juillet 2022.

Tableau 5.1 Inventaire des éléments et infrastructures situés en aval du barrage du lac Loiselle (X2181546)

ÉLÉMENT	DISTANCE EN AVAL DU BARRAGE (en km)	SEUIL D'INONDATION APPROXIMATIF ¹ (en m)	NIVEAU DES CONSÉQUENCES
Bibliothèque SADL	0,22	302,69	Minimal
Passerelle no. 1 – Parc Henri-Piette, terrain de baseball	0,23	302,48	Minimal
Service des loisirs (723 chemin de Sainte-Anne-des-Lacs)	0,34	302,36	Minimal
Passerelle no. 2 – Parc Henri-Piette, près du service des loisirs (723 chemin Saint-Anne-des-Lacs)	0,35	302,31	Minimal
Ponceau no. 3 – Chemin de Sainte-Anne-des-Lacs	0,38	302,38	Moyen
Commerce <i>Radis Noir</i> – Épicerie écolo	0,38	303,12	Moyen

ÉLÉMENT	DISTANCE EN aval du BARRAGE (en km)	SEUIL D'INONDATION APPROXIMATIF ¹ (en m)	NIVEAU DES CONSÉQUENCES
Garderie <i>La fabrique de petits bonheurs</i>	0,39	310,02	Important
Ponceau no. 4 – Chemin des Merisiers	0,41	302,03	Faible
Ponceau no. 5 - Commerce de portes et fenêtres	0,45	302,57	Minimal
Commerce de portes et fenêtres	0,45	302,92	Moyen
Commerce <i>Matériaux Robert Boyer</i>	0,47	303,80	Moyen
Ponceau no. 6 – Entrée commerciale	0,48	303,15	Minimal
Ponceau no. 7 – Chemin Fournel	0,66	292,08	Faible
Résidences sur les chemins des Martinets, des Noyers, des Noisettes, des Merisiers et Fournel	Variable	Variable	Moyen à important
Chemins des Martinets, des Noyers et des Noisettes (en rive droite du cours d'eau)	Variable	Variable	Faible

1 Déterminé à partir des relevés réalisés sur le terrain

Dans le cadre de la présente étude, puisque la détermination préliminaire du niveau des conséquences est de « moyen » ou « important », un relevé d'arpentage a été effectué sur les éléments suivants :

- structures traversant le tracé de l'émissaire du lac Loiselle en aval du barrage. Ainsi, il a été possible de déterminer le seuil d'inondation des ponts et ponceaux.
- résidences localisées sur le chemin de Sainte-Anne-des-Lacs, le chemin des Merisiers ainsi que sur le chemin Fournel, ce qui a permis de déterminer leur seuil d'inondation.

Étant donné sa classification fonctionnelle de « route collectrice », un niveau de conséquences « moyen » est associé au chemin de Sainte-Anne-des-Lacs. Les autres rues du secteur impacté étant des routes « locales », un niveau de conséquences « faible » leur est associé.

Quant aux rues résidentielles situées de part et d'autre du cours d'eau à l'étude entre le barrage du lac Loiselle et le lac Marois, un niveau des conséquences « moyen » est attribué dès qu'une résidence est affectée. Le niveau des conséquences passerait à « important » advenant que l'inondation incrémentale affecte 10 maisons ou plus. Les adresses suivantes pourraient potentiellement être impactées par la rupture du barrage :

- 724, 736 et 740, chemin de Sainte-Anne-des-Lacs;
- 15, chemin des Merisiers;
- 13, 17 et 25 chemin Fournel.

5.4 CALCULS HYDRAULIQUES

5.4.1 DESCRIPTION DU MODÈLE HYDRAULIQUE NUMÉRIQUE

La modélisation hydraulique de la propagation de l'onde de rupture a été effectuée à l'aide du logiciel HEC-RAS 2D, version 6.2 développée par le U.S. Army Corps of Engineers (USACE, 2022). Le logiciel résout les équations de Saint-Venant en deux dimensions, faisant appel à l'approche par volume fini. L'application de HEC-RAS requiert une discréétisation spatiale du domaine de calcul en un maillage composé de cellules de forme généralement régulière.

Le domaine modélisé, délimité à l'annexe D, s'étend de la limite amont du réservoir du barrage du lac Loiselle, environ 225 m en amont du barrage, jusqu'au lac Marois, près de l'embouchure, soit une distance totale de près de 1,2 km. Les cellules sur la plaine inondable ont une dimension de 10 m x 10 m alors que celles couvrant l'écoulement principal de la rivière sont de 2 m x 2 m. Des zones de raffinement de 2 m x 2 m ont été ajoutées au droit du barrage sur des distances 40 m en amont et 40 m en aval afin de bien représenter le phénomène de rupture.

Le domaine de calcul compte une condition limite en amont représentant les débits estimés au droit du barrage ainsi qu'une condition limite en aval correspondant au niveau d'eau dans le lac Marois pour les débits étudiés. Ces niveaux d'eau ont été établis à la suite de simulations au droit du barrage du lac Marois, lequel a été intégré à la géométrie du modèle hydraulique.

Le modèle numérique de terrain (MNT) sous-jacent au modèle hydraulique a été créé à partir du modèle numérique de terrain avec une résolution au 1 m fourni par le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP, 2022). Le MNT n'a pas été creusé pour représenter la bathymétrie du cours d'eau en aval du barrage du lac Loiselle, ce qui est conservateur quant à la vitesse de propagation de l'onde de rupture, au laminage du débit de brèche et au rehaussement des niveaux d'eau associés. Le MNT a toutefois été creusé dans le lac Loiselle pour représenter le stockage derrière l'ouvrage de retenue et ainsi maximiser le débit de brèche. La bathymétrie du lac Marois a également été intégrée au MNT pour estimer de façon plus précise l'effet de laminage de l'onde de rupture à l'embouchure du cours d'eau. Enfin, les coefficients de frottement (n de Manning) dans le domaine d'étude ont été définis tels que présentés au Tableau 5.2 .

Tableau 5.2 Coefficients de Manning selon le type de surface

TYPE DE SURFACE	COEFFICIENT DE MANNING (-)
Lit du cours d'eau	0,025
Berges du cours d'eau	0,080
Secteur résidentiel à faible densité	0,100
Lac	0,010
Terrain de baseball	0,020

Les coefficients de Manning ont été déterminés d'après les observations visuelles du lit d'écoulement et des berges et en se basant sur les valeurs de référence de l'ouvrage « Open-Channel Hydraulics » (Chow V.T., 1959).

5.4.2 VALIDATION DU MODÈLE HYDRAULIQUE

Aucune validation du modèle hydraulique n'a été réalisée pour les conditions d'eau du jour, pouvant correspondre aux conditions en temps sec. De plus, il n'est pas possible de calibrer le modèle pour s'assurer que les niveaux d'eau en fonction des débits simulés soient représentatifs des conditions réelles en conditions de crue de récurrence 100 ans et 1 000 ans.

Les hypothèses utilisées dans la présente analyse sont toutefois jugées conservatrices, notamment quant aux niveaux d'eau des lacs Marois et Loiselle. En effet, le choix du coefficient de déversoir permet de maximiser le niveau d'eau dans le lac Loiselle, ce qui maximise par le fait même le débit de brèche en conditions de rupture.

5.4.3 SCÉNARIOS ÉTUDIÉS

Afin de déterminer la crue de sécurité du barrage, plusieurs scénarios comportant différents débits de crues sont étudiés. La crue de sécurité est déterminée en fonction du niveau le plus élevé des conséquences d'une rupture du barrage, considérant uniquement les conséquences incrémentales, c'est-à-dire attribuables à l'onde de rupture, et non aux inondations précédant l'arrivée de l'onde de rupture. Ainsi, pour chaque scénario de crue, le niveau des conséquences de la rupture est évalué. Les différents scénarios sont présentés au Tableau 5.3.

Chaque scénario inclut d'abord une simulation en régime permanent de la crue sans rupture, puis une seconde simulation démarrant dans ces conditions avec une rupture initiée au barrage du lac Loiselle.

Tableau 5.3 Scénarios étudiés pour la caractérisation du niveau des conséquences associés à la rupture

SCÉNARIO	CONDITION DU BARRAGE	CONDITION D'ÉCOULEMENT
Temps sec	Avec et sans rupture	Débit module
Crue 100 ans	Avec et sans rupture	Crue 100 ans
Crue 1 000 ans	Avec et sans rupture	Crue 1 000 ans

5.4.4 CARACTÉRISTIQUES DE LA BRÈCHE

La brèche simulée correspond à un cas critique pouvant survenir et causant le débit de brèche maximal. Une brèche complète de forme trapézoïdale est reproduite dans le barrage du lac Loiselle avec les caractéristiques présentées au Tableau 5.4 et illustrée à la Figure 5.1. Les hypothèses usuelles pour les ouvrages en terre ont été appliquées pour définir sa géométrie, en optant pour les plus conservatrices (celles qui libèrent le plus d'eau). Notamment, le développement de la brèche se produit en 30 minutes et sa largeur à la base est égale à quatre fois la hauteur au droit de l'axe de la digue, avec des pentes 1:1. Enfin, l'élévation de la base de la brèche (304,60 m) correspond au niveau du terrain naturel au pied aval de la digue. Suivant les investigations géotechniques, il appert que le profil du roc se situe sous cette élévation et par conséquent, le développement d'une brèche jusqu'à cette élévation est possible.

Afin d'utiliser les hypothèses les plus conservatrices possible, le modèle numérique de terrain a été artificiellement creusé en aval du barrage de manière à assurer un écoulement avec le moins de restrictions possible dans la section de cascades.

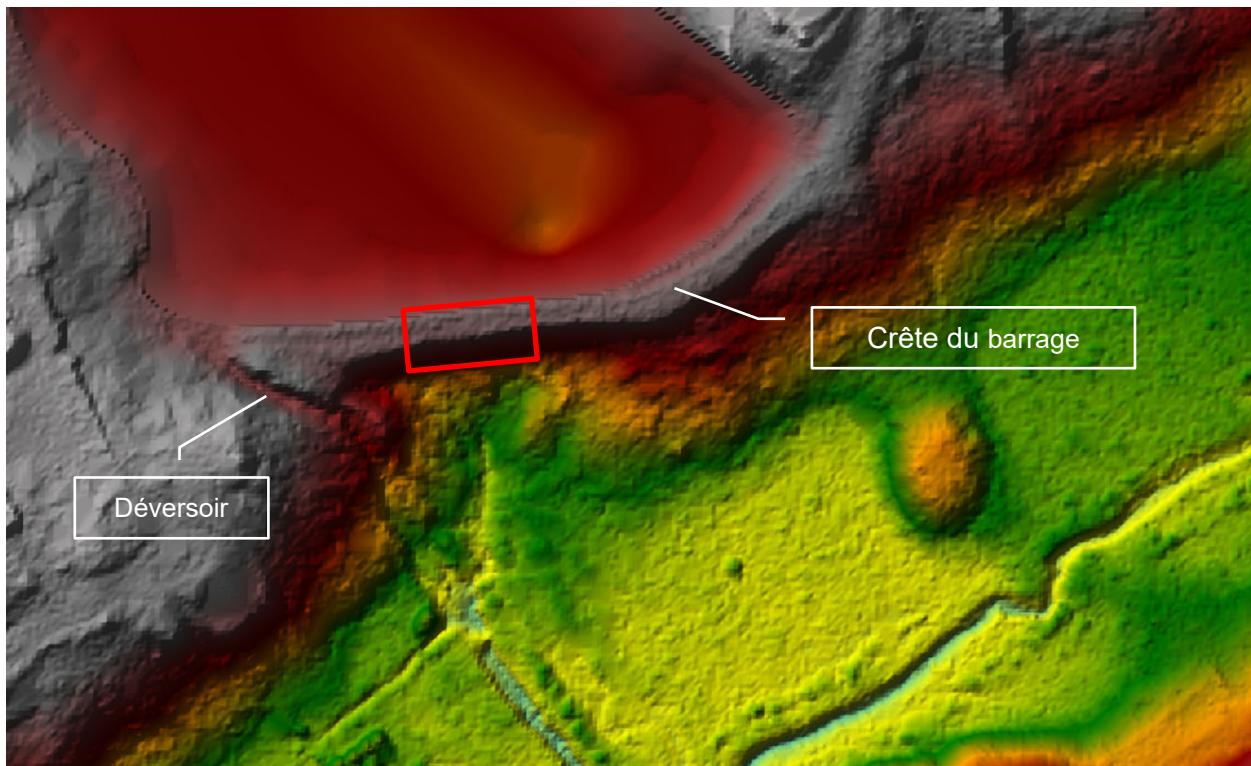


Figure 5.1 Représentation simplifiée de la brèche (encadré) au barrage du lac Loiselle

Tableau 5.4 Caractéristiques de la brèche simulée au barrage du lac Loiselle

CARACTÉRISTIQUE	VALEUR
Type de barrage	Digue en terre
Mode de rupture	Érosion
Forme de la brèche	Trapézoïdale
Élévation moyenne en crête	311,90 m
Élévation moyenne à la base	304,60 m
Hauteur de la brèche	7,30 m
Largeur à la base	29,2 m ¹
Pentes des côtés	1 : 1
Temps de formation	30 minutes

1. Conforme aux hypothèses de Marche (2008).

5.5 RÉSULTATS DE LA PROPAGATION DE L'ONDE DE RUPTURE

Les résultats de chacun des scénarios étudiés sont présentés aux sous-sections suivantes. Différents niveaux d'eau avant et après rupture sont extraits le long du tronçon modélisé, plus particulièrement aux points d'intérêt identifiés au Tableau 5.1.

Il est important de rappeler que les seuls éléments ou infrastructure pouvant faire passer le niveau des conséquences à « important » en cas de dommages sont la garderie *La fabrique de petits bonheurs* ainsi les chemins de Sainte-Anne-des-Lacs, des Martinets, des Noyers, des Noisettes, du Laurier, des Merisiers et Fournel dans le cas où un minimum de dix maisons se trouvent affectées par la rupture.

5.5.1 SCÉNARIO 1 – RUPTURE EN TEMPS SEC

5.5.1.1 CONDITIONS NORMALES

Les apports au réservoir du barrage du lac Loiselle demeurent constants pendant toute la durée de la simulation. Il s'agit du débit module calculé au droit du barrage. Le niveau du réservoir du lac Loiselle se situe à une élévation de 310,9 m et celui du lac Marois à une élévation de 290,52 m.

5.5.1.2 PROPAGATION DE L'ONDE DE RUPTURE

Pour ce scénario en temps sec (débit module), la rupture du barrage du lac Loiselle occasionne les rehaussements des niveaux d'eau les plus importants des trois scénarios simulés, soit un rehaussement de plus de 2 m à certains endroits sur le cours d'eau. Ce rehaussement entraîne des dommages incrémentaux à presque tous les éléments listés, à l'exception de la garderie et du commerce *Matériaux Robert Boyer*. Dans ce scénario, l'onde de rupture affecte trois (3) résidences en aval du barrage, soit le 736, chemin de Sainte-Anne-des-Lacs et les adresses civiques 14 et 25 sur le chemin Fournel. Le Tableau 5.5 présente les niveaux d'eau pour le scénario de la rupture en temps sec.

Tableau 5.5 Niveaux d'eau pour le scénario de rupture en temps sec

PK	LOCALISATION	NIVEAU D'EAU (m)			AFFECTÉ PAR LA RUPTURE (OUI / NON)
		INITIAL	MAX. (RUPTURE)	ΔH MAX	
0,00	Barrage X2181546	310,91	-	-	-
0,22	Bibliothèque de Sainte-Anne-des-Lacs	302,09	303,60	1,51	Oui
0,23	Passerelle no. 1 – Parc Henri-Piette, terrain de baseball	301,95	303,72	1,77	Oui
0,34	Service des loisirs (723 chemin de Sainte-Anne-des-Lacs)	301,87	303,59	1,72	Oui
0,35	Passerelle no. 2 – Parc Henri-Piette, près du service des loisirs (723 chemin Saint-Anne-des-Lacs)	301,82	303,59	1,77	Oui
0,38	Ponceau no. 3 – Chemin de Sainte-Anne-des-Lacs	301,35	303,59	2,24	Oui
0,38	Commerce <i>Radis Noir – Épicerie écolo</i>	301,29	303,59	2,30	Oui
0,39	Garderie <i>La fabrique de petits bonheurs</i>	301,29	303,59	2,30	Non
0,41	Ponceau no. 4 – Chemin des Merisiers	301,29	303,59	2,30	Oui
0,45	Ponceau no. 5 - Commerce de portes et fenêtres	301,27	303,56	2,30	Oui
0,45	Commerce de portes et fenêtres	301,27	303,58	2,31	Oui
0,47	Commerce <i>Matériaux Robert Boyer</i>	301,25	303,53	2,28	Non
0,48	Ponceau no. 6 – Entrée commerciale	300,72	303,48	2,76	Oui
0,66	Ponceau no. 7 – Chemin Fournel	290,98	292,67	1,69	Oui
-	Résidences sur les chemins des Martinets, des Noyers, des Noisettes, des Merisiers et Fournel	Variable			Oui, 3 résidences affectées
-	Chemins des Martinets, des Noyers et des Noisettes (en rive droite du cours d'eau)	Variable			Oui

Note : Les cellules ombragées représentent les éléments qui sont inondés lors de l'événement étudié.

5.5.2 SCÉNARIO 2 – RUPTURE EN CRUE DE RÉCURRENCE 100 ANS

5.5.2.1 CONDITIONS INITIALES

Dans ce scénario en crue de récurrence 100 ans, le niveau d'eau dans le réservoir du barrage du lac Loiselle se situe à 311,67 m et les apports correspondent au débit de la crue centennale. Le niveau d'eau dans le lac Marois est à 291,16 m lors de cette crue. Dans ces conditions de crue sans rupture, certains éléments en aval du barrage du lac Loiselle sont déjà inondés, dont deux résidences, soit le 736, chemin de Sainte-Anne-des-Lacs et l'adresse civique 25 sur le chemin Fournel.

À noter qu'à partir du ponceau sous l'entrée du commerce de portes et fenêtres, les niveaux d'eau restent similaires sur une distance de plus de 200 m suivant le tracé du cours d'eau, ce qui peut laisser croire que ce ponceau crée une restriction qui engendre ce refoulement.

5.5.2.2 PROPAGATION DE L'ONDE DE RUPTURE

En conditions de crue de récurrence 100 ans, la rupture du barrage du lac Loiselle occasionne des dommages incrémentaux au ponceau no. 6 (sous l'entrée commerciale), au commerce *Matériaux Robert Boyer* ainsi qu'à deux (2) résidences en aval du barrage, soit les adresses civiques 14 et 17 sur le chemin Fournel. Le tableau 5.6 présente les niveaux d'eau pour le scénario de la rupture en crue centennale.

Tableau 5.6 Niveaux d'eau pour le scénario de rupture en crue de récurrence 100 ans

PK	LOCALISATION	NIVEAU D'EAU (m)			AFFECTÉ PAR LA RUPTURE (OUI / NON)
		INITIAL	MAX. (RUPTURE)	ΔH MAX	
0,00	Barrage X2181546	311,67	-	-	-
0,22	Bibliothèque de Sainte-Anne-des-Lacs	303,15	304,05	0,90	Non (déjà affectée)
0,23	Passerelle no. 1 – Parc Henri-Piette, terrain de baseball	303,16	304,07	0,91	Non (déjà affectée)
0,34	Service des loisirs (723 chemin de Sainte-Anne-des-Lacs)	303,15	304,05	0,90	Non (déjà affectée)
0,35	Passerelle no. 2 – Parc Henri-Piette, près du service des loisirs (723 chemin Saint-Anne-des-Lacs)	303,15	304,05	0,90	Non (déjà affectée)
0,38	Ponceau no. 3 – Chemin de Sainte-Anne-des-Lacs	303,15	304,04	0,89	Non (déjà affectée)
0,38	Commerce <i>Radis Noir – Épicerie écolo</i>	303,15	304,05	0,90	Non (déjà affectée)
0,39	Garderie <i>La fabrique de petits bonheurs</i>	303,15	304,05	0,90	Non
0,41	Ponceau no. 4 – Chemin des Merisiers	303,15	304,04	0,89	Non (déjà affectée)
0,45	Ponceau no. 5 - Commerce de portes et fenêtres	303,15	304,00	0,85	Non (déjà affectée)
0,45	Commerce de portes et fenêtres	303,15	304,03	0,88	Non (déjà affectée)
0,47	Commerce <i>Matériaux Robert Boyer</i>	303,13	303,99	0,86	Oui
0,48	Ponceau no. 6 – Entrée commerciale	303,13	303,87	0,74	Oui
0,66	Ponceau no. 7 – Chemin Fournel	292,23	293,12	0,89	Non (déjà affectée)
-	Résidences sur les chemins des Martinets, des Noyers, des Noisettes, des Merisiers et Fournel	Variable			Oui, 2 résidences affectées
-	Chemins des Martinets, des Noyers et des Noisettes (en rive droite du cours d'eau)	Variable			Oui

Note : Les cellules ombragées représentent les éléments qui sont inondés lors de l'événement étudié.

5.5.3 SCÉNARIO 3 – RUPTURE EN CRUE DE RÉCURRENCE 1 000 ANS

5.5.3.1 CONDITIONS NORMALES

Dans ce scénario en crue de récurrence 1 000 ans, le niveau d'eau dans le réservoir du barrage du lac Loiselle se situe à 311,77 m et celui du lac Marois est à 291,26 m. À cette élévation, le point bas de la crête du barrage est submergé et occasionne un déversement d'environ 0,3 m³/s. Les apports correspondant à la crue millénale sont injectés de façon constante dans le modèle.

À noter qu'à partir du ponceau sous l'entrée du commerce de portes et fenêtres, les niveaux d'eau restent similaires sur une distance de plus de 200 m suivant le tracé du cours d'eau, ce qui peut laisser croire que ce ponceau crée une restriction qui engendre ce refoulement.

5.5.3.2 PROPAGATION DE L'ONDE DE RUPTURE

Les résultats de ce scénario sont très similaires à ceux du scénario de rupture en crue 100 ans, à l'exception du ponceau no. 6, sous l'entrée commerciale, qui se retrouve déjà inondé avant le passage de l'onde de rupture. Même lors de cet événement millénal, la garderie n'est pas affectée, tant par la rupture qu'en conditions sans rupture. Le tableau 5.7 présente les niveaux d'eau, avec et sans rupture, en crue millénale.

Tableau 5.7 Niveaux d'eau pour le scénario de rupture en crue de récurrence 1 000 ans

PK	LOCALISATION	NIVEAU D'EAU (m)			AFFECTÉ PAR LA RUPTURE?
		INITIAL	MAX. (RUPTURE)	ΔH MAX	
0,00	Barrage X2181546	311,77	-	-	-
0,22	Bibliothèque de Sainte-Anne-des-Lacs	303,26	304,13	0,87	Non (déjà affectée)
0,23	Passerelle no. 1 – Parc Henri-Piette, terrain de baseball	303,27	304,15	0,88	Non (déjà affectée)
0,34	Service des loisirs (723 chemin de Sainte-Anne-des-Lacs)	303,26	304,12	0,86	Non (déjà affectée)
0,35	Passerelle no. 2 – Parc Henri-Piette, près du service des loisirs (723 chemin Saint-Anne-des-Lacs)	303,26	304,14	0,88	Non (déjà affectée)
0,38	Ponceau no. 3 – Chemin de Sainte-Anne-des-Lacs	303,26	304,13	0,86	Non (déjà affectée)
0,38	Commerce <i>Radis Noir – Épicerie écolo</i>	303,26	304,12	0,86	Non (déjà affectée)
0,39	Garderie <i>La fabrique de petits bonheurs</i>	303,26	304,12	0,86	Non
0,41	Ponceau no. 4 – Chemin des Merisiers	303,26	304,11	0,85	Non (déjà affectée)
0,45	Ponceau no. 5 - Commerce de portes et fenêtres	303,26	304,07	0,81	Non (déjà affectée)
0,45	Commerce de portes et fenêtres	303,26	304,10	0,84	Non (déjà affectée)
0,47	Commerce <i>Matériaux Robert Boyer</i>	303,24	304,06	0,82	Oui
0,48	Ponceau no. 6 – Entrée commerciale	303,23	303,95	0,72	Non (déjà affectée)
0,66	Ponceau no. 7 – Chemin Fournel	292,30	293,20	0,90	Non (déjà affectée)
-	Résidences sur les chemins des Martinets, des Noyers, des Noisettes, des Merisiers et Fournel	Variable			Oui, 2 résidences affectées
-	Chemins des Martinets, des Noyers et des Noisettes (en rive droite du cours d'eau)	Variable			Oui

Note : Les cellules ombragées représentent les éléments qui sont inondés lors de l'événement étudié.

6 NIVEAU DES CONSÉQUENCES

Ce chapitre vise à déterminer plus spécifiquement le niveau des conséquences associé au barrage du lac Loiselle. Le niveau des conséquences, lequel peut être qualifié de « minimal » à « considérable », est lié à l'importance des éléments affectés par la modification des conditions hydrauliques (variation des niveaux d'eau et des vitesses de l'écoulement) causée par l'arrivée de l'onde de rupture. L'annexe V du RSB spécifie certains éléments pour l'attribution du niveau des conséquences.

Le tableau 6.1 présente une synthèse des éléments qui sont affectés de façon incrémentale lors de la rupture du barrage du lac Loiselle pour au moins un des scénarios de crue étudiés, ainsi que le niveau des conséquences qui lui est associé.

Tableau 6.1 Éléments affectés par la rupture du barrage du lac Loiselle

ÉLÉMENT	NIVEAU DES CONSÉQUENCES
Bibliothèque de Sainte-Anne-des-Lacs	Minimal
Passerelle no. 1 – Parc Henri-Piette, terrain de baseball	Minimal
Service des loisirs (723 chemin de Sainte-Anne-des-Lacs)	Moyen
Passerelle no. 2 – Parc Henri-Piette, près du service des loisirs (723 chemin Saint-Anne-des-Lacs)	Minimal
Ponceau no. 3 – Chemin de Sainte-Anne-des-Lacs	Moyen
Commerce <i>Radis Noir – Épicerie écolo</i>	Moyen
Ponceau no. 4 – Chemin des Merisiers	Faible
Ponceau no. 5 - Commerce de portes et fenêtres	Minimal
Commerce de portes et fenêtres	Moyen
Commerce <i>Matériaux Robert Boyer</i>	Moyen
Ponceau no. 6 – Entrée commerciale	Minimal
Ponceau no. 7 – Chemin Fournel	Faible
Résidences sur les chemins des Martinets, des Noyers, des Noisettes, des Merisiers et Fournel	Moyen
Chemins des Martinets, des Noyers et des Noisettes (en rive droite du cours d'eau)	Faible

Considérant les éléments impactés dans le tableau précédent et sur la base des calculs et des hypothèses émises dans cette étude, le niveau des conséquences du barrage du lac Loiselle (X2181546) est établi à « moyen ».

7 CRUE DE SÉCURITÉ

7.1 INTRODUCTION

Les sections suivantes visent à déterminer la crue de sécurité associée au barrage du lac Loiselle. Conformément à la LSB, la crue de sécurité associée à un ouvrage est déterminée à l'aide des articles 21 et 21.1 du RSB et en fonction du niveau des conséquences attribuable à une rupture en crue. L'établissement de la crue de sécurité tient aussi compte de la capacité d'évacuation des ouvrages qui pourrait se situer en amont de l'ouvrage étudié (RSB, art. 22). La crue de sécurité peut être établie en regard aux barrages situés sur le pourtour du même réservoir (RSB, art. 24). Enfin, il importe de mentionner que l'article 23 a été abrogé lors de la modification réglementaire datée du 29 octobre 2014.

7.2 CRUE DE SÉCURITÉ DU BARRAGE DU LAC LOISELLE

7.2.1 APPLICATION DE L'ARTICLE 21 DU RSB

Considérant que le niveau des conséquences du barrage du lac Loiselle est « moyen », la crue de sécurité correspond à la crue millénale (référence 1 000 ans).

7.2.2 APPLICATION DE L'ARTICLE 21.1 DU RSB

L'article 21.1 du RSB mentionne que « la crue de sécurité d'un barrage peut être moindre que celle établie en vertu de l'article 21, sans toutefois être inférieure à la crue centennale, si un ingénieur atteste que la rupture du barrage lors d'une telle crue entraînerait des conséquences d'un niveau moins élevé que celui déterminé en application de l'article 19 ».

Les études de rupture en conditions de crues centennale et millénale ont mené à un niveau des conséquences identique, soit « Moyen ». Par conséquent, la crue de sécurité ne peut pas être moindre que celle établie en vertu de l'article 21. Par conséquent, suivant cet article, la crue de sécurité demeure la crue millénale.

7.2.3 APPLICATION DE L'ARTICLE 22 DU RSB

Aucun barrage n'est localisé en amont du barrage du lac Loiselle. Par conséquent, cet article ne s'applique pas.

7.2.4 APPLICATION DE L'ARTICLE 23 DU RSB

Cet article a été abrogé lors de l'édition du règlement modifiant le RSB et celui-ci ne s'applique donc plus.

7.2.5 APPLICATION DE L'ARTICLE 24 DU RSB

Selon l'article 24 du RSB, « il n'y a qu'une seule crue applicable pour l'ensemble des barrages situés sur le pourtour d'un même réservoir. La crue alors applicable est celle du barrage dont la crue de sécurité, établie en application de l'article 21, 21.1 ou 22, est la plus élevée. » Cet article ne s'applique pas, car aucun autre barrage n'est érigé sur le pourtour du lac Loiselle.

7.2.6 CRUE DE SÉCURITÉ DU BARRAGE DU LAC LOISELLE

Suivant l'application des différents articles du RSB, la crue de sécurité pour le barrage du lac Loiselle est la crue de récurrence millénale (référence 1 000 ans), soit un débit maximal déversé de 4,7 m³/s. Considérant qu'aucune gestion de l'ouvrage n'est effectuée, le niveau atteint dans le réservoir en amont du barrage au passage de cette crue est estimé à l'élévation 311,77 m. L'annexe D présente la carte de la zone d'inondation suivant la rupture en crue de récurrence 1 000 ans, soit la crue de sécurité.

7.3 REVANCHE HYDRAULIQUE

Le niveau atteint au passage de la crue de sécurité est de 311,77 m. Par ailleurs, selon les relevés effectués sur la crête du barrage, un point bas local sera situé à une élévation de 311,7 m sur la crête. Selon les hypothèses utilisées pour la modélisation de l'ouvrage de retenue, le niveau d'eau pour la crue millénale engendrerait un débordement du barrage, ce qui implique que l'ouvrage ne dispose d'aucune revanche hydraulique à cet endroit. WSP est donc d'avis que le barrage du lac Loiselle présente une revanche hydraulique insuffisante dans son état actuel.

7.4 ANALYSE DU POURTOUR DU RÉSERVOIR

Conformément à l'article 48 du RSB, une analyse de la topographie et du pourtour du réservoir du barrage du lac Loiselle. Ainsi, le niveau atteint au passage de la crue de sécurité de récurrence millénale au barrage est de 311,79 m. L'étude du modèle numérique de terrain du secteur permet d'établir que la topographie autour du lac Loiselle empêche tout contournement. Ainsi, l'analyse du pourtour du réservoir permet d'établir que le seul point de débordement se situe au droit du barrage du lac Loiselle (X2181546).

7.5 RÉSUMÉ DES CARACTÉRISTIQUES HYDROLOGIQUES ET HYDRAULIQUES

L'analyse du modèle numérique de terrain et les analyses hydrologiques et hydrauliques réalisées font ressortir les points suivants :

1. l'étude de rupture permet d'établir que le niveau des conséquences est « moyen » et la crue de sécurité correspond à la crue de récurrence de 1 : 1 000 ans;
2. la capacité d'évacuation du barrage ne permet pas de contenir la crue de sécurité, car un déversement sur la crête est anticipé en conditions de crue millénale.

3. la revanche associée à la digue du barrage, susceptible d'érosion, est jugée insuffisante;
4. la fiabilité et la fonctionnalité de l'appareil d'évacuation sont établies à « acceptable ».

Pour faire suite à la problématique associée à la revanche insuffisante, des recommandations seront émises lorsque l'étude d'évaluation de la sécurité sera complétée.

8 STABILITÉ DU BARRAGE

8.1 REVUE DE LA DOCUMENTATION EXISTANTE

Le Tableau 8.1 présente la liste des intrants consultés dans le cadre de l'analyse de stabilité du barrage du lac Loiselle.

Tableau 8.1 Liste des intrants consultés dans le cadre de l'analyse de stabilité

TYPE DE DONNÉES	TITRE	SOURCE	DATE
Rapport et étude	<i>Rapport de visite - Recensement</i>	MELCCFP	2021
	<i>Rapport de caractérisation écologique du milieu naturel</i>	ABS	2022
	<i>Rapport d'inspection du barrage du lac Loiselle</i>	WSP	2022
	<i>Étude d'évaluation du niveau de conséquence</i>	WSP	2022
	<i>Rapport technique de caractérisation géophysique et géotechnique du barrage du lac Loiselle</i>	Geostack	2024
Topographie/bathymétrie	<i>Carte topographique du Canada à l'échelle de 1 :50 000, 31 G/16 East, Shawbridge</i>	BANQ, 2024	1959
	<i>Bathymétrie du lac Loiselle</i>	Université de Montréal	2009
	<i>Relevés d'arpentage</i>	WSP	2022

8.1.1 SYNTHÈSE DE LA STRATIGRAPHIE OBSERVÉE

Les travaux d'investigation géotechniques réalisés comprennent deux forages, intitulés F-1-2024 et F-2-2024 (Geostack, 2024), tous deux situés à l'extrême est de la digue. Les forages ont été réalisés en crête. Une mince couche de sol organique de 0,48 m de profondeur a été interceptée au droit de F-1-2024 avant d'atteindre le roc.

Une couche de sol organique de 0,74 m d'épaisseur a été observée en surface du forage F-2-2024. Sous cette couche, entre 0,74 et 1,83 m de profondeur, un remblai de silt et sable avec traces d'argile et de gravier, lâche à compact a été observé. Un horizon très lâche composé de silt et sable comprenant des sols organiques saturés a ensuite été rencontré entre 1,83 m et 2,54 m de profondeur. Un dépôt naturel lâche à compact de silt et de sable avec des traces à un peu de gravier et des traces d'argile a ensuite été intercepté entre 2,54 m et 3,30 m de profondeur. Finalement, le roc a été intercepté à une profondeur de 3,30 m.

Le socle rocheux, de nature gneissique, a été carotté au sein des deux forages sur une épaisseur de plus de deux mètres. Sa qualité est mauvaise à bonne selon les indices RQD mesurés.

Le rapport géotechnique (Geostack, 2024) est présenté à l'annexe H.

8.1.2 EAU SOUTERRAINE

L'installation d'un piézomètre de type Casagrande a été effectuée au sein du forage F-2-2024.

La lecture du niveau de l'eau dans ce piézomètre le lendemain des travaux de forage correspond à une élévation de 310,32 m. Aucune autre mesure n'est disponible au moment de la rédaction de ce rapport.

8.1.3 LEVÉS GÉOPHYSIQUES

Un levé par sismique combinée a été effectué en crête du barrage et comprend le traitement des données par MASW et par sismique réfraction. Ce levé s'étend en crête de la digue sur une distance de 142 m.

D'abord, le traitement par sismique réfraction permet la production d'un modèle 2D de vitesse des ondes de compression (V_p), par lequel le profil du socle rocheux peut être estimé. En second lieu, le traitement par MASW vise à établir un modèle 2D des ondes de cisaillement (V_s), afin d'interpréter l'horizon supérieur du dépôt naturel. La combinaison de ces données avec les résultats des investigations géotechniques permet d'apprécier le profil des différents horizons stratigraphiques sous la ligne de levé. Les Figures 8.1 et 8.2 présentent les modèles produits par Geostack (2024) selon les deux méthodes d'analyse. Le rapport complet est disponible à l'annexe I.

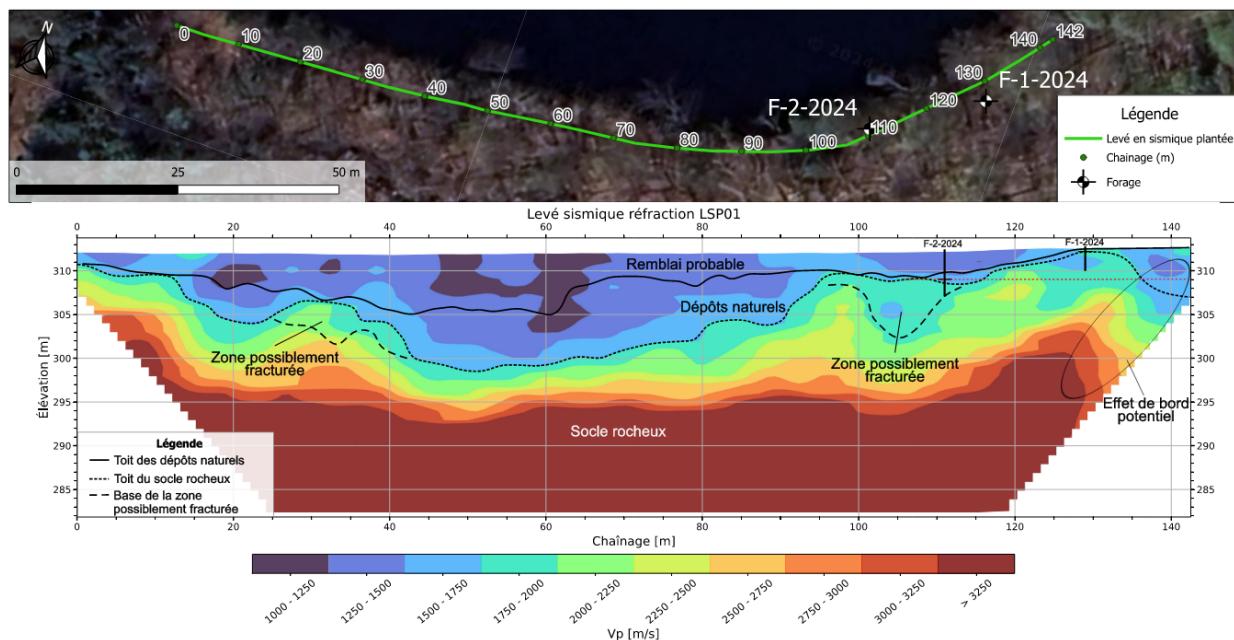


Figure 8.1 Interprétation du levé en sismique réfraction

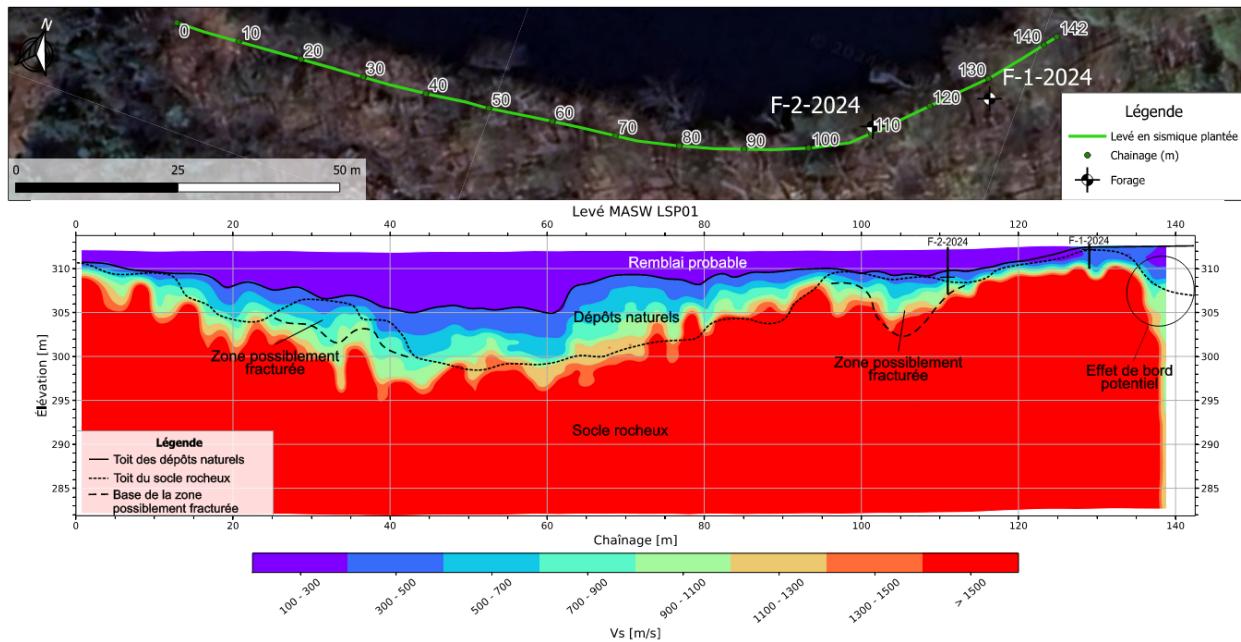


Figure 8.2 Interprétation du levé en MASW2D

L'interprétation de l'étude géophysique permet d'apprécier les épaisseurs probables de remblai et de sol naturel sur tout le linéaire de l'ouvrage. La compacité des remblais de la digue semble homogène selon l'interprétation des données géophysique.

8.2 ANALYSE D'ÉCOULEMENT

8.2.1 MÉTHODOLOGIE

Des modélisations de l'écoulement par la méthode des éléments finis ont été réalisées à l'aide du logiciel SEEP/W de la suite GeoStudio 2023. Cette modélisation a permis d'estimer la position potentielle de la surface d'écoulement libre à travers le barrage, laquelle est utilisée comme intrant dans les analyses de stabilité. Notons qu'il est possible avec ce type d'analyse d'extraire des modèles produits d'autres caractéristiques associées à la dynamique d'écoulement interne, tels que les vitesses d'écoulement, les pressions interstitielles et les gradients hydrauliques. Toutefois, l'utilisation de ces données ne s'avère raisonnable que lorsque l'utilisateur a un niveau de confiance élevé par rapport au modèle soumis. Dans le cas du barrage Loiselle, comme les informations sont limitées quant à la constitution du barrage, à son homogénéité linéaire ainsi qu'aux propriétés géométriques des matériaux, ces analyses plus poussées ne sont pas nécessairement représentatives des conditions in situ.

Les analyses d'écoulement ont été réalisées pour des niveaux d'eau amont correspondant au niveau normal d'exploitation (310,91 m) et à celui de la crue de sécurité millénale (311,77 m).

Les modèles produits sont basés sur l'hypothèse que les différents matériaux constituant le barrage et sa fondation sont homogènes et isotropes.

8.2.2 COUPES TYPES ÉTUDIÉES

Trois coupes différentes ont été étudiées dans le cadre des analyses. Leurs géométries respectives ont été définies selon les données spatiales recueillies lors des relevés d'arpentage effectués conjointement à l'inspection du barrage Loiselle, ainsi qu'à l'aide d'une carte bathymétrique produite par l'Université de Montréal en 2009. La Figure 8.3 illustre l'emplacement de ces trois sections.

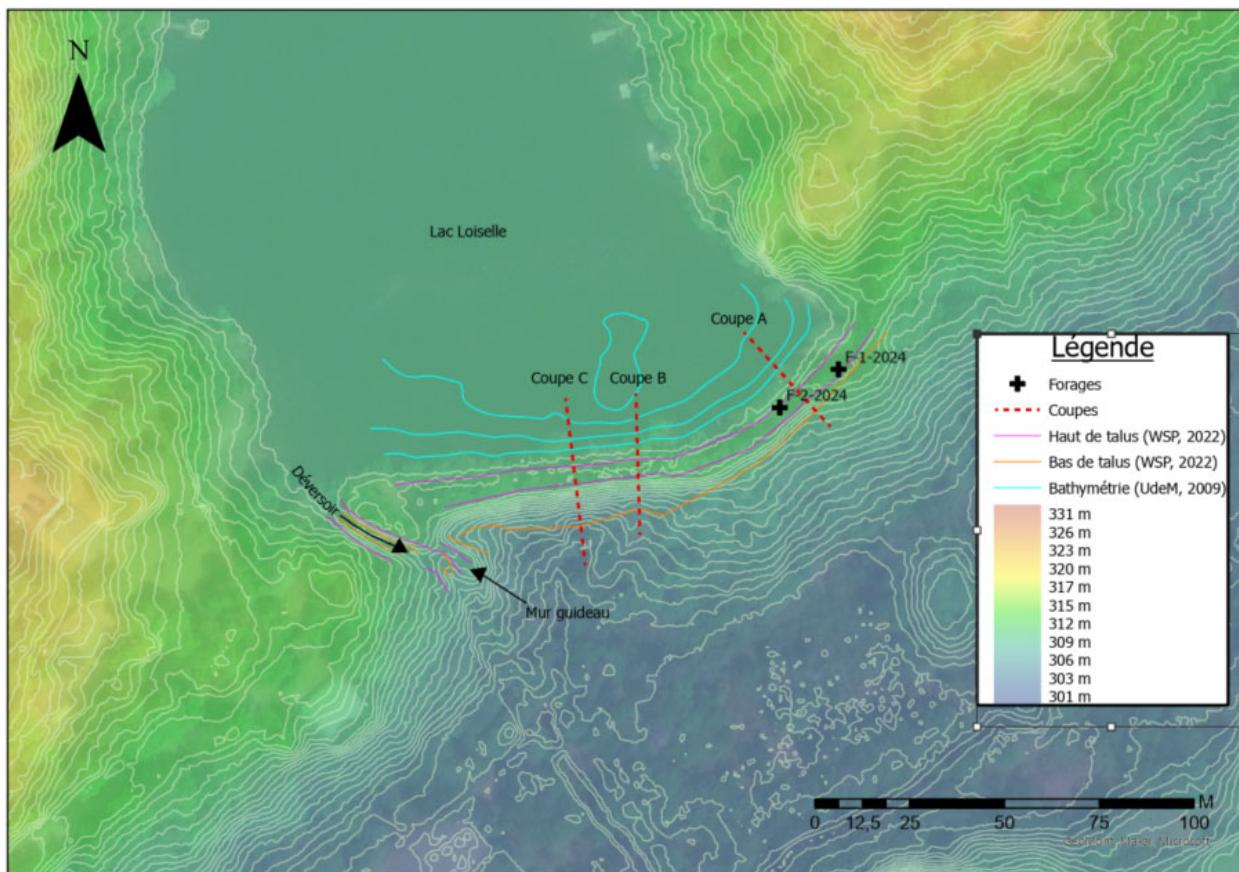


Figure 8.3 Vue en plan du barrage Loiselle indiquant l'emplacement des forages et des coupes modélisées

8.2.2.1 COUPE A

La coupe A est située à l'extrême est du barrage, plus ou moins 5 m à l'est du forage F-2-2024. La largeur en crête la plus faible le long du barrage est recensée au niveau de cette coupe. Les relevés terrain ont montré que les sols au pied aval sont localement saturés.

8.2.2.2 COUPE B

La coupe B se situe environ au centre du barrage, à plus ou moins 40 m à l'ouest du forage F-2-2024. La pente amont la plus forte est repérée le long de cette section.

8.2.2.3 COUPE C

La coupe C est située environ 60 m à l'ouest du forage F-2-2024. Outre la forte pente que présente le talus aval, on identifie également la hauteur la plus grande du barrage au droit de cette section. Au pied aval, un milieu humide a été observé (él. 304,30 m).

8.2.2.4 COMMENTAIRES

L'épaisseur des unités stratigraphiques (socle rocheux, dépôt naturel, remblai) au niveau de chaque coupe a été définie en fonction des profils produits par Geostack (2024) dans le cadre de la campagne géophysique. Il convient de rappeler que la présence d'une couche composée de silt et de sable très lâche comportant de la matière organique saturée a été échantillonnée en superficie du dépôt naturel probable au sein du forage F-2-2024. Cependant, le long de la ligne de levé, il est difficile de discerner proprement cette couche. Par conséquent, il demeure impossible de déterminer si cette couche très lâche se trouve réellement au droit des coupes étudiées, ou s'il s'agit uniquement d'une observation locale.

La présence de matière organique au sein de cette couche, ainsi que sa faible compacité, pourraient être expliquées par un vice de construction du barrage Loiselle, où le remblai utilisé pour la construction de l'ouvrage aurait été mis en place directement sur la couche organique qui reposait initialement sur la fondation de sable et silt.

Afin d'établir le scénario le plus conservateur, il a été convenu que toutes les coupes étudiées incluraient une épaisseur de ce matériau très lâche équivalente à celle observée dans le forage F-2-2024 (0,92 m), et ce, même si les coupes B et C sont relativement éloignées du forage.

Comme WSP ne possède aucune information quant à la présence d'élément gouvernant la dynamique d'écoulement interne (noyau, membrane, drains, filtre, etc.), le barrage est considéré homogène sur toute sa longueur. Aucun plan de construction de cet ouvrage ne semble être disponible.

Des sols saturés et mous au pied aval ont été observés à l'emplacement des différentes coupes lors de l'inspection du barrage. Les venues d'eau provenant de la base du mur guideau en rive gauche du déversoir alimentent la zone humide au pied aval de l'ouvrage au niveau de la coupe C. Cependant, aucune exfiltration d'eau n'a été observée au sein des pentes aval du barrage. Les modèles générés tiennent compte de ces observations.

8.2.3 PROPRIÉTÉS HYDRAULIQUES DES SOLS

Les conductivités hydrauliques saturées des unités stratigraphiques composant le barrage Loiselle ont été estimées à l'aide de la relation empirique de Malenfant-Corriveau et al.

$$K_{sat(20^\circ\text{C}, \frac{m}{s})} = 0,1264 \left[d_{10}^{-2} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \right]^{1,1377} \quad \text{pour } d_{10}^{-2} \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} < 0,01 \text{ mm}^2$$

Où d_{10} [mm] est le diamètre de particules passant 10 % et n est la porosité.

Cette relation est fortement dépendante de la porosité, paramètre fonction de l'indice des vides (e), lequel peut être évalué selon la nature et la compacité du matériau. Hunt (1984, table 3.5) présente des valeurs d'indice des vides pour des matériaux de différentes granulométries et compacité.

Les courbes granulométriques des échantillons associés au remblai et à la couche de silt et sable lâche prélevés au sein du forage F-2-2024 indiquent une discontinuité au sein de la fraction de particules ayant un diamètre de 80 à 315 um. Les valeurs élevées du coefficient de courbure calculées corroborent le fait qu'une déficience existe quant à l'étalement de la granulométrie de ces matériaux. De plus, Leroueil et al. (2002), démontre que pour une fraction argileuse similaire, la macroporosité d'un matériau, qui est influencée par sa compacité, mais également par l'étalement de sa granulométrie, peut faire fluctuer la conductivité hydraulique sur plusieurs ordres de grandeur. Ces arguments ont été pris en considération pour la définition des conductivités hydrauliques du remblai et du silt et sable très lâche à l'état saturé.

Les conductivités hydrauliques saturées des matériaux du barrage ont été définies afin de respecter les conditions observées sur le site. Plus précisément, un contraste d'ordre de grandeur entre le remblai et la couche de silt et sable très lâche a dû être imposé au modèle afin que la nappe soit rabattue et pour permettre que l'eau s'échappe au pied du barrage, condition observée au pied aval lors de la visite sur le site.

Il a été admis dans la modélisation que le remblai et le silt et sable très lâche constituant la digue ne sont pas saturés sur toute leur hauteur. La succion générée dans les sols diminue leur perméabilité, en fonction d'une courbe de rétention d'eau. Ainsi, une courbe de la teneur en eau du matériau en fonction de la succion (Θ - Ψ) a été estimée pour le remblai ainsi que pour le silt et sable très lâche. Cette courbe est établie en fonction de la nature du matériau et de sa teneur en eau à saturation. La teneur en eau à saturation, qui correspond à la porosité du matériau, a été estimée selon la charte produite par Hunt (1984, table 3.5), qui fournit des valeurs d'indice des vides en fonction de la nature et la compacité du matériau.

Par la suite, la courbe de perméabilité, en fonction de la succion (k - Ψ), a été estimée à partir de la courbe Θ - Ψ à l'aide de la méthode de Van Genuchten, implantée dans le logiciel SEEP/W. Cette démarche n'a pas été nécessaire en ce qui concerne la couche de sable et silt constituant la fondation du barrage Loiselle, puisque ce matériau est considéré comme saturé. La teneur en eau à saturation a néanmoins dû être estimée à l'aide de Hunt (1984), de la même façon que pour les autres matériaux.

Le Tableau 8.2 présente les conductivités hydrauliques saturées des différents matériaux modélisés dans le cadre de l'analyse d'écoulement.

Tableau 8.2 Paramètres hydrauliques des matériaux

MATÉRIAU	CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE SATURÉE (m/s)	TENEUR EN EAU SATURÉE
Remblai de silt et sable avec traces d'argile et de gravier, lâche à compact	5e-06	0,38
Silt et sable avec traces d'argile et de gravier, très lâche	5e-05	0,40
Sable et silt avec un peu de gravier et traces d'argile, compact	7e-05	0,34

8.2.4 RÉSULTATS DES ANALYSES D'ÉCOULEMENT

Les analyses d'écoulement ont permis d'estimer la position de la nappe phréatique au droit des coupes étudiées pour des niveaux d'eau amont correspondant aux conditions normales d'exploitation et à la crue de sécurité. Ces profils piézométriques constituent l'intrant hydraulique principal pour les analyses de stabilité. Les figures illustrant les résultats des analyses d'écoulement sont présentées à l'annexe E.

8.3 POTENTIEL D'ÉROSION INTERNE

8.3.1 POTENTIEL D'INITIATION DE L'ÉROSION RÉGRESSIVE AU PIED DE L'OUVRAGE

L'érosion régressive se traduit par le détachement des particules de sols à la sortie d'un écoulement dans un ouvrage en remblai. Ce processus s'initie en présence de gradients hydrauliques élevés à l'exutoire de l'écoulement, soit au pied aval du barrage. Une fois initié, le mécanisme s'accélère en présence de gradients hydrauliques qui augmentent continuellement face à la diminution graduelle de la section d'écoulement. L'érosion progresse ainsi vers l'amont et prend généralement la forme de renard hydraulique.

8.3.1.1 MÉTHODOLOGIE

L'évaluation du potentiel d'initiation de l'érosion régressive dans les barrages s'effectue via l'analyse du gradient hydraulique à la sortie de l'écoulement dans l'ouvrage. Théoriquement, ce gradient hydraulique de sortie (i) se calcule en effectuant le quotient entre la différence de charge hydraulique (ΔH) et la longueur d'écoulement (L) :

$$i = \frac{\Delta H}{L}$$

Les gradients hydrauliques de sortie ont donc été calculés à l'aide de cette formule au niveau de la coupe A et de la coupe C. Les gradients hydrauliques de sortie n'ont pas été calculés au sein la coupe B, puisque cette dernière a été modélisée afin d'évaluer la stabilité amont des pentes du barrage.

Une meilleure connaissance de la dynamique d'écoulement interne, notamment par le biais de mesures de niveaux piézométriques au sein du barrage, permettrait d'évaluer numériquement les gradients hydrauliques de sortie au sein des modèles produits dans SEEP/W. L'absence de ces données nous limite à utiliser la formule théorique présentée plus haut afin d'approximer ces gradients.

8.3.1.2 RÉSULTATS DES ANALYSES DU GRADIENT HYDRAULIQUE

Le Tableau 8.3 présente les résultats des calculs de gradients hydrauliques de sortie au niveau des coupes A et C, pour des niveaux d'eau amont représentant le niveau normal d'exploitation et celui associé à la crue de sécurité.

Tableau 8.3 Résultats des calculs des gradients hydrauliques de sortie

NIVEAU D'EAU AMONT	GRADIENT DE SORTIE (i)
Coupe A – Crue de sécurité	0,19
Coupe A – Niveau normal	0,09
Coupe C – Crue de sécurité	0,37
Coupe C – Niveau normal	0,36

Les gradients hydrauliques calculés au niveau de la coupe A sont plutôt faibles. Les conditions hydrauliques ne sont donc pas propices à l'initiation de l'érosion régressive. Par ailleurs, les valeurs calculées au niveau de la coupe C sont élevées. Les gradients hydrauliques de sortie à cet endroit, que l'ouvrage soit exposé à un niveau d'eau amont correspondant à des conditions normales d'exploitation ou à celui de la crue de sécurité, occasionnent des conditions critiques propices à l'initiation de l'érosion régressive.

8.3.2 POTENTIEL DE SUFFUSION DES SOLS

Un autre mode d'initiation de l'érosion interne est l'instabilité interne liée à la suffusion. Ce phénomène survient en présence d'un matériau susceptible et lorsque la charge hydraulique critique est dépassée (Garner et Fannin, 2010).

La susceptibilité du matériau est fonction de sa granulométrie. Les matériaux susceptibles sont ceux dont la taille des constrictions formées par la matrice primaire est suffisamment importante pour laisser passer les particules fines et lorsque la quantité de particules fines est insuffisante pour bloquer ces constrictions. Lorsque l'écoulement critique, fonction de la conductivité hydraulique des matériaux et des vitesses d'écoulement interne, est rencontré et sous ces conditions, les particules fines sont mobilisables, ce qui engendre la formation de vides dans la structure granulaire.

8.3.2.1 MÉTHODOLOGIE

La susceptibilité du matériau face à l'instabilité interne est évaluée à l'aide du critère de Wan et Fell (2008). Cette susceptibilité est fonction des analyses granulométriques, plus précisément

des diamètres associés au passage de 5 %, 20 %, 60 % et 90 % de la fraction de la masse totale des échantillons analysés.

Il serait possible d'estimer numériquement, à l'aide de SEEP/W, les vitesses interstitielles de l'écoulement interne et d'utiliser le critère de Côté (2010) afin d'évaluer si l'écoulement critique pouvant initier la mobilisation des particules est atteint au sein du barrage. Cependant, ce type d'analyse requiert une définition précise des conditions (géométrie, propriétés géotechniques, niveaux piézométriques) in situ pour que leur interprétation se veuille pertinente. Le peu de données disponibles rend ce type d'analyse futile en ce qui concerne le barrage Loiselle. L'évaluation du potentiel de suffusion des sols se limite donc à la susceptibilité des matériaux face à ce mécanisme.

8.3.2.2 RÉSULTATS

Le Tableau 8.4 présente les échantillons analysés et la Figure 8.4 présente graphiquement le comportement des échantillons par rapport au critère de Wan et Fell (2008).

Tableau 8.4 Description des échantillons analysés

FORAGE	TF-2-2024			
ÉCHANTILLONS	CF-2	CF-3	CF-4	CF-5
PROFONDEUR (M)	0,61 À 1,22	1,22 À 1,83	1,83 À 2,44	2,44 À 3,05
Description	Remblai : silt et sable, traces d'argile et de gravier, lâche à compact	Silt et sable, traces d'argile et de gravier, présence de matière organique, très lâche	Sable et silt, un peu de gravier, traces d'argile, compact	

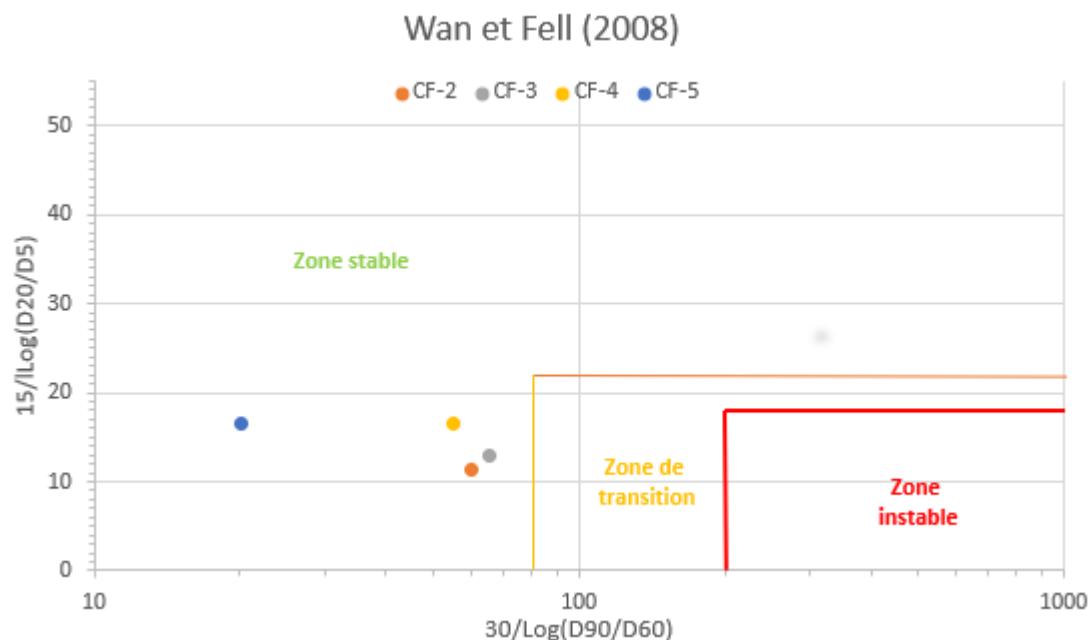


Figure 8.4 Susceptibilité des matériaux des échantillons de sol (Wan et Fell, 2008)

Aucun sol provenant des échantillons prélevés et analysés ne se situe dans la zone de transition ou dans la zone de susceptibilité tirée de Wan et Fell (2008). À priori, les sols en place ne sont ainsi pas vulnérables à la suffusion. Cependant, rappelons que les échantillons analysés proviennent d'un forage effectué à une extrémité de l'ouvrage. Une incertitude persiste quant à la représentativité de ces données ailleurs au sein du barrage et il est donc difficile de statuer définitivement sur la susceptibilité des matériaux du barrage dans son ensemble. Suivant les principes que certains matériaux du barrage (remblai et silt et sable lâche) se situent près de la zone de transition définie par Wan et Fell (2008), qu'il existe une discontinuité granulométrique significative au sein de la fraction fine du remblai et du silt et sable lâche et que les propriétés granulométriques des matériaux pourraient être variables le long du linéaire de l'ouvrage, WSP n'exclut pas la possibilité que certaines zones au sein du barrage Loiselle soient composées de matériaux susceptibles à l'instabilité interne.

8.3.3 CONTINUATION DE L'ÉROSION INTERNE

Selon les informations disponibles, aucun matériau filtre n'est en place au sein du barrage Loiselle. En l'absence d'élément physique permettant de limiter la migration des particules fines au sein de l'ouvrage, rien ne peut restreindre la continuation de l'érosion interne en cas d'initiation.

8.3.4 DISCUSSION SUR LE POTENTIEL D'INITIATION DE L'ÉROSION INTERNE DU BARRAGE LOISELLE

À la lumière des résultats obtenus, il existe un potentiel d'initiation de l'érosion interne au sein du barrage Loiselle. Les gradients hydrauliques de sortie élevés à la base du talus aval pourraient éventuellement initier l'érosion régressive au pied aval, et potentiellement créer des renards hydrauliques, particulièrement au niveau de la coupe C, puisque les gradients hydrauliques de sortie sont élevés, que le niveau du lac soit normal ou celui de la crue de sécurité.

En ce qui concerne le potentiel de suffusion, les matériaux du barrage ne se situent pas dans la zone de susceptibilité à l'instabilité interne définie par Wan et Fell (2008). À priori, le barrage ne présenterait donc pas de potentiel de suffusion. Cependant, les couches composées du remblai ainsi que du silt et sable très lâche se situent près de la zone de transition. En considérant qu'une incertitude persiste quant aux caractéristiques intrinsèques des matériaux le long du linéaire du barrage Loiselle, WSP est d'avis qu'il n'est pas possible d'exclure complètement le potentiel d'initiation de l'érosion interne par suffusion au barrage Loiselle.

L'absence de filtre permettant de limiter la continuation de l'érosion interne présente un risque complémentaire aux constats préalablement émis quant au potentiel d'érosion interne du barrage.

De plus, une végétation dense et mature, parfois déracinée ou morte, couvre une partie importante de l'ouvrage hydraulique. La pénétration des racines dans la structure du barrage crée des chemins préférentiels pour l'écoulement interne, ce qui peut initier l'érosion de conduit, particulièrement en présence d'arbres morts dont les racines se décomposent. Finalement, la présence d'un couvert végétal favorise également l'hébergement par les animaux fouisseurs. Les terriers excavés par ces animaux sur et à proximité du barrage contribuent à modifier les

conditions d'écoulement interne, notamment par la création de chemins préférentiels et par l'augmentation des gradients hydrauliques.

8.4 STABILITÉ DES PENTES

8.4.1 MÉTHODOLOGIE

Le logiciel SLOPE /W est couramment utilisé en pratique géotechnique pour les calculs de stabilité de pentes. Ce logiciel utilise la méthode de l'équilibre limite afin de définir des coefficients de sécurité contre la rupture. L'approche de Morgenstern-Price, qui permet de satisfaire l'équilibre des forces et des moments, ainsi que la loi de comportement de Mohr-Coulombs ont été utilisées afin de réaliser ces analyses.

Le coefficient de sécurité minimum requis s'appuie sur les recommandations de l'Association canadienne des barrages (ACB, 2007), jugées comme étant représentatives des règles de l'art en matière de sécurité des ouvrages de retenue. Pour un cas statique en écoulement permanent, un coefficient de 1,5 doit être obtenu pour démontrer la stabilité des pentes du barrage.

Les scénarios suivants ont été analysés dans le cadre de l'analyse de la stabilité de la digue :

- niveau d'eau associé au débit module (310,91 m);
- niveau d'eau associé à la crue de sécurité milléniale (311,77 m).

Les analyses de stabilité ont été effectuées du côté amont ou du côté aval en fonction des géométries jugées les plus critiques au droit des coupes étudiées. Ainsi, les analyses de stabilité ont été menées sur les pentes aval au droit des coupes A et C, puisque ces deux coupes présentent respectivement la plus faible largeur en crête ainsi que la plus grande hauteur de barrage combinée à la pente la plus abrupte. Par ailleurs, les analyses ont été réalisées au niveau de la coupe B du côté amont, car c'est à cet endroit que la pente amont est la plus prononcée le long du barrage.

8.4.2 PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES SOLS

Le tableau 8.5 synthétise les propriétés mécaniques des matériaux granulaires modélisés dans le cadre de l'analyse de la stabilité des pentes. Ces propriétés mécaniques ont été définies en fonction de la compacité issue des indices N recensés lors de l'échantillonnage des sols en forage, de leurs granulométries et des valeurs typiques associées retrouvées dans la littérature. Au niveau de la coupe A, WSP est d'avis que les valeurs retenues sont fiables comme elles sont dérivées des prélèvements au sein du forage F-2-2024 situé à proximité. Cependant, en raison de la distance significative qui sépare les coupes B et C des investigations géotechniques réalisées, ainsi que du manque de connaissances sur la composition du barrage Loiselle, il subsiste une incertitude quant à la représentativité de ces paramètres au niveau de ces coupes. Cependant, l'analyse des données géophysiques semble montrer une certainement uniformité de la compacité des matériaux sur tout le linéaire de l'ouvrage.

Tableau 8.5 Propriétés géotechniques des matériaux de la digue

MATÉRIAU	POIDS VOLUMIQUE, γ (kn/m ³)	COHÉSION EFFECTIVE, c' (kpa)	ANGLE DE FROTTEMENT, ϕ (°)
Remblai de silt et sable avec traces d'argile et de gravier, lâche à compact	20	0	34
Silt et sable avec traces d'argile et de gravier, très lâche	19	0	28
Sable et silt avec un peu de gravier et traces d'argile, compact	21	0	35
Roc	Impénétrable		

8.4.3 RÉSULTATS DES ANALYSES DE STABILITÉ

Les coefficients de sécurité issus des différentes analyses sont présentés au sein du Tableau 8.6.

Tableau 8.6 Résultats des analyses de stabilité en condition statique

COUPE	CAS DE CHARGEMENT	NIVEAU AMONT (m)	PENTE	FS _{min} OBTENU	FS VISÉ	FIGURE (ANNEXE E)
A	Niveau normal	310,91	Aval	1,17	1,5	E.1
	Crue de sécurité	311,77	Aval	1,03		E.2
B	Niveau normal	310,91	Amont	1,80	1,5	E.3
	Crue de sécurité	311,77	Amont	2,88		E.4
C	Niveau normal	310,91	Aval	1,03		E.5
	Crue de sécurité	311,77	Aval	1,00		E.6

Les résultats démontrent que les pentes aval des coupes A et C n'atteignent pas le coefficient de sécurité visé, peu importe le cas de chargement étudié. En revanche, les coefficients de la pente amont sont supérieurs au facteur de sécurité visé.

8.5 ÉVALUATION DE LA SÉCURITÉ SISMIQUE

8.5.1 CHOIX DU SÉISME DE DIMENSIONNEMENT

Conformément à l'article 28 du RSB :

« Les caractéristiques de tout barrage doivent lui permettre de demeurer stable sous l'effet des charges sismiques auxquelles il peut être soumis selon la zone dans laquelle il est situé. »

De plus, conformément à l'article 29 du RSB :

« Les calculs relatifs à la stabilité sismique de la structure d'un barrage et du terrain de fondation doivent être effectués en fonction d'une période de récurrence de 2 500 ans et en utilisant l'une ou l'autre des valeurs de l'accélération de pointe au rocher suivant :

1. la valeur qui, selon l'annexe I, correspond à la zone de séismicité dans laquelle le barrage est situé;
2. la valeur qui, eu égard à la localisation du barrage, peut être déterminée à partir des données sismiques établies par la Commission géologique du Canada ».

Le choix d'une accélération maximale des sols (AMS) en crête du barrage est requis. Les vitesses moyennes des ondes de cisaillement dans les sols constituant la digue sur les 30 premiers mètres correspondent à un site de catégorie C selon le Code national du bâtiment (CNRC, 2015). Le calculateur d'aléa sismique du ministère des Ressources naturelles du Canada (MRN), version 2020, a été utilisé pour établir l'AMS pour un site de catégorie C. Aucune transformation de valeur d'aléa n'est nécessaire et la valeur d'AMS en crête donnée par le calculateur d'aléa sismique est retenue (Tableau 8.7)

La magnitude d'un séisme potentiel au site ayant une probabilité d'occurrence de 1 dans 2 500 ans (0,000404 par année) a été obtenue par désagrégation sismique de la Commission géologique du Canada, et est de 6,3. Cette magnitude est fonction de la période fondamentale de l'accélération spectrale, calculée selon l'épaisseur des dépôts meubles en place et de la vitesse moyenne des ondes de cisaillement au sein de ces sols.

Tableau 8.7 Estimation de l'accélération en crête du barrage Loiselle

AMS (catégorie C)	AMS _{ref} =0,8*PGA	F(AMS)	AMS EN CRÊTE
0,392 g	0,314g	1,00	0,392 g

8.5.2 ÉVALUATION DU POTENTIEL DE LIQUÉFACTION

8.5.2.1 MÉTHODOLOGIE

Le potentiel de liquéfaction est évalué en fonction du rapport entre la sollicitation dynamique imposée par un séisme (CSR) et la résistance cyclique d'un sol (CRR). Ce ratio représente le facteur de sécurité (FS) à la liquéfaction. Un sol est considéré liquéfiable lorsque le ratio $\frac{CSR}{CRR}$ est inférieur à 1,20 et qu'il est saturé. La méthodologie présentée dans Idriss et Boulanger (2014) est utilisée dans la présente étude afin d'évaluer le potentiel de liquéfaction à partir des indices N de l'essai de pénétration standard (SPT) calculés au forage F-2-2024.

La résistance cyclique du sol est estimée à l'aide des indices N du SPT. La sollicitation dynamique est quant à elle déterminée à l'aide de l'AMS en crête et de la magnitude du séisme considérée (définis à la section 8.5.1).

L'évaluation du potentiel de liquéfaction a aussi été effectuée à partir des vitesses des ondes de cisaillement (V_s) dans les dépôts meubles obtenues par traitement des levés géophysiques. La démarche présentée par Kayen et al. (2013) a été utilisée à cet effet. En raison de la portée significative du levé sismique réalisé, le potentiel de liquéfaction a non seulement été évalué au droit du forage F-2-2024, mais également au droit de la coupe C, là où l'épaisseur des dépôts meubles est la plus grande.

Pour les deux méthodes d'analyse (SPT et V_s), les calculs ont été effectués à l'aide du logiciel LiqSVs de Geologismiki.

8.5.2.2 POTENTIEL DE LIQUÉFACTION

Suivant la méthodologie présentée ci-haut, et compte tenu des paramètres sismiques sélectionnés, les calculs issus de la méthode basée sur le SPT et celle des V_s indiquent que les sols composant la couche de silt et sable très lâche présentent un potentiel de liquéfaction au droit du forage F-02-2024. Les FS obtenus au niveau de ces couches sont largement inférieurs au critère de 1,20.

En revanche, aucun potentiel de liquéfaction n'est identifié au sein des sols en place au niveau de la coupe C selon l'analyse des V_s associées. Cela suggère que la couche de silt et sable très lâche, susceptible de se liquéfier, est soit absente à cet endroit, soit présente, mais de plus forte compacité qu'à l'emplacement du forage F-02-2024.

Néanmoins, nous sommes d'avis que, puisque l'approche basée par l'essai SPT démontre un fort potentiel de liquéfaction, il n'est pas possible d'exclure que la couche de silt et sable très lâche observée au barrage Loiselle présente un potentiel de liquéfaction advenant l'occurrence du séisme de sécurité.

Les détails des calculs associés à l'évaluation du potentiel de liquéfaction sont présentés à l'annexe F.

8.5.3 COMPORTEMENT POST-SISMIQUE

8.5.3.1 MÉTHODOLOGIE

L'ACB (2007) recommande un coefficient de sécurité minimum de 1,2 contre la rupture du barrage en conditions post-sismiques. Cette analyse doit démontrer l'atteinte du coefficient visé en prenant en compte les résistances au cisaillement résiduelles dans les sols ayant été jugés potentiellement liquéfiables, le cas échéant, et en prenant en considérant les surpressions interstitielles dans les sols saturés suivant le tremblement de terre.

8.5.3.2 RÉSISTANCE RÉSIDUELLE DES SOLS

Pour déterminer la résistance résiduelle post-liquéfaction de la couche de silt et sable lâche liquéfiable, nous avons utilisé la méthodologie présentée dans Idriss et Boulanger (2008), qui fixe un ratio de résistance résiduelle au cisaillement ($\frac{S_r}{\sigma'_{rc}}$). Ce ratio a été déterminé en considérant que les pressions interstitielles post-sismiques sont rapidement dissipées au sein du barrage. Il est fonction de l'indice de pénétration standard corrigé pour un sable propre et pour la résistance résiduelle [$(N_1)_{60-sr}$]. Le Tableau 8.8 présente les paramètres résiduels de cet horizon liquéfiable.

Tableau 8.8 Paramètres résiduels de l'horizon liquéfiable de silt et sable lâche

$(N_1)_{60-sr}$	$\frac{S_r}{\sigma'_{vc}}$
4	0,05

8.5.3.3 RÉSULTATS DES ANALYSES DE STABILITÉ EN CONDITIONS POST-SISMIQUES

L'analyse de la stabilité post-sismique des pentes s'est faite à l'aide du logiciel SLOPE /W, selon la méthode de Morgenstern-Price. La loi de comportement de Mohr-Coulombs a été utilisée pour définir les caractéristiques du remblai et du sable et silt de fondation (non-liquéfiables). Le modèle SHANSEP intégré dans le logiciel a été utilisé pour définir le comportement du silt et sable très lâche potentiellement liquéfiable en considérant le ratio constant $\frac{S_r}{\sigma'_{vc}}$ préalablement calculé. Les mêmes cas de chargement hydraulique que pour l'analyse statique ont été considérés dans l'analyse post-sismique.

Les coefficients de sécurité issus des analyses de stabilité en condition post-sismiques sont présentés au sein du tableau 8.9 suivant.

Tableau 8.9 Résultats des analyses de stabilité en condition post-sismique

COUPE	CAS DE CHARGEMENT	NIVEAU AMONT (m)	PENTE	FS _{min} OBTENU	FS VISÉ	FIGURE (ANNEXE E)
A	Niveau normal	310,91	Aval	0,16	1,20	E.7
	Crue de sécurité	311,77	Aval	0,14		E.8
B	Niveau normal	310,91	Amont	0,56	1,20	E.9
	Crue de sécurité	311,77	Amont	0,67		E.10
C	Niveau normal	310,91	Aval	0,17	1,20	E.11
	Crue de sécurité	311,77	Aval	0,13		E.12

Tous les facteurs de sécurité calculés sont inférieurs au critère de stabilité. Les surfaces de rupture critiques issues des calculs passent toutes par la couche de silt et sable très lâche liquéfiable. Le volume des glissements anticipés sont importants, notamment pour la coupe A et la coupe C, ou la crête du barrage ainsi qu'une partie du talus amont sont emportées par le glissement.

8.5.3.4 DISCUSSION SUR LA SÉCURITÉ SISMIQUE

L'analyse de la stabilité sismique du barrage Loiselle démontre que :

1. il existe un potentiel de liquéfaction au sein de l'unité de silt et de sable très lâche;
2. le comportement post-sismique, en considérant la résistance résiduelle du dépôt liquéfiable, ne rencontre pas le critère de stabilité.

Le barrage Loiselle serait fortement endommagé par l'occurrence du séisme ayant une probabilité de récurrence de 1/ 2 500 ans. La liquéfaction des dépôts en place engendre une

importante diminution de la résistance de l'ouvrage. L'envergure des surfaces de rupture présente un potentiel de déversement incontrôlé du réservoir.

9 SYNTHÈSE

9.1 INTRODUCTION

Ce chapitre présente une synthèse de l'évaluation de la sécurité et l'adéquation du barrage du lac Loiselle aux normes minimales de sécurité relatives à la résistance aux crues et à la stabilité.

9.2 CONFORMITÉ DU BARRAGE AUX NORMES MINIMALES DE SÉCURITÉ RELATIVES À LA RÉSISTANCE AUX CRUES

9.2.1 NIVEAU DES CONSÉQUENCES ET CRUE DE SÉCURITÉ

Conformément au règlement d'application de la LSB, le niveau des conséquences du barrage lac Loiselle (X2181546) est établi à « moyen ». La crue de sécurité associée à ce barrage est la crue de récurrence millénale (1 000 ans) pour un débit de 4,7 m³/s.

9.2.2 REVANCHE DISPONIBLE

Le niveau atteint au passage de la crue de sécurité se situe à 311,77 m et un point bas de la crête du barrage se situe à 311,70 m. Dans ces conditions, aucune revanche hydraulique n'est disponible et une érosion par surverse pourrait survenir au passage de la crue de sécurité.

9.2.3 ANALYSE DE LA TOPOGRAPHIE DU POURTOUR DU RÉSERVOIR

L'analyse de la topographie du pourtour du réservoir a permis d'établir que le seul point de débordement se situe au droit du barrage du lac Loiselle.

9.3 ÉTAT ET PÉRENNITÉ DES OUVRAGES

9.3.1 ÉTAT DU BARRAGE

L'état général du barrage du lac Loiselle (X2181546) est dans un état jugé « **acceptable** » au sens du RSB.

9.3.2 FONCTIONNALITÉ ET FIABILITÉ DES ÉVACUATEURS

Sur la base des documents et de l'inspection effectuée, la fiabilité et la fonctionnalité de l'appareil d'évacuation sont établies à « **acceptable** ».

9.3.3 STABILITÉ DES OUVRAGES

L'examen approfondi de la stabilité du barrage Loiselle met en évidence des lacunes significatives, principalement au niveau de la digue en rive gauche qui ne satisfait pas les critères requis en termes d'écoulement interne, de stabilité structurelle et de résistance sismique. Les caractéristiques granulométriques des matériaux constitutifs du barrage, les gradients de sortie importants, l'absence de filtre granulaire et la présence abondante de végétation le rendent potentiellement vulnérable à l'érosion interne. De plus, les analyses de stabilité statique menées sur les pentes aval de la digue révèlent des coefficients de sécurité en déçà des seuils ciblés. Enfin, une susceptibilité à la liquéfaction est identifiée au sein d'une unité stratigraphique dans la fondation du barrage. En conditions post-sismique, la diminution significative de la résistance au cisaillement de cette strate génère une rupture présentant un potentiel de perte incontrôlé du réservoir advenant l'occurrence du séisme de sécurité.

9.4 EXPLOITATION DU BARRAGE

9.4.1 CLASSEMENT DU BARRAGE

Le classement du barrage du lac Loiselle (X2181546) est effectué en considérant la digue du barrage. Le classement d'un ouvrage est basé notamment sur les caractéristiques physiques, l'état des ouvrages, le niveau des conséquences et la fiabilité des appareils d'évacuation du barrage, conformément aux annexes 1 à 5 du RSB. Suivant les résultats du calcul du pointage, le classement de celui-ci est confirmé à « C ». Le Tableau 9.1 résume le classement du barrage et l'annexe G présente le calcul du classement.

Tableau 9.1 Classement du barrage du lac Loiselle (X2181546)

PARAMÈTRES	INFORMATION
Hauteur du barrage (m)	8,20
Capacité retenue (m ³)	53 900
Type d'ouvrage	Digue en terre
Fondation	Till
Année de construction	1959 ¹
Âge du barrage (ans)	65
Zone sismique	4
Fiabilité appareil d'évacuation	Acceptable
État	Acceptable
Niveau des conséquences	Moyen
Pointage global	53,04
Classe de l'ouvrage	C

¹ La construction du barrage est probablement antérieure à 1959, mais pour les fins de classement, 1959 est considérée. En effet, considérant l'annexe V du RSB, pour un barrage en terre, plus celui-ci est « jeune », plus le pointage est élevé, ce qui constitue une hypothèse sécuritaire.

9.4.2 SURVEILLANCE

Un programme de surveillance et d'inspection est en vigueur, conformément à la LSB et au RSB et toutes les activités de surveillance sont inscrites au registre. Puisque le barrage du lac Loiselle est de classe « C », le programme de surveillance doit minimalement contenir deux « visites de reconnaissance » par année et une « inspection » tous les cinq ans conformément à l'article 42 du RSB.

9.4.3 PLAN DE GESTION DES EAUX RETENUE

Le barrage du lac Loiselle est muni uniquement d'un déversoir libre à crête fixe et aucune gestion des niveaux d'eau n'est possible. Par conséquent, aucun plan de gestion des eaux retenues ou son sommaire n'est requis conformément à l'article 30 du RSB.

9.4.4 PLAN DES MESURES D'URGENCE

Le niveau des conséquences associé au barrage du lac Loiselle est de « Moyen ». Par conséquent, le plan des mesures d'urgence (PMU) doit être établi en conformité aux articles 35 et 38 du RSB. Ce plan sera élaboré dans le cadre de cette ÉS. La Municipalité transmettra, à même la lettre de transmission des documents au Ministère, seulement l'avis de réalisation du PMU puisque la Municipalité est considérée comme l'autorité locale compétente.

10 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

10.1 CONCLUSION

Le niveau des conséquences du barrage du lac Loiselle a été établi à « moyen » et la crue de sécurité est de récurrence millénale pour un débit de 4,7 m³/s. Au passage de cette crue, le niveau d'eau du lac Loiselle atteint 311,77 m.

Dans ces conditions, un débordement au droit de la digue du barrage est anticipé et cette situation pourrait conduire à la rupture du barrage considérant le caractère érodable de cet ouvrage. Suivant l'analyse de la topographie du pourtour du réservoir en amont, le seul point de débordement se situe au droit du barrage du lac Loiselle.

Considérant l'état de la digue, l'état du barrage est jugé « acceptable ». Sur la base des documents reçus et de l'inspection, la fonctionnalité et la fiabilité des appareils d'évacuation sont jugées « acceptable ».

La stabilité du barrage ne répond pas aux critères minimaux en termes d'écoulement interne, de stabilité statique et de sécurité sismique. La digue en rive gauche, qui est l'ouvrage principal de retenue des eaux du lac Loiselle, est vulnérable face à plusieurs mécanismes d'érosion interne. De plus, les pentes aval ne satisfont pas aux coefficients de sécurité visés en condition statique. Par ailleurs, la présence d'un horizon liquéfiable compromet considérablement la résistance des talus en cas de séisme.

Enfin, suivant la révision de l'ensemble des paramètres considérés, le classement de ce barrage est maintenu à « C ».

Des recommandations ont été émises et celles-ci doivent être mises en œuvre selon les délais proposés afin de maintenir la pérennité de ce barrage et se conformer aux exigences réglementaires. Le Tableau 10.1 présente les conclusions générales du barrage.

Tableau 10.1 Principales conclusions issues de l'étude d'évaluation de la sécurité du barrage du lac Loiselle

ÉLÉMENT RÉVISÉ	CONCLUSION
État global	« Acceptable »
Fonctionnalité et fiabilité des appareils d'évacuation	« Acceptable »
Capacité d'évacuation en lien avec la crue de sécurité	« Insuffisante »
Revanche	« Inadéquate, risque de surverse »
Niveau des conséquences	Établi à « moyen »
Analyse de la topographie du pourtour du réservoir, débordements anticipés	Aucun point bas n'est situé sur le pourtour et le seul point de débordement est situé au barrage
Classe du barrage	Maintenue à « C »

10.2 RECOMMANDATIONS

Des recommandations sont émises et celles-ci doivent être mises en œuvre selon les délais proposés afin de maintenir la pérennité de ce barrage et se conformer aux exigences réglementaires.

10.2.1 RECOMMANDATION EN LIEN AVEC LA SÉCURITÉ DU BARRAGE

Le barrage du lac Loiselle a une capacité d'évacuation insuffisante pour assurer le passage sécuritaire de la crue millénale soit la crue de sécurité associée à ce barrage. Ainsi, la revanche est insuffisante et au passage de cette crue, une érosion par surverse de la digue pourrait survenir. Par ailleurs, plusieurs aspects associés à la stabilité de la digue ne rencontrent pas les critères admis dans les règles de l'art. De plus, plusieurs travaux correctifs sont recommandés dans le cadre de ce rapport.

Par conséquent, des travaux de mise aux normes devraient être effectués sur le barrage Loiselle à moyen terme. Une campagne d'investigation additionnelle, afin de mieux caractériser les remblais existants ainsi que la fondation, sera nécessaire préalablement à la conception des travaux de mise aux normes de l'ouvrage. Les travaux de réfection recommandés comprennent, sans s'y limiter :

- augmentation de la capacité d'évacuation du barrage;
 - protection contre l'érosion du parement amont jusqu'à la revanche en crête;
 - protection contre l'érosion du pied de talus aval;
 - gestion proactive de la végétation par l'enlèvement des arbres et de la végétation ligneuse sur le barrage et réparation des cavités;
 - aménagement d'un fossé collecteur des écoulements potentiels en pied de talus;
 - stabilisation des pentes du talus aval;
 - mise en place d'un filtre granulaire aval;
 - mise aux normes afin de rendre le barrage conforme à la sécurité sismique;
 - réaménagement de l'exutoire en zone aval du déversoir, incluant le mur guideau en rive gauche à l'aval du déversoir.
-

10.2.2 RECOMMANDATIONS EN LIEN AVEC LES OPÉRATIONS, LA SURVEILLANCE ET LA PÉRENNITÉ DES OUVRAGES

À court terme, il est recommandé d'effectuer les activités suivantes avant les travaux de mise aux normes du barrage :

- procéder régulièrement à l'enlèvement des arbres et débris ligneux dans le bief amont du déversoir afin d'y limiter la restriction hydraulique;
- procéder à la coupe de la végétation herbacée ou arbustive pouvant gêner la visibilité sur l'étendue du barrage, particulièrement au niveau du parement amont où la végétation

arbustive est dense. Cet entretien devrait être effectué dans les jours précédant les visites de reconnaissance ou les inspections;

- rehausser le pont de bois passant par-dessus le bief amont du déversoir;
- procéder à un suivi régulier de la condition de zone humide au pied aval de la digue en terre par le biais de visites plus fréquentes au site (ex : crue, étiage, automne);
- procéder à l'imperméabilisation du mur guideau en remblai en rive gauche afin de limiter l'écoulement vers le pied aval;
- augmenter les visites de reconnaissance à minimalement quatre (4) fois par année, dont au moins une effectuée par un ingénieur;
- effectuer une inspection spéciale lorsqu'Environnement Canada (Environnement Canada, 2024) émet notamment, et pour le secteur, les alertes suivantes :
 - orages violents;
 - événement de pluie de courte durée (pluie torrentielle), soit lorsqu'est prévu 50 mm ou plus de pluie en moins d'une heure;
 - pluie d'été, soit quand sont prévus 50 mm ou plus de pluie en moins de 24 heures ou quand sont prévus 75 mm ou plus de pluie en moins de 48 heures;
 - pluie en hiver, soit quand sont prévus 25 mm ou plus de pluie en moins de 24 heures;
 - pluie verglaçante, lorsque cette pluie représentera une menace pour les transports ou les propriétés ou lorsque la durée prévue de la pluie verglaçante est d'au moins 2 heures;
 - tornade;
 - vents, soit 70 km/h ou plus pour un vent soutenu, et/ou rafales de 90 km/h ou plus.
- effectuer une inspection spéciale en cas de tremblement de terre ressenti dans la région.

10.2.3 RECOMMANDATIONS EN LIEN AVEC LA SÉCURITÉ DU PUBLIC

Le barrage est situé sur le territoire d'un parc multifonctionnel. Ainsi, des sentiers pédestres sont présents dans le secteur, une plage a été aménagée à proximité en amont du déversoir du barrage et la navigation de petites embarcations sans moteur est possible. Enfin, suivant l'observation de photographies aériennes disponibles sur Google Earth (Google Earth, 2022), des évidences de promenade ont été observées sur le couvert de glace du lac, voir la Figure 10.1 ci-dessous.

Dans ces conditions, les recommandations en lien avec la sécurité du public sont émises :

- mettre en place des dispositifs (bouées, estacade, etc.) afin de limiter le risque d'entrainement des personnes et des embarcations vers le déversoir;
- mettre en place des panneaux de signalisation visant à limiter la circulation de la population sur la digue, à l'extérieur des sentiers présents;
- pour la période hivernale et dans la mesure où la Municipalité n'effectue aucune surveillance du couvert de glace et de son épaisseur, prévoir des panneaux de signalisation afin d'aviser la population de ce danger, notamment à proximité en amont du barrage.



Figure 10.1 Évidences de circulations sur le couvert de glace du lac Loiselle
Photographie aérienne prise le 17 janvier 2022 et disponible sur Google Earth Pro

11 CORRECTIFS ET CALENDRIER DE MISE EN ŒUVRE

Des travaux de mise aux normes du barrage du lac Loiselle doivent être prévus par la Municipalité. D'ici la réalisation de ces travaux, des mesures de mitigation sont recommandées et celles-ci sont présentées au Tableau 11.1.

Tableau 11.1 Mesures de mitigation recommandées d'ici la réalisation des travaux de mise aux normes du barrage du lac Loiselle (X2181546)

N°	DESCRIPTION
1	Rehaussement du pont de bois passant par-dessus le bief amont du déversoir
2	Imperméabilisation du mur guideau en remblai en rive gauche à l'aval du déversoir
3	Réalisation de visites de reconnaissance minimalement quatre fois par année, dont au moins une effectuée par un ingénieur
4	Réalisation d'inspections spéciales lorsque des alertes sont émises par Environnement Canada et suivant un tremblement de terre
5	Gestion proactive de la végétation herbacée ou arbustive pouvant gêner la visibilité sur l'étendue du barrage, notamment avant la réalisation des activités de surveillance
6	Enlèvement des arbres et débris ligneux dans le bief amont du déversoir lorsqu'identifiés lors des visites de reconnaissance ou des inspections

Afin de rencontrer les exigences de la LSB et son règlement d'application, une proposition d'exposé des correctifs et un calendrier de mise en œuvre pour le barrage du lac Loiselle (X2181546) sont élaborés et présentés au Tableau 11.2.

Tableau 11.2 Exposé des correctifs et calendrier de mise en œuvre pour le barrage du lac Loiselle (X2181546)

N°	DESCRIPTION	ÉCHÉANCE
1	Travaux de mise aux normes du barrage	Décembre 2027

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACB (Association Canadienne des barrages). 2007. Recommandations de sécurité des barrages.
- BANQ (Bibliothèque et archives nationales du Québec. 2024. Carte topographique du Canada à l'échelle de 1 :50 000, 31 G/16 East, Shawbridge, 1959. Récupéré de <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2277892>
- Canards Illimités Canada et le ministère de l'Environnement et Lutte contre les changements climatiques (MELCC), 2020. Cartographie détaillée des milieux humides des secteurs habités du sud du Québec – Données du projet global [ESRI Canada], Québec (Québec).
- CNRC (Conseil National de Recherches Canada). 2015. Code national du bâtiment.
- Chow V.T. 1959. Open-Channel Hydraulics. McGraw-Hill, New York.
- CÔTÉ, S. 2010. Critères de stabilité interne pour des matériaux de faible plasticité soumis à l'écoulement de l'eau. Mémoire de maîtrise, Université Laval.
- DIRECTION DE LA SÉCURITÉ DES BARRAGES (DSB). 2010, *Guide sur l'évaluation de la fiabilité des appareils d'évacuation*, Centre d'expertise hydrique du Québec
- ENVIRONNEMENT ET CHANGEMENT CLIMATIQUE CANADA. 2021. Données sur l'intensité, la durée et la fréquence des chutes de courte durée – Stations Saint-Jérôme, Sainte-Agathe-des-Monts et Montréal Mirabel International A. 26 mars 2021.
- ENVIRONNEMENT ET CHANGEMENT CLIMATIQUE CANADA. 2024. *Critères d'alertes météo publiques*. Récupéré sur : <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/types-previsions-meteorologiques-utilisation/publics/criteres-alertes-meteo.html#orageviolent> .
- GARNER S.J., FANNIN R.J. 2010. Understanding Internal Erosion: A Decade of Research Following a Sinkhole Event. International Journal on Hydropower and Dams. 17: 93-98.
- Geostack. 2024. Caractérisation géophysique et géotechnique du barrage du lac Loiselle.
- Google. 2022. Carte satellite Google Maps du lac Loiselle, Sainte-Anne-des-Lacs, Québec. Repéré le 17 janvier 2022.
- HUNT. 1986. Geotechnical Engineering Analysis and Evaluation. McGraw-Hill. États-Unis. 729 pages.
- IDRISI, I. M. ET BOULANGER, R. W. 2014. Soil Liquefaction During Earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute (EERI). Oakland, Californie, États-Unis, 235 pages et annexes.
- INSTITUT DE RECHERCHE ET DE DÉVELOPPEMENT EN AGROENVIRONNEMENT (IRDA). 2008. *Cartes pédologiques, feuillets 31G16102 et 31G16202*. Récupérés sur : <https://www.irda.qc.ca/fr/services/protection-ressources/sante-sols/information-sols/etudes-pedologiques/>
- Kayen et al. 2013. Shear-wave velocity-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 139(3):407-419. March 2013.

- LEROUEIL, S., LE BIHAN, J.-P., SEBAIHI, S., & ALICESCU, V. 2002. Hydraulic Conductivity of Compacted Tills from Northern Quebec. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(5), 1039-1049.
- MALENFANT-CORRIVEAU, M., CÔTÉ, J., KONRAD, J.-M. 2016. Hydraulic Conductivity of Compacted Till with Low Clay-Size Particle Content. *Proceedings of the 69th Canadian Geotechnical Conference*, Vancouver, Canada, October 2-5.
- MARCHE, CLAUDE. 2008. *Barrage, crues de rupture et protection civile*. Deuxième édition. Presses internationales Polytechnique.
- MINISTÈRE DES FORÊTS, DE LA FAUNE ET DES PARCS (MFFP). 2022. *Modèles numériques de terrain de résolution spatiale 1 m faits à partir de données lidar – Feuilles numériques 31G16NE et 31G16SE*, <https://www.foretouverte.gouv.qc.ca/>
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MELCC). 2022a. *Débits de crues et d'étiage*. En ligne <https://www.cehq.gouv.qc.ca/Crue_Etiage-Apps/index.html>. Consulté en août 2022.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MELCC). 2022b. *Fiche du barrage X2181546*. En ligne. <https://www.cehq.gouv.qc.ca/barrages/detail.asp?no_mef_lieu=X2181546>. Consulté le 14 septembre 2022.
- MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC (MTQ). 2020. *Manuel de conception des ponceaux*. Décembre 2020. Ministère des Transports du Québec. Bibliothèque nationale du Québec, Québec. 10 chap.
- OTIS, Sylvie (repertoire.barrages@environnement.gouv.qc.ca). RE: Demande de renseignements, [Message électronique à Serge Laforce], (serge.laforce@wsp.com), 27 juin 2024.
- RESSOURCES NATURELLES CANADA (RNCan). Série Canvec. Entités hydrographiques. 2021. En ligne : <https://maps.canada.ca/czs/index-fr.html>. Université de Montréal. 2009. Lac Loiselle, Municipalité de Sainte-Anne-des-Lacs.
- Université de Montréal. 2009. Lac Loiselle, Sainte-Anne-des-Lacs, MRC des Pays-d'en-Haut. Récupéré de <https://abvlacs.ca/lac-loiselle/>
- USACE. 2022. HEC-RAS 2D, version 6.2. Récupéré de <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/rasn/6.2>
- WAN, C. F., FELL, R. 2008. Experimental investigation of internal instability of soils in embankment dams and their foundations, The University of New South Wales: School of civil and environmental engineering, Sydney, Australia, 208 p.

ANNEXE

A FICHE TECHNIQUE DU BARRAGE



Accueil

Expertise hydrique et barrages**Répertoire des barrages****Fiche technique****IDENTIFICATION DU BARRAGE**

NOM DU BARRAGE : —
Numéro du barrage : X2181546

LOCALISATION

Région administrative : Laurentides
Municipalité : Sainte-Anne-des-Lacs
MRC : Les Pays-d'en-Haut
Coordonnées NAD83 : Latitude : 45° 51' 52"
Longitude : -74° 7' 30"
Nom du réservoir : Lac Loiselle
Territoire(s) : —
Aménagement(s) : —

**HYDROGRAPHIE**

Type	Numéro	Nom	Numéro	Nom du bassin primaire
Lac	57783	Loiselle, Lac	04300000	Outaouais, Rivière des
Cours d'eau	04010126	Marois, Ruisseau	04300000	Outaouais, Rivière des
Bassin	04010000	Nord, Rivière du	04300000	Outaouais, Rivière des
Bassin	04300000	Outaouais, Rivière des	04300000	Outaouais, Rivière des

CARACTÉRISTIQUES

Catégorie administrative : Forte contenance
Type(s) d'utilisation : Récréatif et villégiature

Hauteur du barrage : 7,39 m
Capacité de retenue : 132 930 m³
Hauteur de la retenue : 6,69 m
Longueur de l'ouvrage : 156 m
Type de barrage : Terre
Type de terrain de fondation : Till
Classe : C
Niveau des conséquences : —
Zone sismique : 4
Superficie du réservoir : 2 ha
Superficie du bassin versant : 1.91 km²
Longueur de refoulement : --- m

Année de construction : 1980
Année de modification : —

ÉVALUATION DE LA SÉCURITÉ

Étude d'évaluation de la sécurité : —
Année de la dernière étude réalisée : —
Année de la prochaine étude à réaliser : 2007

Exposé des correctifs et calendrier de mise en oeuvre

Réception : —
Étape d'analyse de l'approbation : —
Approbation : —
Étape de réalisation des correctifs : —

PROPRIÉTAIRE(S) OU MANDATAIRE(S)

Nom : Municipalité de la paroisse de Sainte-Anne-des-Lacs

Adresse : 773, chemin de Sainte-Anne-des-Lacs
 Sainte-Anne-des-Lacs (Québec)

Code postal J0R1B0

;

Nom : L'Ordre hospitalier de Saint-Jean-de-Dieu

Adresse : 10745, grande Allée
 Montréal (Québec)

Code postal H3L2M8

;

[Glossaire](#)

[Nouvelle recherche](#)

[Pour nous joindre](#)

« — » : le tiret indique que le renseignement n'était pas disponible au moment de la dernière mise à jour ou n'existe pas. C'est notamment le cas lorsque le barrage ou le cours d'eau n'a pas de désignation officielle à la [Commission de toponymie du Québec](#).

« personne physique » : indique que le propriétaire est une personne physique et que ses nom et adresse ne sont pas diffusés.

Évaluation de la page

[En savoir plus](#)

À quel point était-il facile d'obtenir l'information que vous recherchez aujourd'hui?



[Accueil](#) | [Plan du site](#) | [Accessibilité](#) | [Nous joindre](#) | [Politique de confidentialité](#) | [Recherche](#)

*Environnement,
 Lutte contre
 les changements
 climatiques,
 Faune et Parcs*

Québec 

[© Gouvernement du Québec, 2022](#)

ANNEXE

B RAPPORT DE VISITE DE RECENSEMENT (MELCCFP, 2021)

Identification					
Date de la visite :	2021-05-27	Heure d'arrivée :	10h12	Heure de départ :	11h26
Date de la rencontre :	N/A	Condition météorologique :	Soleil		7°C
Visité par :	Eric Martel, ing. # OIQ 139904				
Visité par :	Maxine Lacroix, ing. # OIQ 5062931				

Barrage(s)/ouvrage(s) visité(s)	
Numéro du barrage/lieu :	X2181546

Demande	
Provenance :	Demande d'un citoyen
Objectif :	Signalement de la présence d'un barrage non répertorié. La visite a donc pour objectif de procéder au recensement de l'ouvrage et de valider son assujettissement à la Loi sur la sécurité des barrages.

Intervenant(s) rencontré(s) <input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non	
Nom :	Implication :
Nom :	Implication :
Nom :	Implication :

Photo/Croquis/Mesure					
Photo/vidéo :	<input checked="" type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	Nombre :	42	Page annexée :	<input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non
Croquis :	<input checked="" type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	Nombre :	1	Page annexée :	<input checked="" type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
Appareil photo :	3 - Nikon CoolPix AW110 (Couleur armée, 2014, 52101527)				
Annexe(s) :	Oui	Précisez : Carte superficie réservoir et carte superficie bassin versant			
Hauteur du barrage mesurée :	Oui	Avec quel appareil : Niveau optique avec trépied - Ford F-250			

Mise en contexte	
Le 25 novembre 2020, Mme Karine Lussier Clément, ingénierie chez Norda Stelo a envoyé un courriel pour signaler la présence d'un barrage en terre non répertorié à l'exutoire du Lac Loiselle, sur le territoire de la Municipalité de Sainte-Anne-des-Lacs. Suite à cette information, une visite de l'ouvrage a été planifiée afin de valider les informations reçues, de vérifier s'il s'agit bel et bien d'un barrage au sens de la LSB et donner les suites appropriées, le cas échéant.	

Résumé de la visite et constats	
La DSB s'est présentée sur les lieux (45° 51' 52" -74° 7' 30" Nad 83) à partir du chemin des Martinets. Le barrage est localisé majoritairement sur le lot 1 920 469 du cadastre rénové mais l'extrémité droite est localisée en partie sur les lots 1 921 975, 1 920 433 et 1 921 976. Une fois sur le site, la présence d'un barrage en terre avec un déversoir libre sur le roc a été constatée. Les informations relatives à cet ouvrage ont été recueillies. Il est possible d'observer le roc	

affleurant à l'endroit du déversoir. Celui-ci a une longueur d'environ 3,5 m et une hauteur d'environ 0,9 m. Un repère de piquetage de Paquette et Associés a été observé sur le terrain.

Mesures faites sur le site :

- Hauteur du barrage : 7,39 m;
- Longueur : environ 156 m selon les mesures sur le terrain;
- Hauteur de retenue : 6,69 m;
- Pente du talus aval : de l'ordre de 40-41 degrés localement (entre 1V:1H et 1V:1,5H);
- Largeur en crête : minimum 3,8 m;
- Coordonnées de l'extrémité droite du barrage : 45° 51' 52.3" -74° 07' 32.7" Nad 83;
- Coordonnées de l'extrémité gauche du barrage : 45° 51' 53.7" -74° 07' 27.1" Nad 83.

Anomalies/observations sur le barrage lors de la visite :

- Présence de végétation importante sur le talus aval et la crête;
- De l'érosion a été observée localement au droit du talus amont;
- De la percolation a été observée localement au pied aval (l'eau et les sols étaient de couleur rouille laissant présager la présence d'ocre ferreuse);
- Le cours d'eau longe le pied aval sur une section à l'extrémité droite de la digue;
- Pente du talus aval abrupt.

Autres caractéristiques du barrage :

- État du barrage jugé «acceptable» selon les anomalies observées lors de la visite et d'après la description des types d'état dans l'Annexe III du règlement sur la sécurité des barrages;
- Fiabilité des appareils d'évacuation jugée «acceptable». Il s'agit d'un déversoir libre qui ne nécessite aucune gestion, toutefois, le manque d'information sur l'occurrence ou l'absence d'obstruction dans le passé ne permet pas de lui accorder une cote de fiabilité «adéquate». La largeur du déversoir est relativement étroite, la présence de quelques branches a été observée et la présence de la passerelle au dessus du déversoir pourrait occasionner une obstruction.

Assujettissement de l'ouvrage à la Loi sur la sécurité des barrages :

En vertu de l'article 2 de la Loi sur la sécurité des barrages (LSB), "barrage" s'entend de tout ouvrage destiné à dériver ou retenir les eaux d'un cours d'eau ou celles d'un lac ou réservoir mentionné dans le Répertoire toponymique du Québec ou dans l'un de ses suppléments. L'ouvrage de retenue est situé à l'exutoire du lac Loiselle sur un cours d'eau sans nom tributaire du ruisseau Marois, à Sainte-Anne-des-Lacs, dans la MRC Les pays-d'en-haut, dans les Laurentides. Par conséquent, l'ouvrage de retenue X2181546 correspond à un barrage au sens de la LSB.

Catégorie administrative du barrage :

En vertu des articles 4, 28 et 31 de la LSB, la catégorie administrative d'un barrage est déterminée à partir de la hauteur du barrage et de la capacité de retenue de celui-ci. La hauteur du barrage est définie à l'article 2 du Règlement sur la sécurité des barrages (RSB). Il s'agit de la distance verticale entre le point le plus bas du terrain naturel au pied aval du barrage et le point le plus élevé de la crête du barrage. Le point bas au pied aval a été considéré à l'endroit de la percolation observée tel que montré sur le croquis. L'élévation de la crête a été considérée sur la même coupe transversale approximativement. La différence d'élévation entre ces deux points est de 7,39 m.

Tel que défini à l'article 3 du RSB, la capacité de retenue d'un barrage situé à l'exutoire d'un lac est le volume total de la retenue mesuré au niveau maximal d'exploitation et est égale au produit de la superficie du réservoir par la hauteur de retenue. En vertu de l'article 3 du RSB, la hauteur de retenue est la distance verticale entre le point le plus bas du terrain naturel au pied aval du barrage et le niveau maximal d'exploitation qui selon l'article 4 du RSB correspond au niveau le plus élevé que peuvent atteindre les eaux retenues en exploitation normale. Le niveau maximal d'exploitation a été considéré comme étant le niveau du plan d'eau lors de la visite. Pour ce qui est du pied aval, il s'agit du même point considéré pour l'évaluation de la hauteur du barrage. La différence d'élévation entre ces deux points est de 6,69 m.

Puisque la hauteur du barrage est située entre 2,5 et 7,5 m et que la capacité de retenue du barrage est supérieure à 30 000 m³, la catégorie administrative du barrage X2181546 est «forte contenance» selon les articles 4, 28 et 31 de la LSB.

Calculs/vérifications faits au bureau

- Superficie du bassin versant basée sur l'Atlas : 1 911 990 m² (1,91 km²);
- Superficie du réservoir basée sur Atlas (Mosaique provinciale d'orthophotos actuelles) : 19 870 m² (1,99 ha);
- Capacité de retenue : 132 930 m³;
- Niveau de conséquence préliminaire : En raison de la présence d'une route collectrice (Chemin de Sainte-Anne-des-Lacs), de deux routes locales (chemin Fournel et chemin des Merisiers), de neuf résidences permanentes et d'une entreprise commerciale comptant moins de 50 employés (Matériaux Robert Boyer) et trois bâtiments de service du parc Henri-Piette, nous recommandons d'attribuer le niveau des conséquences préliminaire "moyen" au barrage X2181546;
- Zone sismique 4;
- En fonction de la végétation présente sur la digue, nous estimons que la digue a été construite il y plus de 40 ans;
- Nature de la fondation : Till selon indice sur le terrain (présence de blocs). Présence de roc affleurant au droit du déversoir. Till indifférencié (IA) selon la carte des dépôts de surface (l'épaisseur moyenne est supérieure à 1m).

Recommandation du statut de l'ouvrage

Ouvrage assujetti à la Loi sur la sécurité des barrages : Oui Non

Catégorie de barrage : Forte contenance

Recherche de titre

Recommandation de recherche de titre à faire : Oui Non

Recommandations au directeur de la sécurité des barrages

Transmettre une correspondance aux propriétaires confirmant l'inscription de l'ouvrage au Répertoire des barrages ainsi que les dispositions applicables en vertu de la LSB et sa responsabilité civile

Manquements constatés

Articles concernés :

RAPPORT DE VISITE RECENSEMENT

Signature des employés :



et



Date du rapport* : 2021-06-29

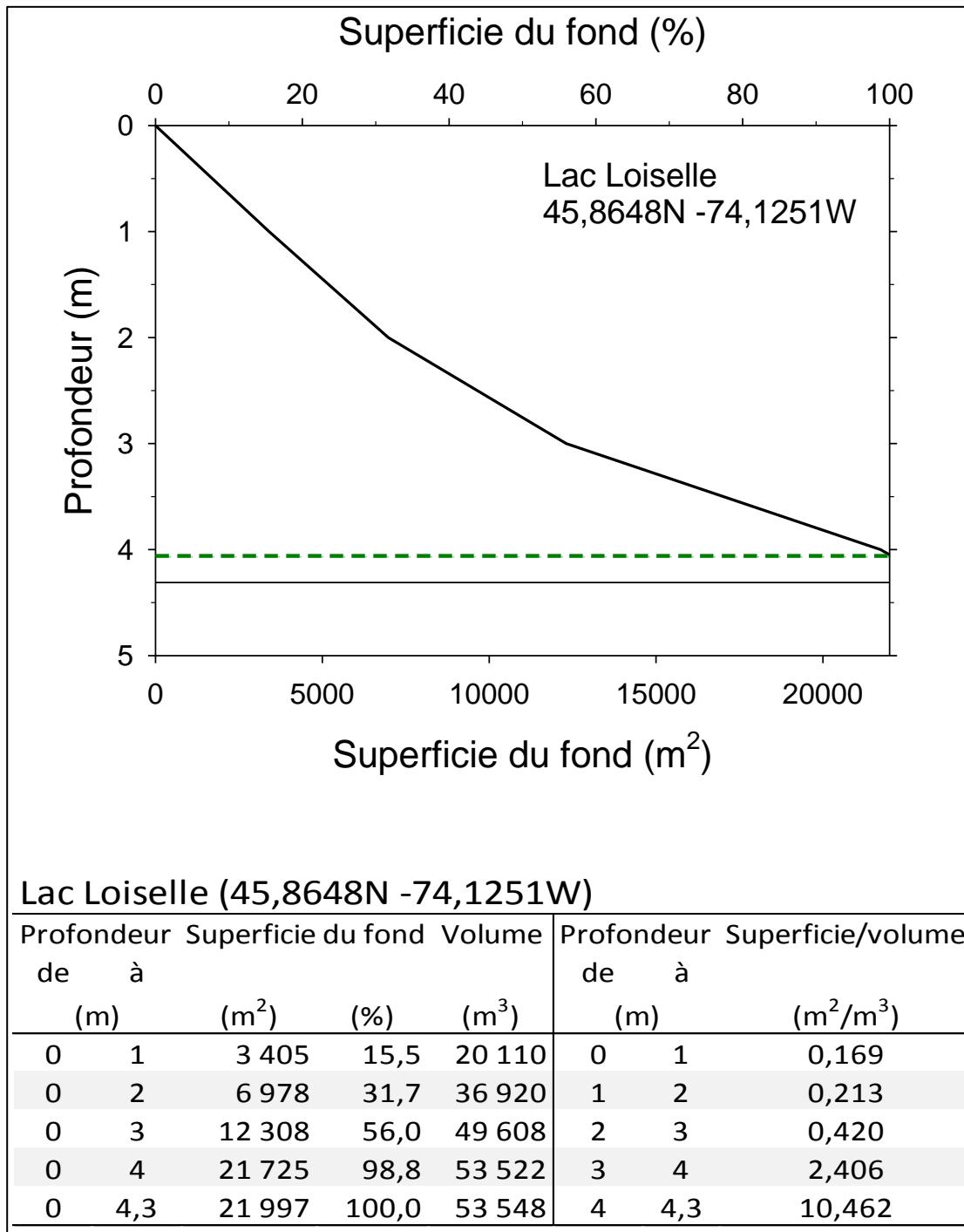
Numéro de l'intervention SAGO : 301537780

Numéro de suivi de la visite : 2 011 271 437

*Ce rapport a été produit par la Direction de la sécurité des barrages (DSB) du Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC) et à son usage exclusif. La qualité des informations contenues dans le présent document est basée sur les informations disponibles lors de la rédaction de celui-ci, sur les données fournies par des sources extérieures et sur des hypothèses énoncées dans le rapport. Toute utilisation ou copie de ce rapport en partie ou en totalité par une tierce partie ne peut se faire sans le consentement préalable de la DSB.

Hypsométrie du lac

Pour une définition de l'hypsométrie : www.crelaurentides.org/dossiers/eau-lacs/atlasdeslacs



Source : Richard Carignan, UdeM, 2013

ANNEXE

C RAPPORT D'INSPECTION (WSP, 2022)

INSPECTION DU BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546)

INSPECTION 2022

MUNICIPALITÉ DE SAINTE-ANNE-DES-LACS

NOVEMBRE 2022





INSPECTION DU BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546)

INSPECTION 2022

MUNICIPALITÉ DE SAINTE-ANNE-DES-LACS

VERSION FINALE

PROJET N° : 221-05525-00
DATE : NOVEMBRE 2022

WSP CANADA INC.
1135, BOULEVARD LEBOURGNEUF
QUÉBEC (QUÉBEC) G2K 0M5

TÉLÉPHONE : +1 418-623-2254
TÉLÉCOPIEUR : +1 418-624-1857
WSP.COM

SIGNATURES

PRÉPARÉ PAR



2022-11-24

Vincent Carrier, ing., M. Sc.
Nº OIQ : 5079982

RÉVISÉ PAR



2022-11-24

Michel Dolbec, ing., MBA
Nº OIQ : 34184

Le présent rapport a été préparé par WSP Canada Inc. (WSP) pour le compte de Municipalité de Sainte-Anne-des-Lacs conformément à l'entente de services professionnels. La divulgation de tout renseignement faisant partie du présent rapport incombe uniquement au destinataire prévu. Son contenu reflète le meilleur jugement de WSP à la lumière des informations disponibles au moment de la préparation du rapport. Toute utilisation que pourrait en faire une tierce partie ou toute référence ou toutes décisions en découlant sont l'entièvre responsabilité de ladite tierce partie. WSP n'accepte aucune responsabilité quant aux dommages, s'il en était, que pourrait subir une tierce partie à la suite d'une décision ou d'un geste basé sur le présent rapport. Cet énoncé de limitation fait partie du présent rapport.

L'original du document technologique que nous vous transmettons a été authentifié et sera conservé par WSP pour une période minimale de 10 ans. Étant donné que le fichier transmis n'est plus sous le contrôle de WSP et que son intégrité n'est pas assurée, aucune garantie n'est donnée sur les modifications ultérieures qui peuvent y être apportées.

ÉMISSION/RÉVISION	PRÉPARÉ POUR	DATE
Préliminaire	Municipalité de Sainte-Anne-des-Lacs	8 novembre 2022
Finale	Municipalité de Sainte-Anne-des-Lacs	24 novembre 2022

ÉQUIPE DE RÉALISATION

MUNICIPALITÉ DE SAINTE-ANNE-DES-LACS

Directeur du Service de l'environnement Mathieu Langlois, géogr., M. Env.

WSP CANADA INC. (WSP)

Directeur de projet Michel Dolbec, ing., MBA

Ingénieur de projet Vincent Carrier, ing., M. Sc.

Technicienne, arpenteure Daphné Poitras

Traitement de texte et édition Nancy Galarneau

Référence à citer :

WSP. 2022. *Inspection du barrage du lac Loiselle (X2181546) – Inspection 2022*. Rapport de WSP Canada Inc. à la Municipalité de Sainte-Anne-des-Lacs. 8 p. et annexes.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	1
2	INSPECTION	2
2.1	MÉTHODOLOGIE	2
2.2	CONDITIONS D'INSPECTION	3
2.3	DESCRIPTION SOMMAIRE DE L'OUVRAGE	3
3	BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546)	5
3.1	DIGUE EN TERRE.....	5
3.1.1	PENTE AMONT.....	5
3.1.2	CRÊTE DE LA DIGUE	5
3.1.3	PENTE AVAL	5
3.1.4	BIEF AVAL	6
3.1.5	CONCLUSION PARTIELLE	6
3.2	DÉVERSOIR	6
3.2.1	BIEF AMONT.....	6
3.2.2	CRÊTE	6
3.2.3	PENTE AVAL ET BIEF AVAL	7
3.2.4	MUR GUIDEAU EN REMBLAI	7
3.2.5	CONCLUSION PARTIELLE	7
4	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	8

TABLE DES MATIÈRES

TABLEAUX

TABLEAU 2.1	CARACTÉRISTIQUES DU BARRAGE	3
-------------	-----------------------------------	---

FIGURES

FIGURE 2.1	LOCALISATION DU BARRAGE LOISELLE ET SES PRINCIPALES COMPOSANTES	4
------------	---	---

ANNEXES

A	FICHE TECHNIQUE DU BARRAGE
B	FICHE D'INSPECTION DU BARRAGE
C	RAPPORT PHOTOGRAPHIQUE

1 INTRODUCTION

La Municipalité de Sainte-Anne-des-Lacs est co-propriétaire avec l'Ordre hospitalier de Saint-Jean-de-Dieu du barrage à forte contenance du lac Loiselle portant le numéro X2181546 au Répertoire des barrages du Québec. Cette inspection découle des obligations associées à la Loi sur la sécurité des barrages (LSB) et son règlement d'application, le Règlement sur la sécurité des barrages (RSB). À cet effet, la Municipalité a mandaté WSP Canada Inc. (WSP) pour réaliser l'inspection de ce barrage au cours de l'année 2022.

Pour répondre aux exigences du RSB, les activités de surveillance, dont fait partie l'inspection du présent rapport, doivent être effectuées selon la nature et la fréquence prescrites à l'article 41. Selon l'article 42 du RSB, l'inspection vise à vérifier, sous tous ses aspects, l'état du barrage et à en surveiller le comportement afin de tenir à jour le Registre du barrage en plus de répondre aux objectifs et aux critères des différents articles du RSB qui sont applicables aux barrages catégorisés « forte contenance ».

Le présent rapport d'inspection pourra être intégré dans l'étude d'évaluation de la sécurité des barrages. Ce rapport présente la méthodologie employée, une description des ouvrages et des constats effectués lors de l'inspection de WSP, ainsi qu'une brève conclusion des observations accompagnée de recommandations.

2 INSPECTION

2.1 MÉTHODOLOGIE

Préalablement à l'inspection, une revue de la documentation disponible a été réalisée afin de cibler les principales composantes du barrage et de constater leur état selon les inspections et les visites de reconnaissance effectuées par le passé. Les principaux documents, publics ou fournis par la Municipalité, consultés par WSP sont les suivants :

- RICHARD CARIGNAN. Juin 2009. Levés bathymétriques et DGPS : mai 2009. Université de Montréal. Lac Loiselle, Municipalité de Sainte-Anne-des-Lacs;
- MELCC. 2021. *Rapport de visite – Recensement*. Par la Direction de la sécurité des barrages. Lac Loiselle;
- MELCC. 2021. *Croquis – Barrage X2181546*. Par la Direction de la sécurité des barrages. Barrage du lac Loiselle;
- MFFP. 2019. Forêt Ouverte. <https://www.foretouverte.gouv.qc.ca/>;
- MELCC. 2022. Fiche technique du barrage du lac Loiselle. Présentée à l'annexe A du présent rapport. <https://www.cehq.gouv.qc.ca/barrages/default.asp>;
- DEPARTMENT OF MINES AND TECHNICAL SURVEYS. 1959. Shawbridge, Quebec. Surveys and Mapping Branch. Carte topographique du secteur.

Suivant la revue de la documentation disponible, WSP a procédé à l'inspection du barrage à pied et sans équipement particulier. L'inspection a été effectuée le 14 juillet 2022 par monsieur Vincent Carrier, ing., M. Sc., ingénieur géotechnicien chez WSP. Une campagne de relevés topographiques de terrain à l'aide d'un GPS et d'une station totale a aussi été effectuée en parallèle au droit du barrage et des environs.

Cette inspection a permis de compléter une fiche d'inspection des composantes du barrage et celle-ci est présentée à l'annexe B du présent rapport. Un rapport photographique est aussi présenté à l'annexe C afin de supporter les observations rapportées dans ce rapport ainsi que celles inscrites sur la fiche d'inspection.

Les informations présentées dans ce rapport d'inspection sont basées sur des observations exclusivement visuelles effectuées par l'ingénieur lors de la visite du site ainsi que sur les informations contenues dans les documents préalablement consultés. Les observations documentées dans ce rapport d'inspection sont aussi accompagnées de mesures sommaires relevées sur le terrain, conjointement avec l'arpenteuse lors de la réalisation en parallèle du relevé topographique du site.

Aucun essai ni relevé n'a été réalisé pour déterminer la qualité des matériaux des composantes du barrage. Selon le Règlement sur la sécurité des barrages, l'état d'un élément d'un barrage peut être qualifié de :

- **Très bon** : cet élément du barrage ne présente aucune anomalie ou comporte de minimes détériorations locales considérées normales ou sans conséquences;

- **Bon** : cet élément du barrage ne présente que des détériorations mineures ou des anomalies qui ne mettent pas en cause le bon fonctionnement des autres éléments du barrage;
- **Acceptable** : cet élément du barrage présente des détériorations qui demandent des réparations sans cependant représenter un danger à court terme pour la structure; un tel état nécessite des travaux d'entretien et de réfection à court ou moyen terme, sans quoi cet élément du barrage deviendra de plus en plus vulnérable. Cet élément peut également présenter des anomalies qui n'affectent pas sa sécurité à court terme, mais qui nécessitent un suivi particulier;
- **Pauvre ou indéterminé** : cet élément du barrage présente une ou plusieurs détériorations graves pouvant mettre en cause sa stabilité, rendre inopérantes certaines de ses parties ou présenter des anomalies graves qui sont susceptibles de compromettre sa sécurité ou encore, il est impossible de se prononcer sur son état.

2.2 CONDITIONS D'INSPECTION

Lors de l'inspection, les conditions météorologiques étaient nuageuses avec des épisodes d'averses et orages et la température était d'environ 21 °C. L'écoulement au droit du déversoir était régulier lors de la visite. La présence d'un chemin piéton en crête a permis l'observation de sa surface, mais la présence de forte végétation a limité l'observation du parement amont.

2.3 DESCRIPTION SOMMAIRE DE L'OUVRAGE

Le barrage du lac Loiselle (X2181546) est localisé à l'extrême sud du lac Loiselle, sur le territoire de la municipalité de Sainte-Anne-des-Lac, dans la région administrative de la MRC des Pays-d'en-Haut, dans la région administrative des Laurentides. Les coordonnées géodésiques du barrage, répertoriées dans le système NAD83, sont les suivantes :

- latitude : 45° 51' 52" ;
- longitude : -74° 7' 30".

Le Tableau 2.1 présente les principales caractéristiques du barrage du lac Loiselle indiquées sur la fiche technique du MELCC tandis que la Figure 2.1 présente la localisation du barrage et des environs. La fiche technique du barrage est présentée à l'annexe A.

Tableau 2.1 Caractéristiques du barrage

Numéro du barrage	X2181546
Type de barrage	Digue en terre
Catégorie administrative	Forte contenance
Type d'utilisation	Récréatif et villégiature
Classe	C
Hauteur du barrage	7,39 m
Capacité de retenue	132 930 m ³



Figure 2.1 Localisation du barrage Loiselle et ses principales composantes

Le barrage est facilement accessible en aval par le biais d'un sentier pédestre à partir du chemin des Martinets ou en rive gauche à partir d'un terrain privé, soir le 19, chemin des Érables. Un chemin pédestre est présent tout au long de la crête du barrage et permet de circuler librement. Un pont de bois permet de traverser à pied le canal du déversoir situé en rive droite de la digue en terre (côté ouest).

L'année de construction du barrage n'est pas connue. Selon le rapport de recensement, sa construction serait antérieure à 1980. En complément, la consultation de cartes historiques permet de noter la notation « dam » en 1959, au sud du lac Loiselle, à l'emplacement du barrage actuel.

La digue en terre semble avoir été construite à partir d'un cran de roc en rive gauche jusqu'au canal déversoir, aménagé au roc. Il est difficile de déterminer avec exactitude la limite de la digue en terre et de la présence ou non d'une digue de fermeture à l'extrémité est en raison de l'aménagement du terrain privé. En ce qui concerne l'extrémité ouest de la digue, celle-ci se termine à l'approche du canal du déversoir qui, pour sa part, semble aménagé dans le roc avec des parois rocheuses apparentes au droit des deux rives en aval du pont de bois. La fondation de la digue semble être construite en majorité sur les dépôts meubles et la présence de blocs erratiques a été observée en son pied. Considérant l'élévation de la crête et celle du terrain au pied aval de la digue mesurées lors du levé topographique, la hauteur du barrage calculée est de 7,37 mètres.

3 BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546)

3.1 DIGUE EN TERRE

3.1.1 PENTE AMONT

La pente amont de la digue (portion visible hors de l'eau) est d'une hauteur variant généralement de 0,5 à 1,0 mètre et est fortement végétalisée (arbustes, arbres matures). Le parement amont ne dispose pas de protection contre l'érosion. Des signes d'érosion ont été observés à certains endroits et se manifestent principalement par des décrochements mineurs jusqu'au niveau des hautes eaux du lac et la présence de zones en porte-à-faux avec déchaussement de racines. Des chemins d'accès vers le lac (anthropiques) ont été observés et un léger abaissement de la crête ainsi que des signes d'érosion ont été observés à ces endroits. Le roc a pu être observé à la surface au pied du talus amont à proximité de l'extrémité est de la digue.

3.1.2 CRÊTE DE LA DIGUE

Le chemin pédestre aménagé sur le barrage correspond à la crête de la digue en terre. La surface est généralement régulière et horizontale avec certaines zones de pente vers le réservoir au droit des chemins d'accès au lac. La surface est en terre en son centre et recouverte d'herbes rases, d'arbres et d'arbustes de part et d'autre du chemin. La largeur de la crête est généralement supérieure à 3,7 mètres avec une largeur généralement supérieure à l'extrémité est. Une clôture privée a été observée en crête environ au premier tiers du linéaire, à partir de l'extrémité ouest.

3.1.3 PENTE AVAL

La pente aval de la digue est boisée par des arbres matures ainsi que quelques arbres morts et généralement recouverte d'un couvert végétal à l'exception de zones de décrochement de surface ou d'érosion. La présence de chemins anthropiques au droit du talus aval (chemin terre, escalier en bois) a été notée. La portion supérieure du talus est très boisée (arbres juvéniles et matures, arbustes) à l'exception du secteur de l'escalier piéton. À ce même endroit, une zone de sols dénudés présentant des signes d'érosion et de déchaussement des racines a pu être observée. La pente du côté aval est généralement de l'ordre de 34 à 41°, soit d'environ 1,2H:1V à 1,5H:1V sur une hauteur de 6 mètres. Plusieurs zones présentent localement une pente de 45° (1H:1V) ou plus, accompagnées d'un déchaussement partiel des racines ce qui rend difficile les déplacements le long du talus. Des zones de sols humides sont présentes en bas de talus et à la transition vers le terrain aval.

3.1.4 BIEF AVAL

Au pied de la pente aval, à proximité du chemin d'accès et de l'escalier, une zone humide avec des sols mous et saturés a été observée lors de la visite et s'étend sur environ 25 mètres le long du linéaire de la digue en terre. La présence importante de blocs erratiques (ainsi que des cavités entre les blocs) en bordure de cette zone ne permet pas d'en circonscrire les dimensions exactes vers l'est. Cette zone rejoint l'écoulement d'eau vers l'ouest, en provenance probable des exfiltrations sous le mur guideau en remblai du déversoir (voir section 3.2.4), le tout vers un émissaire secondaire au déversoir qui rejoint l'émissaire principal en aval. Le bief aval du terrain au pied de la digue est boisé (arbres matures) et présente une pente faible en s'éloignant de la digue jusqu'à une zone plane de milieu humide à environ 50 mètres du barrage.

3.1.5 CONCLUSION PARTIELLE

Dans son ensemble, la digue en terre présente des signes d'érosion mineurs au parement amont à plusieurs endroits, notamment au droit des accès au lac. La crête est généralement horizontale et plane. Le parement aval est très boisé, généralement de forte pente et présente des zones de sols dénudés avec des signes d'érosion et de décrochements du couvert végétal. Des zones de sols saturés et mous ont été observées au pied aval ainsi qu'au droit du terrain aval dans le secteur de l'escalier menant à la crête.

3.2 DÉVERSOIR

3.2.1 BIEF AMONT

L'évacuation du barrage s'effectue par un déversoir en enrochement à l'extrémité ouest du barrage et son bief amont correspond au lac Loiselle. Le lit du cours d'eau à l'entrée du déversoir, visible depuis la surface de l'eau, est de nature granulaire et semble composé de sable, gravier et silt. La présence de pierres de dimension variable a été notée dans le bief amont. L'entrée du déversoir présente des signes d'érosion mineurs au droit du talus des rives dans la zone des hautes eaux. Lors de la visite, des arbres matures déracinés ont été observés dans l'eau en amont, à environ 10 mètres dans l'axe du déversoir.

3.2.2 CRÊTE

La crête du déversoir, agissant à titre de seuil pour le niveau d'eau, se situe sous le pont de bois permettant de traverser l'émissaire vers la rive droite. Il est composé de pierres de diamètre variable et sa fondation n'est pas connue. Un affleurement rocheux est visible au droit de la rive droite, à l'ouest, dans l'axe du déversoir.

3.2.3 PENTE AVAL ET BIEF AVAL

La pente aval est composée du même calibre de pierres que le seuil et le roc est visible, sous la forme de parois rocheuses, de part et d'autre de l'émissaire. Le profil des parois de roc est variable et, en rive droite, discontinue. La pente aval du déversoir à partir du seuil est d'environ 3 % jusqu'à l'atteinte d'un affleurement rocheux au centre-ligne du cours d'eau. Cet affleurement rocheux présente une face subverticale et, à cet endroit, l'écoulement se divise entre l'émissaire principal (en ligne avec le déversoir et vers le sud) et l'émissaire secondaire (sous le mur guideau en remblai, à l'est vers le pied aval de la digue). Lors de la visite, l'écoulement du déversoir était majoritairement dirigé vers ce dernier. L'écoulement en provenance de ces deux émissaires se rejoint un peu plus loin en aval avant d'arriver au chemin d'accès piétonnier vers le barrage.

3.2.4 MUR GUIDEAU EN REMBLAI

Un remblai de type mur guideau a été noté en aval au droit du changement abrupt de pente du déversoir (affleurement rocheux). Ce remblai semble composé principalement d'enrochement de calibre variable ainsi que de terre et agit à titre de fermeture entre le déversoir et le terrain aval de la digue en terre pour diriger l'écoulement vers le bief aval du déversoir.

Tel que mentionné à la section 3.2.3, une grande portion de l'écoulement du déversoir s'infiltre dans ce mur en remblai, en direction du pied aval de la digue vers l'est. Le parement amont de ce mur présente des signes importants d'érosion et de lessivage. La paroi est principalement composée de pierres, tandis que le talus aval est composé de pierres et de terre et présente une faible densité de végétation et d'importantes venues d'eau sont localisées en pied du talus. La crête est d'une largeur inférieure à 2 m et présente quelques arbres. Selon le représentant de la Municipalité rencontré sur le site, cet écoulement est accentué en période de crues et l'eau du déversoir atteint par moments un état de surverse en crête du mur guideau en remblai, en direction du terrain aval de la digue en terre.

3.2.5 CONCLUSION PARTIELLE

Le déversoir, situé à l'extrême ouest de la digue en terre, est composé d'un seuil en enrochement avec une fondation inconnue. La pente du déversoir est faible, l'écoulement était continu lors de la visite et celle-ci ne présente pas de signes d'érosion. Des parois de roc sont présentes aux rives sur un certain tronçon du parement aval jusqu'à l'atteinte de l'affleurement rocheux. Finalement, le déversoir inclut un mur guideau en remblai en aval et celui-ci présente certaines anomalies. Le parement amont du remblai est érodé et des venues d'eau importantes ont été notées en aval du talus ce qui forme un émissaire secondaire au déversoir et l'écoulement alimente une zone humide et saturée au pied aval de la digue en terre.

4 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La Municipalité de Sainte-Anne-des-Lacs a mandaté WSP Canada Inc. pour réaliser l'inspection par un ingénieur du barrage du lac Loiselle (X2181546) afin de répondre aux prescriptions de la *Loi sur la sécurité des barrages* et ses règlements. L'inspection a été effectuée le 14 juillet avec la présence d'un représentant de la Municipalité pour accéder à l'ouvrage. Une campagne de relevés topographiques a été effectuée au droit du barrage et du bief aval, en parallèle à cette inspection.

Des anomalies visuelles ont été observées lors de la visite et incluent notamment une pente de talus aval très abrupte, une forte végétation sur la digue, la présence de zones humides au droit du pied aval et de l'écoulement au droit du déversoir qui est dirigé le long du pied aval de la digue. À cet effet, l'état de la digue en terre et de l'appareil d'évacuation sont tout deux qualifiés comme étant « acceptable » et les anomalies observées semblent exister depuis plusieurs années et ne semblent pas représenter un danger à court terme pour la structure, mais demandent des réparations à court ou moyen terme.

En effet, il est recommandé à **court terme** de procéder à l'enlèvement des arbres morts dans le bief amont du déversoir, de corriger l'écoulement du déversoir en aval afin qu'il ne soit plus dirigé vers le pied aval de la digue en terre, puisque cette condition n'est pas optimale pour sa stabilité, et de procéder à un suivi de la condition de zone humide au pied aval de la digue en terre par le biais de visites plus fréquentes au site (ex : crue, étiage, automne).

À **moyen terme**, il est recommandé de procéder à des travaux correctifs du talus aval incluant notamment l'adoucissement de la pente, l'enlèvement des arbres et de la végétation, la protection contre l'érosion en pied de talus et l'aménagement d'un fossé collecteur des écoulements potentiels en pied de talus. Un contrôle de la végétation (talus amont, crête et talus aval) ainsi que des travaux de protection contre l'érosion du parement amont jusqu'à la revanche en crête sont aussi recommandés. Finalement, une intervention au droit du pont de bois traversant le déversoir pourrait être envisagée afin de limiter le risque de restrictions hydrauliques en cas d'obstruction.

En conclusion, le barrage du lac Loiselle (X2181546), dans son ensemble, est jugé dans un état qualifié comme étant « **acceptable** », selon les critères du RSB.

ANNEXE

A FICHE TECHNIQUE DU BARRAGE

Répertoire des barrages

Fiche technique

IDENTIFICATION DU BARRAGE

NOM DU BARRAGE : —
Numéro du barrage : X2181546

LOCALISATION
Région administrative : Laurentides
Municipalité : Sainte-Anne-des-Lacs
MRC : Les Pays-d'en-Haut
Coordonnées NAD83 : Latitude : 45° 51' 52"
 Longitude : -74° 7' 30"
Nom du réservoir : Lac Loiselle
Territoire(s) : —
Aménagement(s) : —



HYDROGRAPHIE

Type	Numéro	Nom	Numéro	Nom du bassin primaire
Lac	57783	Loiselle, Lac	04300000	Outaouais, Rivière des
Cours d'eau	04010126	Marois, Ruisseau	04300000	Outaouais, Rivière des
Bassin	04010000	Nord, Rivière du	04300000	Outaouais, Rivière des
Bassin	04300000	Outaouais, Rivière des	04300000	Outaouais, Rivière des

CARACTÉRISTIQUES

Catégorie administrative : Forte contenance
Type(s) d'utilisation : Récréatif et villégiature

Hauteur du barrage : 7,39 m
Capacité de retenue : 132 930 m³
Hauteur de la retenue : 6,69 m
Longueur de l'ouvrage : 156 m
Type de barrage : Terre
Type de terrain de fondation : Till
Classe : C
Niveau des conséquences : —
Zone sismique : 4
Superficie du réservoir : 2 ha
Superficie du bassin versant : 1.91 km²
Longueur de refoulement : --- m

Année de construction : 1980
Année de modification : —

ÉVALUATION DE LA SÉCURITÉ

Étude d'évaluation de la sécurité
Année de la dernière étude réalisée : —
Année de la prochaine étude à réaliser : 2007

Exposé des correctifs et calendrier de mise en oeuvre

Réception : —
Étape d'analyse de l'approbation : —
Approbation : —
Étape de réalisation des correctifs : —

PROPRIÉTAIRE(S) OU MANDATAIRE(S)

Nom : Municipalité de la paroisse de Sainte-Anne-des-Lacs

Adresse : 773, chemin de Sainte-Anne-des-Lacs
 Sainte-Anne-des-Lacs (Québec)

Code postal J0R1B0

:

Nom : L'Ordre hospitalier de Saint-Jean-de-Dieu

Adresse : 10745, grande Allée
 Montréal (Québec)

Code postal H3L2M8

:

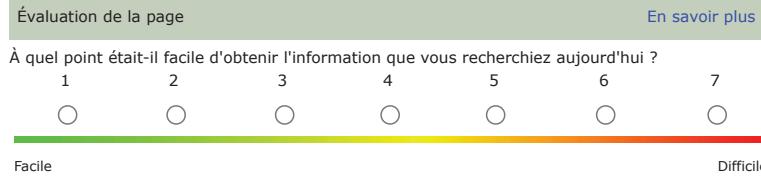
[Glossaire](#)

[Nouvelle recherche](#)

[Pour nous joindre](#)

« — » : le tiret indique que le renseignement n'était pas disponible au moment de la dernière mise à jour ou n'existe pas. C'est notamment le cas lorsque le barrage ou le cours d'eau n'a pas de désignation officielle à la [Commission de toponymie du Québec](#).

« personne physique » : indique que le propriétaire est une personne physique et que ses nom et adresse ne sont pas diffusés.



[Accueil](#) | [Plan du site](#) | [Accessibilité](#) | [Nous joindre](#) | [Politique de confidentialité](#) | [Recherche](#)

Québec 

[© Gouvernement du Québec, 2022](#)

ANNEXE

B FICHE D'INSPECTION DU BARRAGE



RAPPORT D'ACTIVITÉ DE SURVEILLANCE

Déversoir en enrochement

Ref / WSP : 221-05525-00

Client :	Municipalité de Sainte-Anne-des-Lacs				Ref / WSP : 221-05525-00		
Objet :	Inspection du barrage du lac Loiselle						
Site :	Lac Loiselle, Sainte-Anne-des-Lacs, Québec						
Type d'activité :	<input type="checkbox"/> Visite de reconnaissance				<input type="checkbox"/> Inspection régulière		
# barrage DSB :	X2181546				<input checked="" type="checkbox"/> Inspection effectuée par : Vincent Carrier, ing., M. Sc.		
Date :	14 juillet 2022				Météo / temp. °C : Nuageux, averses et orages / 21 °C		
Points à vérifier	Oui	Non	pas observé	s.o.	État général normal / à surveiller	Photo n°	Remarques
1.0 Accès et sécurité							
1.1 Accès routier	x	x					
1.2 Accès à pied	x						
1.3 Barrière et clôture de sécurité	x						
1.4 Signalisation	x						
2.0 Brief amont (partie visible)							
2.1 Signes de déplacement de l'enrochement			x				Absence d'enrochement
2.2 Accumulation de débris	x					x	À corriger. Arbres matures déracinés et dans l'eau devant l'entrée du déversoir.
2.3 Obstruction de l'écoulement		x					Absence de protection contre l'érosion
2.4 Protection contre l'érosion	x						Légère érosion observée aux rives amont
2.5 Érosion dans la pente	x						5, 6
2.6 Autres conditions inhabituelles	x						
3.0 Seuil déversant central							
3.1 Crête non horizontale visuellement	x						
3.2 Écoulement uniforme sur le seuil ou la crête déversante	x						
3.3 Crête réduite en largeur		x					
3.4 Évidence de réparation	x						
3.5 Protection contre l'érosion	x						6, 7
3.6 Érosion observée	x						Fond du déversoir composé de pierres de diamètre variable. Fondation inconnue
3.7 Signes de déplacement de l'enrochement	x						
3.8 Si présent, écran d'étranglement endommagé		x					
3.9 Obstruction de l'écoulement	x						
3.10 Autres conditions inhabituelles	x						
4.0 Parement aval du déversoir (partie visible) et terrain aval							
4.1 Tassement / affaissement différentiel	x						
4.2 Signes de déplacement de l'enrochement	x						
4.3 Affouillement	x						
4.4 Protection contre l'érosion	x						7
4.5 Érosion dans la pente	x						Protection partielle. Roc en rives près du seuil et ensuite sols exposés.
4.6 Restrictions hydrauliques en aval	x						
4.7 Exfiltration sur le talus	x					x	8
4.8 Évidence de réparation	x					x	Perte d'eau à l'affleurement rocheux et la connexion au mur guideau en remblai.
4.9 Autres conditions inhabituelles	x					x	L'écoulement en aval, lors de la visite, est divisé entre l'émissaire et le long du pied aval de la digue.



RAPPORT D'ACTIVITÉ DE SURVEILLANCE

Déversoir en érolement

Site : Lac Loiselle, Sainte-Anne-des-Lacs, Québec

barrage CEHQ : X2181546

Ref / WSP : 221-05525-00

Points à vérifier	Oui	Non	pas observé	s.o.	État général normal	Photo n° à surveiller	Remarques
-------------------	-----	-----	-------------	------	---------------------	-----------------------	-----------

5.0 Mur guideau en remblai

5.1 Tassement / affaissement différentiel	x						8, 9 Surface de la crête irrégulière.
5.2 Fossé de drainage (fonctionnel / obstruction)	x						
5.3 Sorties d'eau visibles	x				x	10, 11, 12	À corriger. Plusieurs zones de sorties d'eau au pied du mur guideau en remblai.
5.4 Signe de turbidité dans l'eau	x						
5.5 Zones humides ou molles	x						Zones humides en pied.
5.6 Protection contre l'érosion	x				x		
5.7 Érosion dans la pente	x				x		À corriger. Forte érosion (pente s'approchant de la verticale et matériaux de remblai exposés en amont du mur en remblai).
5.8 Évidences de réparation	x						
5.9 Végétation (vivante / morte) et/ou débris	x						
5.10 Autres conditions inhabituelles				x			9 Faible densité de végétation vivante, majoritairement localisée en crête.

6.0 Observations complémentaires

Dès venues d'eau importantes ont été notées au pied du talus aval du mur guideau en remblai qui longe le bief aval du déversoir. L'écoulement longe le pied aval de la digue en terre. Selon le représenté de la municipalité, cet écoulement est accentué en période de crue.

6.0 État général du déversoir en érolement - Règlement sur la sécurité des barrages - chapitre S-3.1.01, r.1

Très bon	cet élément du barrage ne présente aucune anomalie ou comporte de minimes déteriorations locales considérées normales ou sans conséquences
Bon	cet élément du barrage ne présente que des déteriorations mineures ou des anomalies qui ne mettent pas en cause le bon fonctionnement des autres éléments du barrage;
Acceptable	cet élément du barrage présente des déteriorations qui demandent des réparations sans cependant représenter un danger à court terme pour la structure; un tel état nécessite des travaux d'entretien et de réfection à court ou moyen terme, sans quoi cet élément du barrage deviendra de plus en plus vulnérable. Cet élément peut également présenter des anomalies qui n'affectent pas sa sécurité à court terme mais qui nécessitent un suivi particulier.
X	
Pauvre ou indéterminé	cet élément du barrage présente une ou plusieurs déteriorations graves pouvant mettre en cause sa stabilité, rendre inopérantes certaines de ses parties ou présenter des anomalies graves qui sont susceptibles de compromettre sa sécurité ou encore, il est impossible de se prononcer sur son état

Signature de l'inspecteur :

Date: 2022-11-03



RAPPORT D'ACTIVITÉ DE SURVEILLANCE

Digue en terre

Client :	Municipalité de Sainte-Anne-des-Lacs				Ref / WSP : 221-05525-00		
Objet :	Inspection du barrage du lac Loiselle						
Site :	Lac Loiselle, Sainte-Anne-des-Lacs, Québec						
Type d'activité :	<input type="checkbox"/> Visite de reconnaissance				<input type="checkbox"/> Inspection régulière		
# barrage DSB :	X2181546				Inspection effectuée par : Vincent Carrier, ing., M. Sc.		
Date :	14 juillet 2022				Météo / temp. °C : Nuageux, averses et orages / 21 °C		
Points à vérifier	Oui	Non	pas observé	S.O.	Etat général normal / à surveiller	Photo(s) n°	Remarques
1 Accès et sécurité							
1.1 Accès routier	x	x					
1.2 Accès à pied	x						
1.3 Barrière et clôture de sécurité	x	x					
1.4 Signalisation	x						
2 Crête de la digue							
2.1 Tassement / affaissement différentiel	x						
2.2 Désalignement latéral	x						
2.3 Crête non horizontale visuellement	x						
2.4 Fissures (longitudinale ou transversale)	x						
2.5 Crête réduite en largeur	x						
2.6 Évidence de réparation	x						
2.7 Si présent, écran d'étanchéité endommagé	x						
2.8 Instrumentation endommagée	x						
2.9 Végétation et/ou débris (vivante / morte) et/ou débris	x						
2.10 Autres conditions inhabituelles				x			
3 Talus amont de la digue (partie visible)							
3.1 Tassement / affaissement différentiel	x						
3.2 Dépression, cavitation, effondrement local	x				x		23
3.3 Bombement convexe (local ou global)	x						
3.4 Fissures (longitudinale ou transversale)	x						
3.5 Protection contre l'érosion	x						
3.6 Érosion dans la pente	x				x		23,25
3.7 Si présent, écran d'étanchéité amont endommagé	x						
3.8 Végétation (vivante / morte) et/ou débris	x				x		24, 27, 28
3.9 Terrain d'animaux fouisseurs	x						
3.10 Instrumentation endommagée							
3.11 Autres conditions inhabituelles	x				x		23,25
4 Talus aval de la digue (partie visible)							
4.1 Tassement / affaissement différentiel	x				x		19 - 21
4.2 Dépression, cavitation, effondrement local	x				x		14
							Dépressions et sols dénudés à la proximité de l'escallier.
							Zones de décrochements localisés.



RAPPORT D'ACTIVITÉ DE SURVEILLANCE

Digue en terre

Site : Lac Loiselle, Sainte-Anne-des-Lacs, Québec

barrage DSB : X2181546

Ref / WSP : 221-05525-00

Points à vérifier		Oui	Non	Pas observé	s.o.	Etat général normal	Photo n° à surveiller	Remarques
-------------------	--	-----	-----	-------------	------	---------------------	-----------------------	-----------

4 Talus aval de la digue (partie visible)	
4.3 Bombement convexe (local ou global)	x
4.4 Fissures (longitudinale ou transversale)	x
4.5 Protection contre l'érosion	x
4.6 Érosion dans la pente	x
4.7 Zone humide	x
4.8 Exfiltration	x
4.9 Végétation (vivante / morte) et/ou débris	x
4.10 Terrier d'animaux fouisseurs	x
4.11 Autres conditions inhabituelles	x

5 Terrain au pied de la digue et brief aval	
5.1 Drain de pied (fonctionnel / obstruction)	x
5.2 Fossé de drainage (fonctionnel / obstruction)	x
5.3 Sorties d'eau visibles	x
5.4 Signe de turbidité dans l'eau	x
5.5 Zones humides ou molles	x
5.6 Exfiltrations	x
5.7 Évidences de réparation	x
5.8 Végétation (vivante / morte) et/ou débris	x
5.9 Affaissement	x
5.10 Autres conditions inhabituelles	x

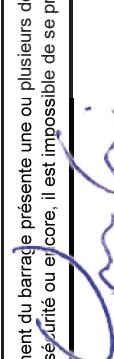
5.1 Drain de pied (fonctionnel / obstruction)	x							
5.2 Fossé de drainage (fonctionnel / obstruction)	x							
5.3 Sorties d'eau visibles	x							
5.4 Signe de turbidité dans l'eau	x							
5.5 Zones humides ou molles	x							
5.6 Exfiltrations	x							
5.7 Évidences de réparation	x							
5.8 Végétation (vivante / morte) et/ou débris	x							
5.9 Affaissement	x							
5.10 Autres conditions inhabituelles	x					x	18	Accumulation de blocs erratiques au pied de la digue ne permettant pas l'auscultation.

6 Observations complémentaires

L'auscultation du parement amont est difficilement réalisable en raison de la forte végétation arbustive et d'arbres matures. La présence de signes d'érosion des sols et de l'affouillement des racines ont été observés par endroits ainsi que l'abaissement localisé du haut de talus amont au droit d'accès au lac. Le talus aval présente plusieurs zones de sols dénudés avec une pente de l'ordre de 1:2H:1V 1:5H:1V et par endroits des zones localement plus abruptes.

7 État général de la digue en terre - Règlement sur la sécurité des barrages - chapitre S-3.1.01, r.1

Très bon : cet élément du barrage ne présente aucune anomalie ou comporte de minimes déteriorations locales considérées normales ou sans conséquences
Bon : cet élément du barrage ne présente que des déteriorations mineures ou des anomalies qui ne mettent pas en cause le bon fonctionnement des autres éléments du barrage;
Acceptable : cet élément du barrage présente des déteriorations qui demandent des réparations sans cependant représenter un danger à court terme pour la structure; un tel état nécessite des travaux d'entretien et de réfection à court ou moyen terme, sans quoi cet élément du barrage deviendra de plus en plus vulnérable. Cet élément peut également présenter des anomalies qui n'affectent pas sa sécurité à court terme mais qui nécessitent un suivi particulier.
Pauvre ou indéterminé : cet élément du barrage présente une ou plusieurs déteriorations graves pouvant mettre en cause sa stabilité, rendre inopérantes certaines de ses parties ou présenter des anomalies graves qui sont susceptibles de compromettre sa sécurité ou en core, il est impossible de se prononcer sur son état

Signature de l'inspecteur : 

2 de 2

Date: 2022-11-03

ANNEXE

C RAPPORT PHOTOGRAPHIQUE

INSPECTION DU BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546)

Sainte-Anne-des-Lacs

**Photo 1**

Bief amont du barrage (vue vers l'est à partir de la rive droite).

**Photo 2**

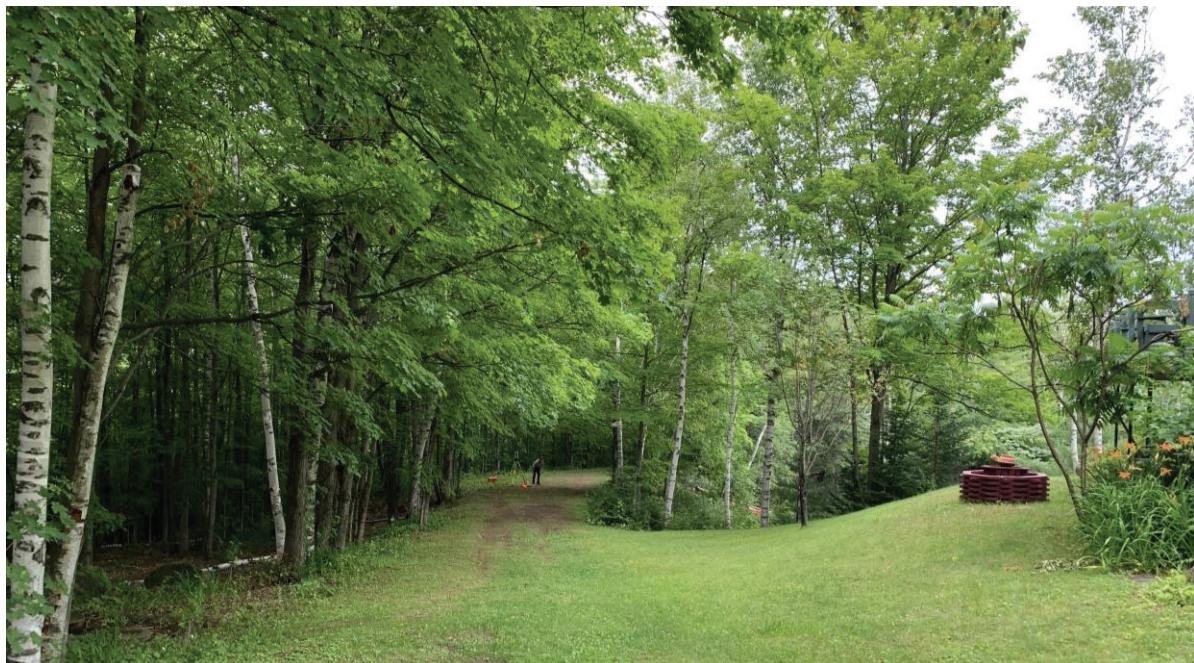
Bief amont du barrage (vue vers l'ouest à partir de la crête en rive gauche).

INSPECTION DU BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546)

Sainte-Anne-des-Lacs

**Photo 3**

Rive droite du déversoir à l'extrémité ouest du barrage.

**Photo 4**

Crête du barrage, extrémité est de la digue en rive gauche

INSPECTION DU BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546)

Sainte-Anne-des-Lacs

**Photo 5**

Rive droite et bief amont du déversoir.

**Photo 6**

Bief amont et seuil du déversoir, extrémité ouest du barrage.

INSPECTION DU BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546)

Sainte-Anne-des-Lacs

**Photo 7**

Pente aval du déversoir (vue à partir du seuil en enrochement).

**Photo 8**

Pente aval du déversoir et crête du mur guideau en remblai (vue vers l'amont).

INSPECTION DU BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546)

Sainte-Anne-des-Lacs

**Photo 9**

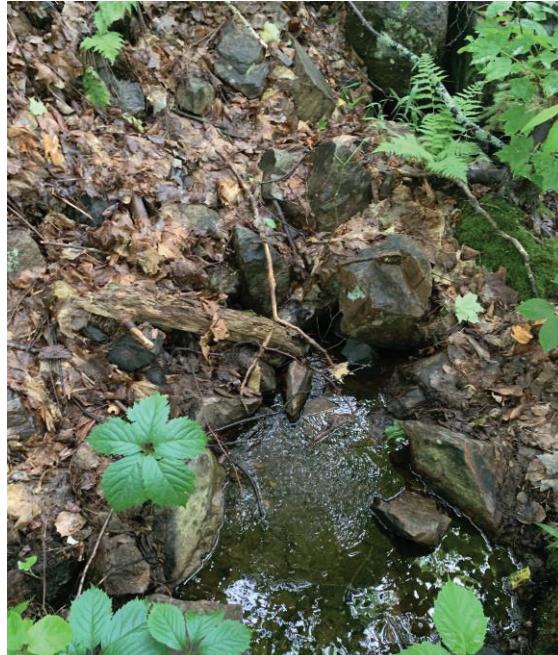
Bief aval du déversoir/digue et mur guideau en remblai (vue vers l'amont).

**Photo 10**

Exfiltration au pied aval du mur guideau en remblai et le long du pied aval de la digue.

INSPECTION DU BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546)

Sainte-Anne-des-Lacs

**Photo 11**

Exfiltration au pied du mur guideau en remblai (côté aval de l'émissaire du déversoir).

**Photo 12**

Pied aval de la digue et écoulement provenant des zones d'exfiltration (vue à partir de la crête).

INSPECTION DU BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546)

Sainte-Anne-des-Lacs

**Photo 13**

Escalier et activités anthropiques au droit de la pente aval de la digue.

**Photo 14**

Activité anthropique (chemin), signes d'érosion et de décrochements du parement aval.

INSPECTION DU BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546)

Sainte-Anne-des-Lacs



Photo 15 Zone humide et sols saturés dans la portion inférieure du talus aval.



Photo 16 Zone humide et sols saturés au pied/bief aval du talus de la digue.

INSPECTION DU BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546)

Sainte-Anne-des-Lacs



Photo 17 Zone humide avec forte végétation au droit du parement et pied aval (vue vers l'amont).



Photo 18 Zone d'accumulation de blocs erratiques entre le pied de talus et la zone humide (photo 16)

INSPECTION DU BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546)

Sainte-Anne-des-Lacs

**Photo 19**

Décrochements et forte pente le long du parement aval.

**Photo 20**

Zone de décrochement et sols dénudés au droit du parement aval.

INSPECTION DU BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546)

Sainte-Anne-des-Lacs



Photo 21 Zone de décrochement, sols et système racinaire partiellement dénudés, forte pente et présence d'arbres morts.



Photo 22 Roc apparent au droit du parement amont à proximité de la rive gauche (vue vers l'ouest)

INSPECTION DU BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546)

Sainte-Anne-des-Lacs



Photo 23 Parement amont, racines et sols dénudés, zones d'érosion et en porte-à-faux dans la zone de marnage.



Photo 24 Végétation au droit du parement et de la crête amont

INSPECTION DU BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546)

Sainte-Anne-des-Lacs



Photo 25 Activité anthropique (accès au lac) et zones d'érosion du parement et du haut de talus amont.



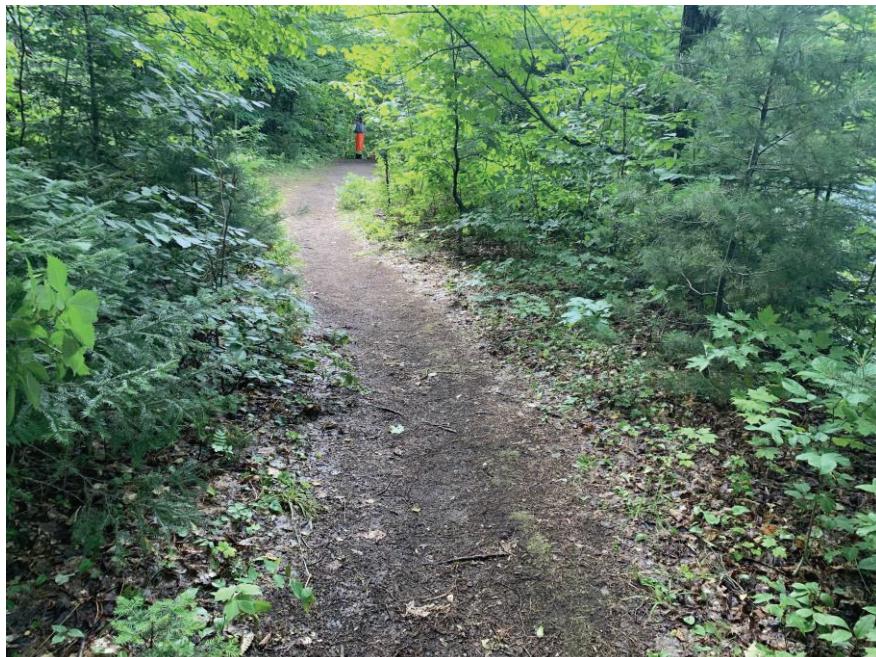
Photo 26 Crête de la digue (vue vers l'ouest).

INSPECTION DU BARRAGE DU LAC LOISELLE (X2181546)

Sainte-Anne-des-Lacs

**Photo 27**

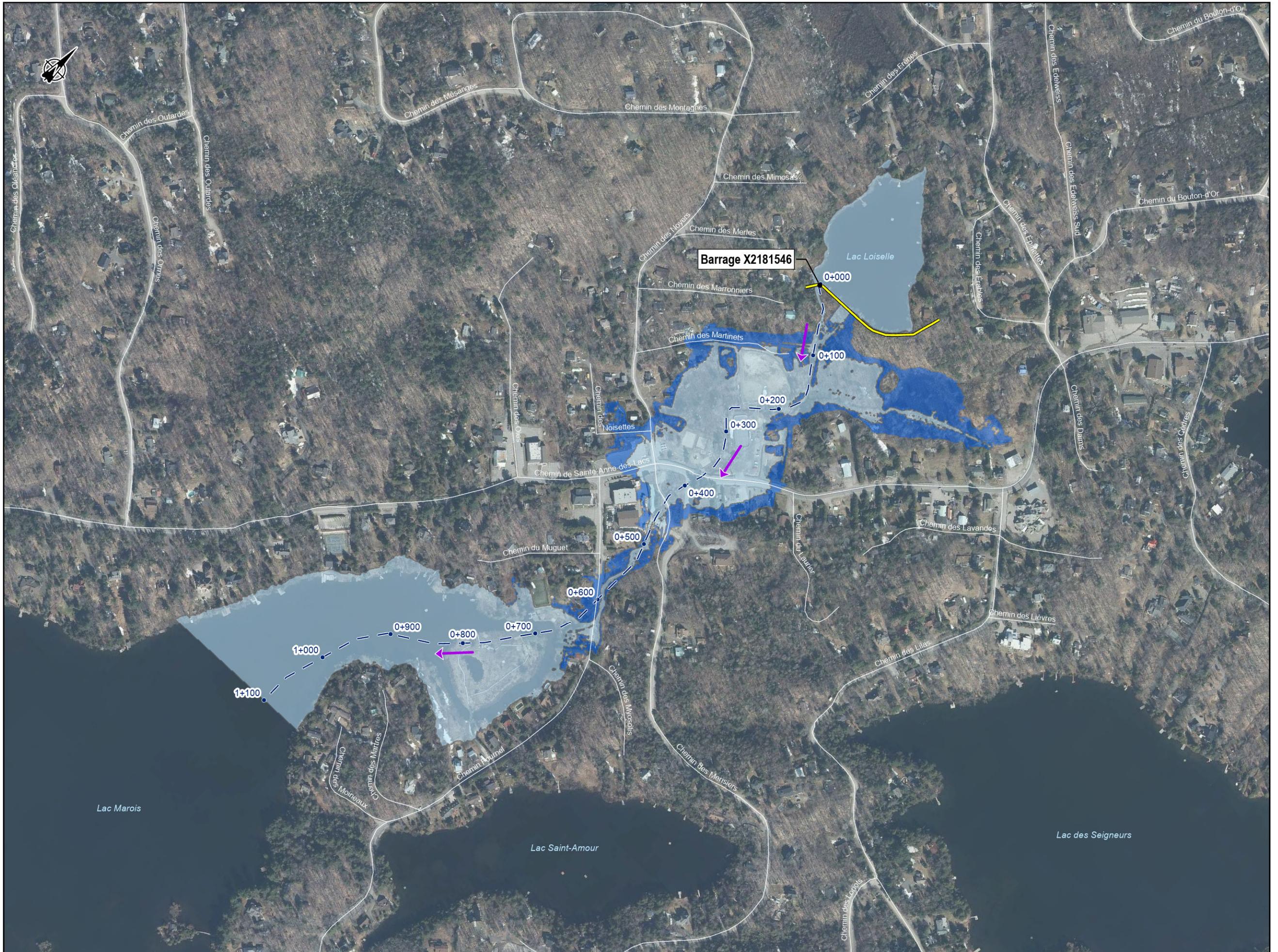
Crête de la digue (vue vers l'est).

**Photo 28**

Crête de la digue (vue vers l'extrême ouest de l'ouvrage).

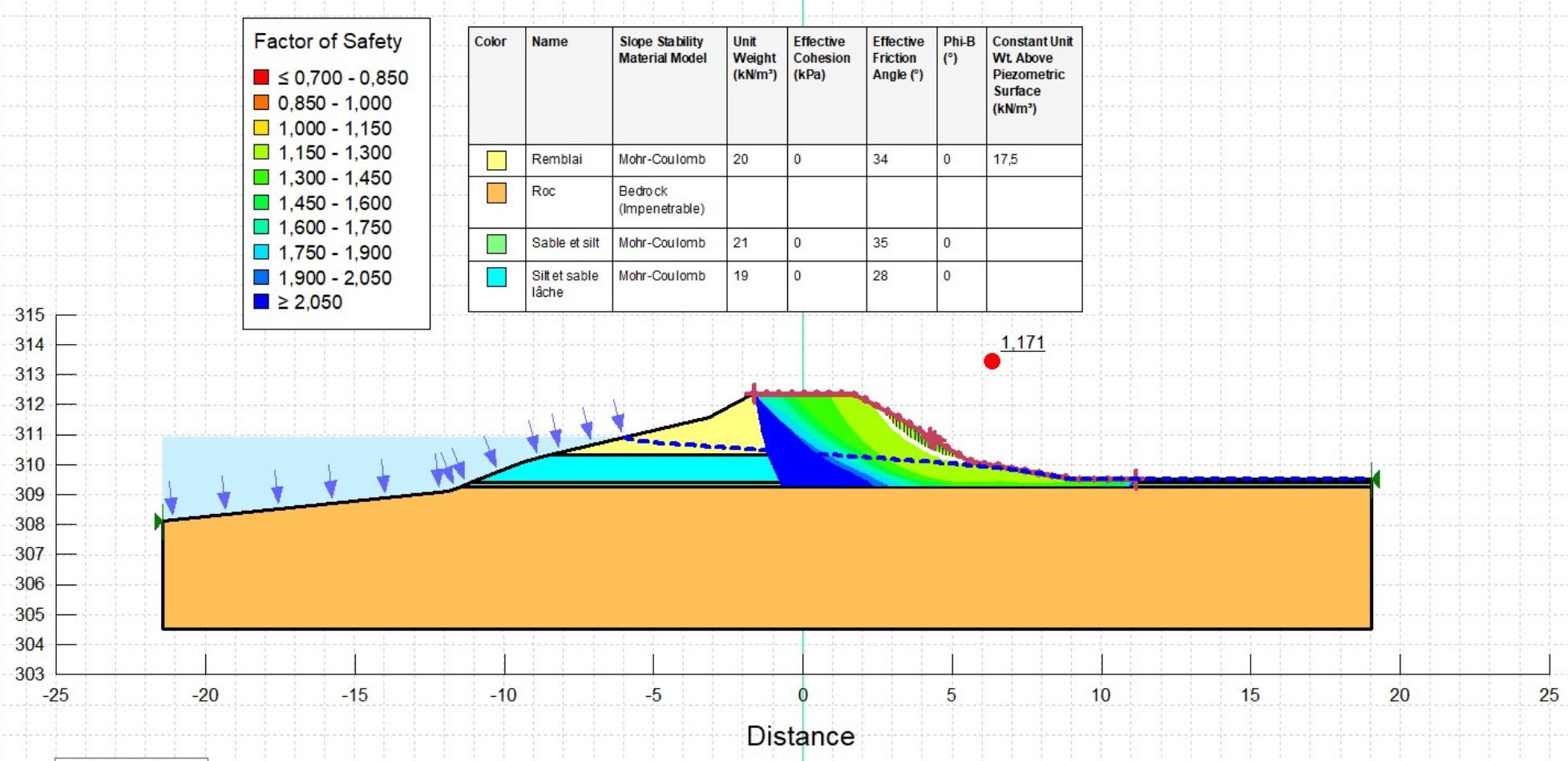
ANNEXE

D CARTE DE RUPTURE (WSP, 2024)



ANNEXE

E CALCULS DE STABILITÉ



Étude d'évaluation de sécurité - Barrage Loiselle

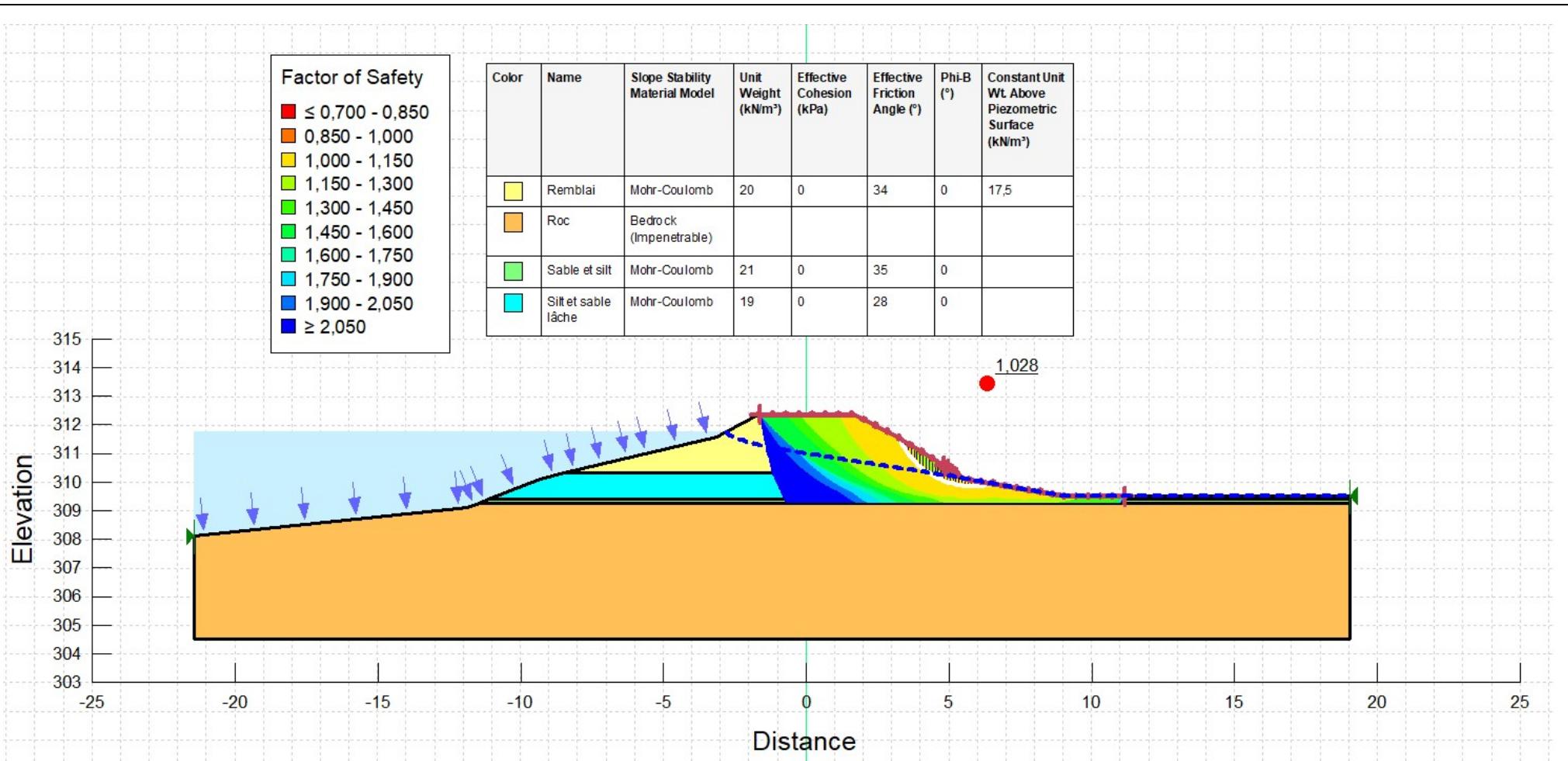
Coupe A

Analyse de stabilité de pente

Pente aval - Conditions normales d'exploitation (niveau amont 310,91 m) – Analyse statique

Fig. E.1

WSP

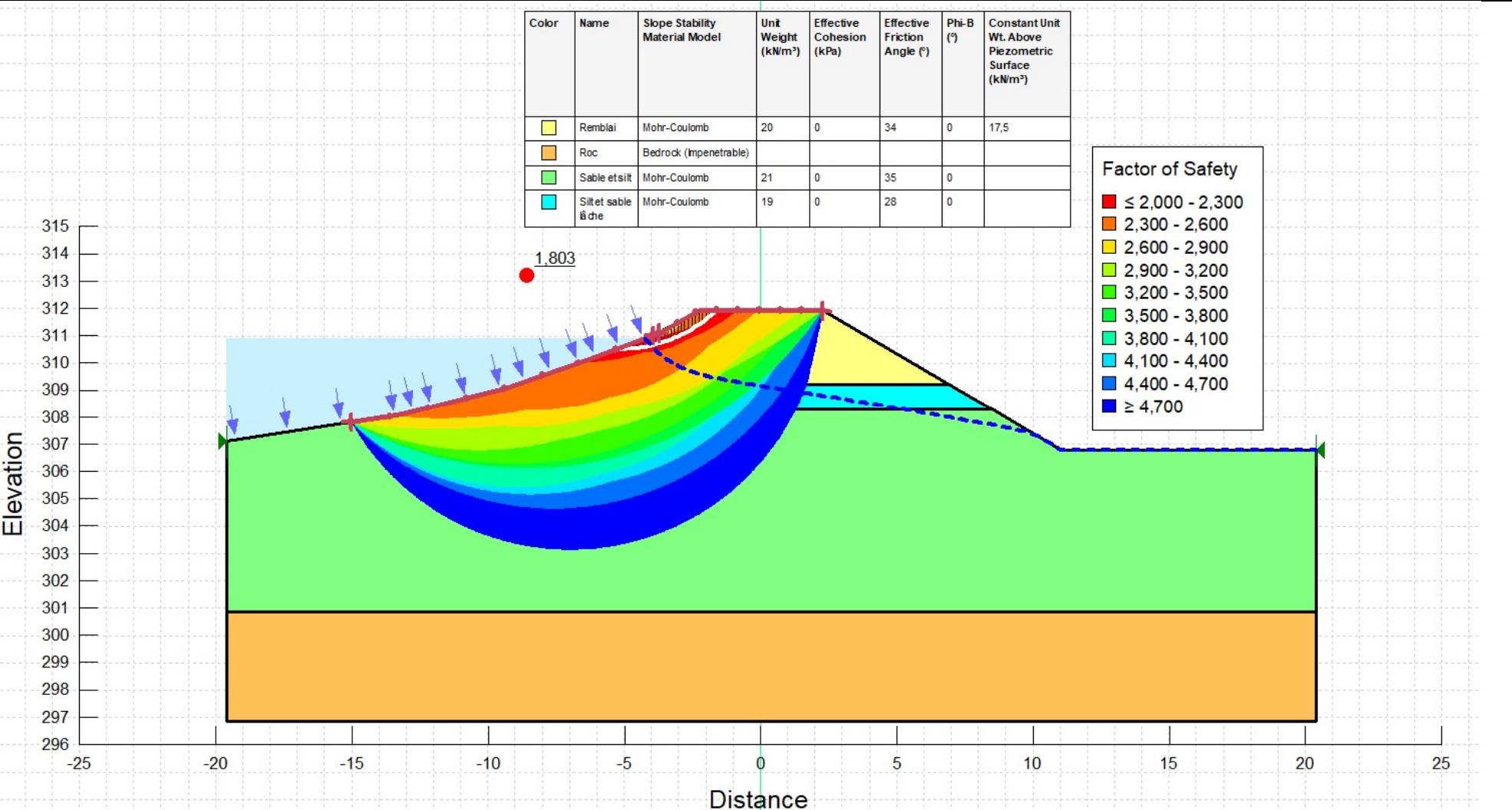


Étude d'évaluation de sécurité - Barrage Loiselle
Coupe A

Fig. E.2

WSP

Analyse de stabilité de pente
Pente aval – Crue de sécurité (niveau amont 311,77 m) – Analyse statique



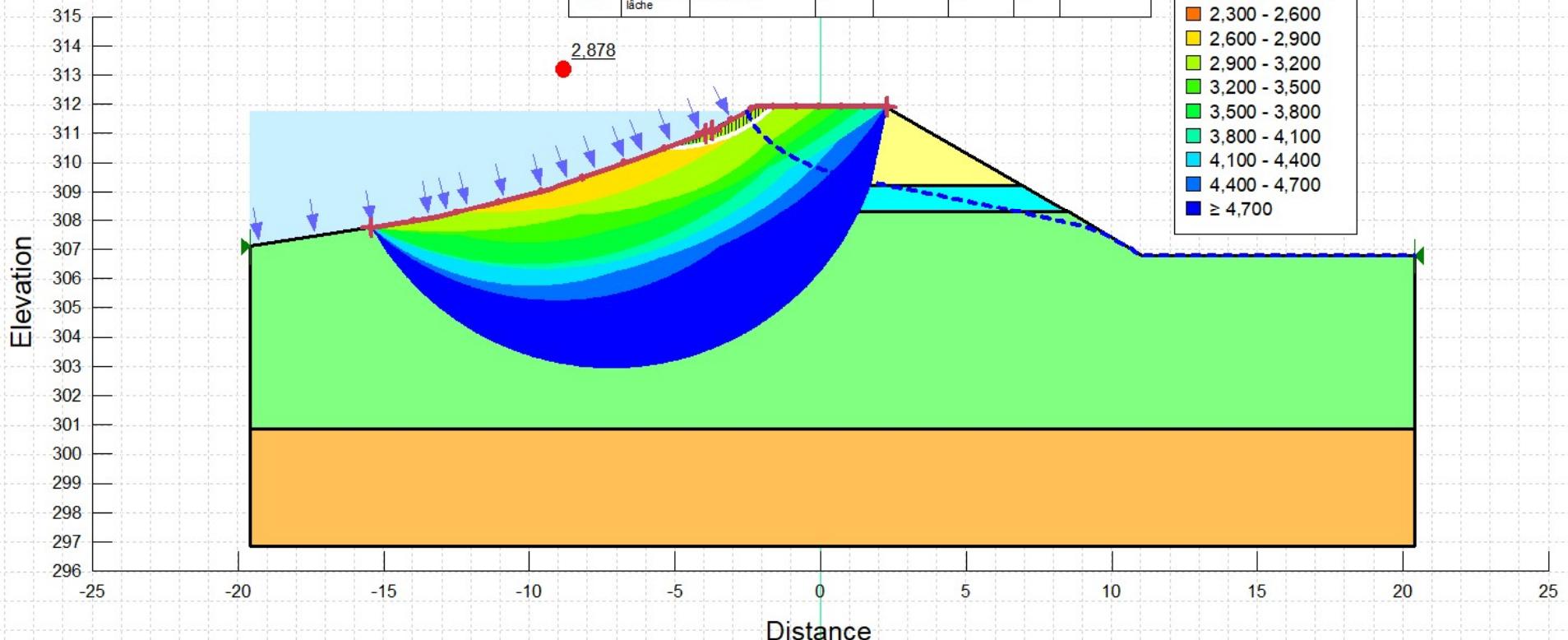
Étude d'évaluation de sécurité - Barrage Loiselle
Coupe B

Fig. E.3

WSP

Analyse de stabilité de pente
Pente amont - Conditions normales d'exploitation (niveau amont 310,91 m) – Analyse statique

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m^3)	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle ($^\circ$)	Phi-B ($^\circ$)	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m^3)
Yellow	Réblai	Mohr-Coulomb	20	0	34	0	17,5
Orange	Roc	Bedrock (Impenetrable)					
Green	Sable et silt	Mohr-Coulomb	21	0	35	0	
Cyan	Silt et sable lâche	Mohr-Coulomb	19	0	28	0	

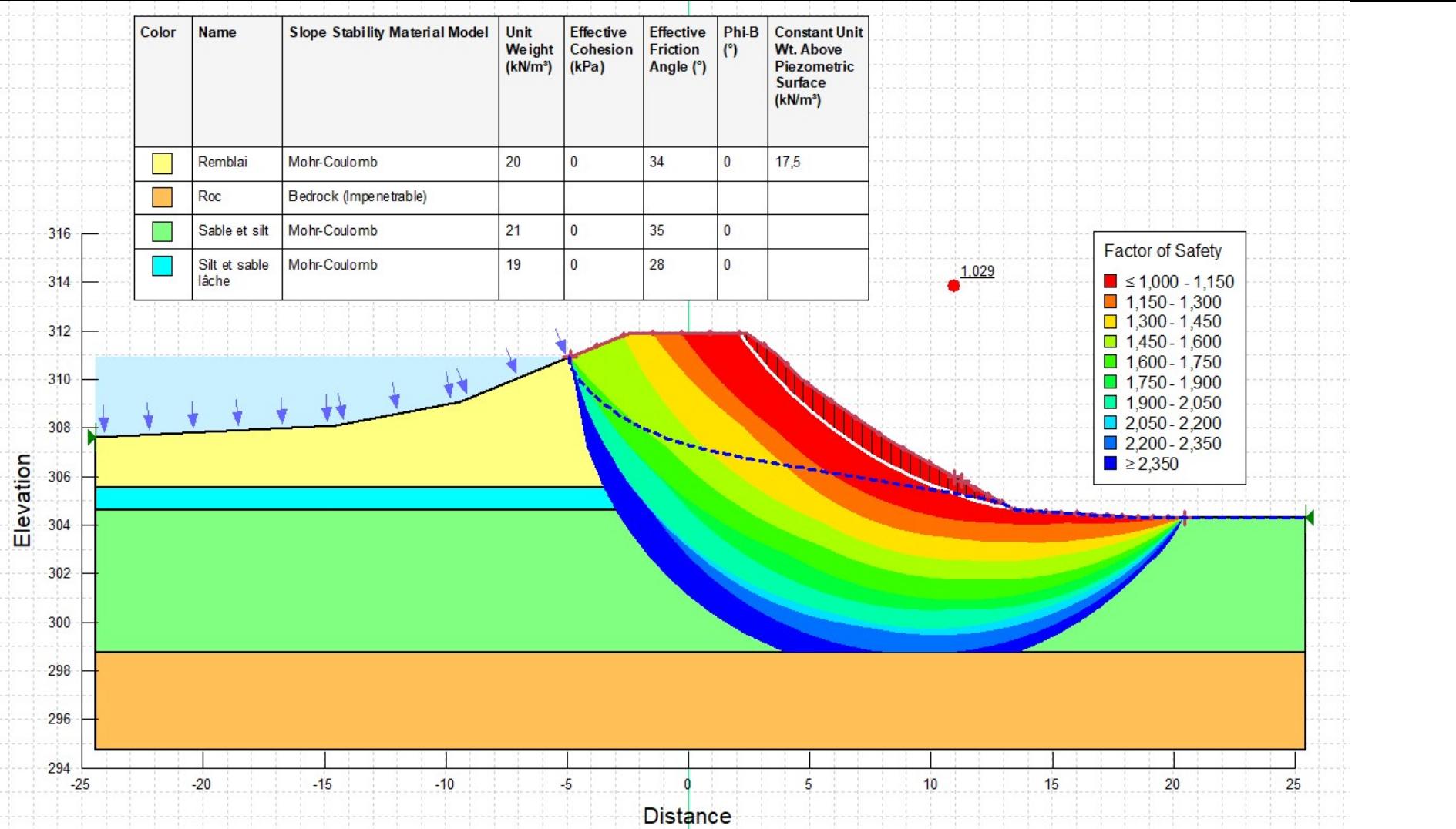


Étude d'évaluation de sécurité - Barrage Loiselle
Coupe B

Fig. E.4

WSP

Analyse de stabilité de pente
Pente amont – Crue de sécurité (niveau amont 311,77 m) – Analyse statique



Étude d'évaluation de sécurité - Barrage Loiselle

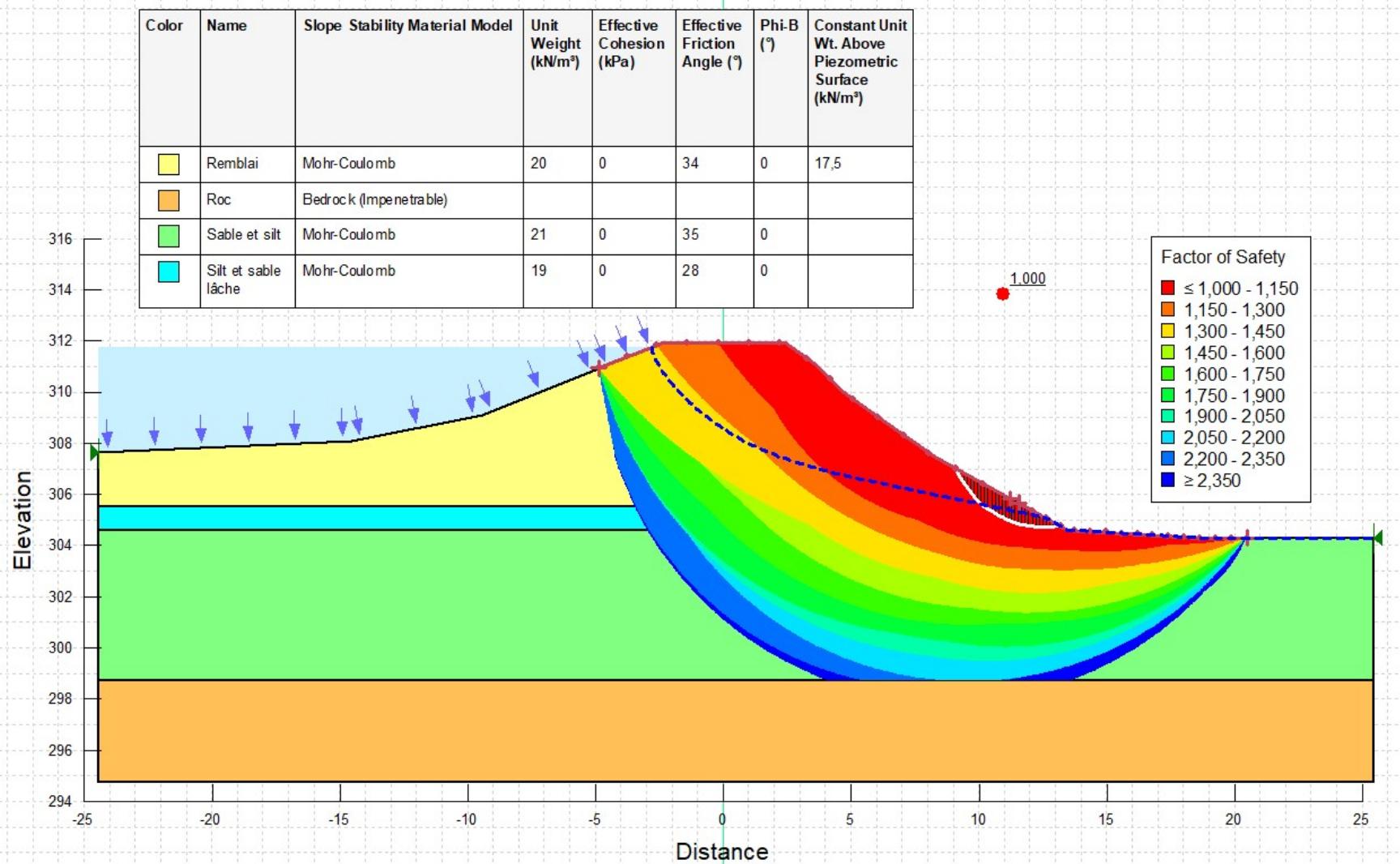
Coupe C

Analyse de stabilité de pente

Pente aval - Conditions normales d'exploitation (niveau amont 310,91 m) – Analyse statique

Fig. E.5

WSP



Étude d'évaluation de sécurité - Barrage Loiselle

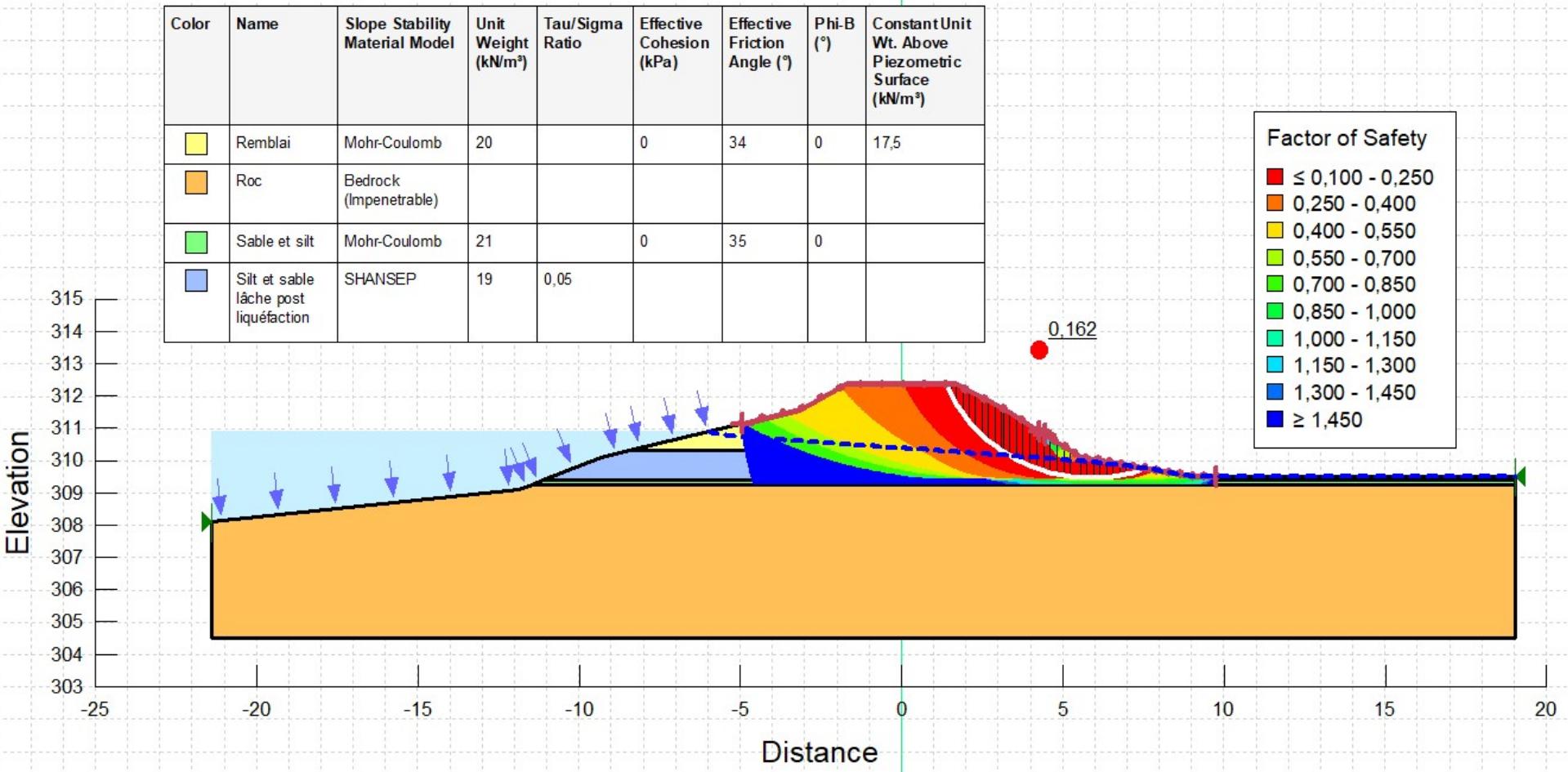
Coupe C

Analyse de stabilité de pente

Pente aval – Crue de sécurité (niveau amont 311,77 m) – Analyse statique

Fig. E.6

WSP



Étude d'évaluation de sécurité - Barrage Loiselle

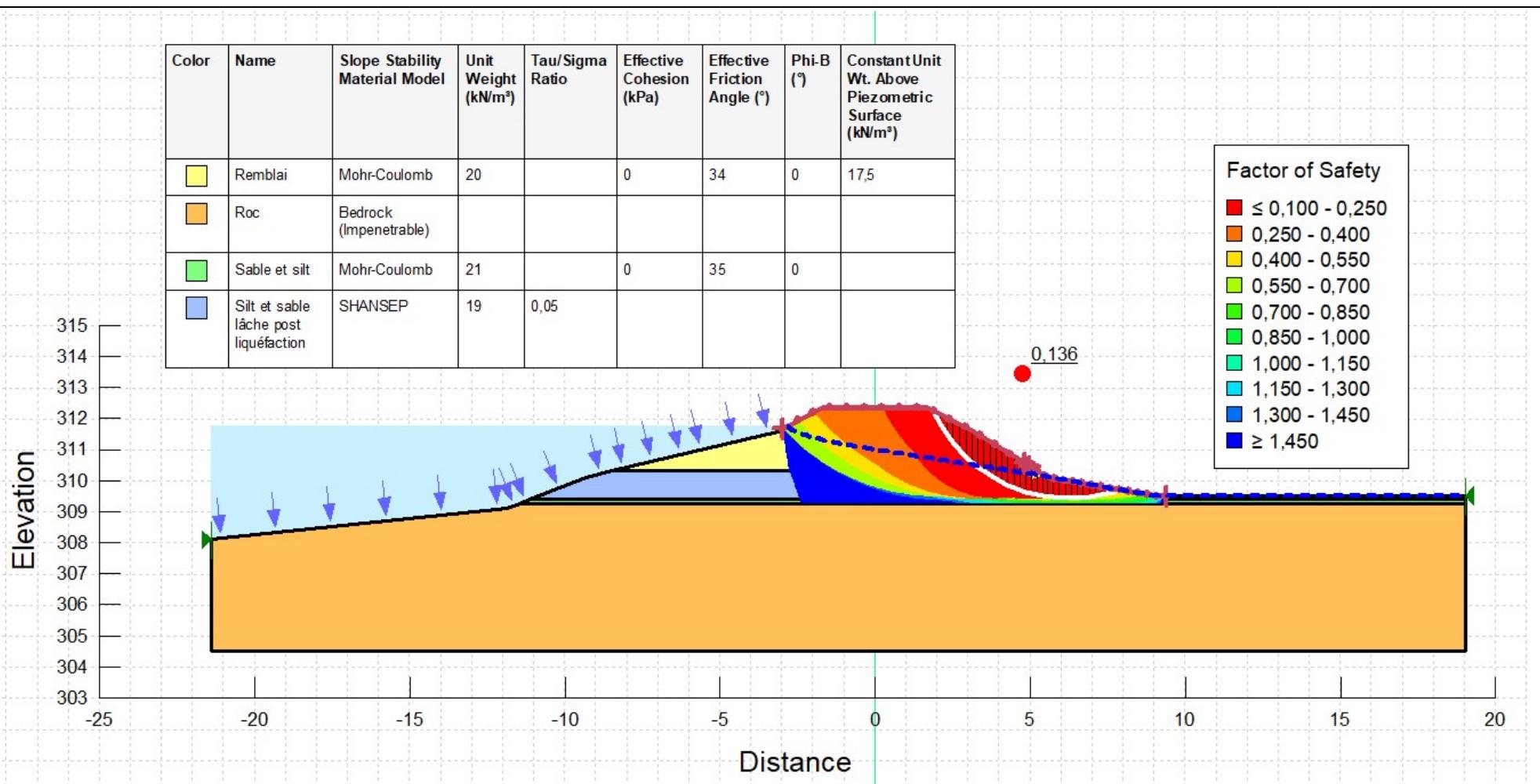
Coupe A

Analyse de stabilité de pente

Pente aval - Conditions normales d'exploitation (niveau amont 310,91 m) – Analyse post-sismique

Fig. E.7

WSP



Étude d'évaluation de sécurité - Barrage Loiselle
Coupe A

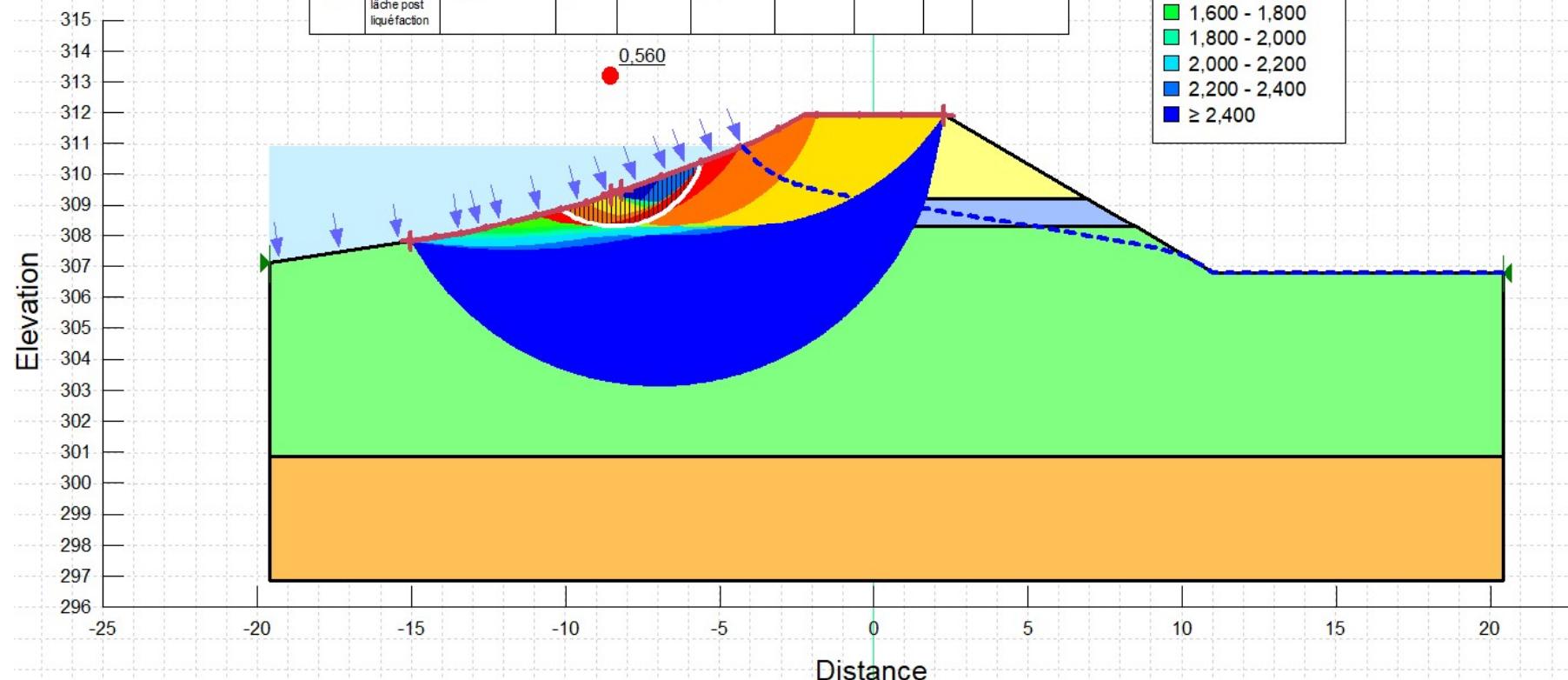
Analyse de stabilité de pente
Pente aval – Crue de sécurité (niveau amont 311,77 m) – Analyse post-sismique

Fig. E.8



Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m ³)	Minimum Strength (kPa)	Tau/Sigma Ratio	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle (°)	Phi-B (°)	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m ³)
Yellow	Remblai	Mohr-Coulomb	20			0	34	0	17,5
Orange	Roc	Bedrock (Impenetrable)							
Green	Sable et silt	Mohr-Coulomb	21			0	35	0	
Blue	Silt et sable lâche post liquéfaction	SHANSEP	19	0	0,05				

Factor of Safety	
≤ 0,600 - 0,800	
0,800 - 1,000	
1,000 - 1,200	
1,200 - 1,400	
1,400 - 1,600	
1,600 - 1,800	
1,800 - 2,000	
2,000 - 2,200	
2,200 - 2,400	
≥ 2,400	



Étude d'évaluation de sécurité - Barrage Loiselle
Coupe B

Analyse de stabilité de pente
Pente amont - Conditions normales d'exploitation (niveau amont 310,91 m) – Analyse post-sismique

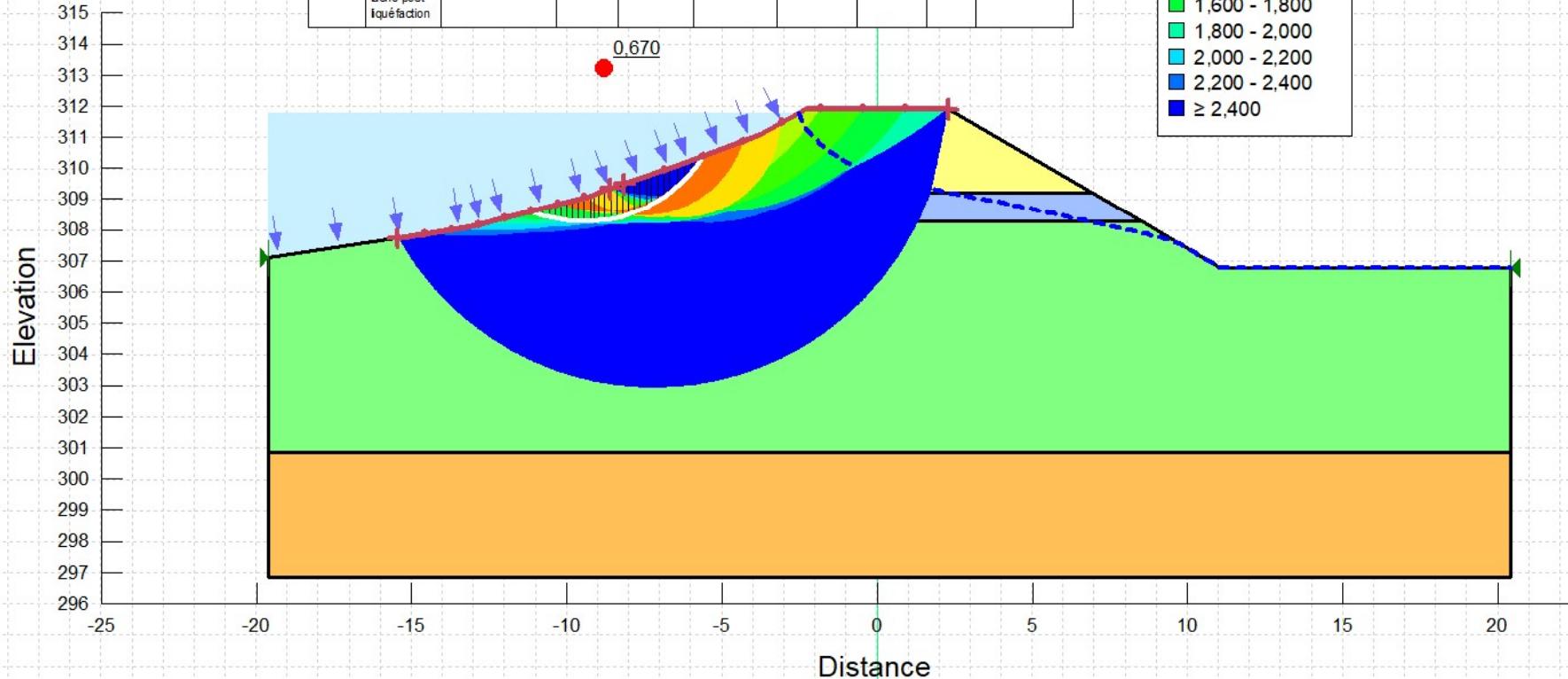
Fig. E.9

WSP

Color	Name	Slope Stability Material Model	Unit Weight (kN/m^3)	Minimum Strength (kPa)	Tau/Sigma Ratio	Effective Cohesion (kPa)	Effective Friction Angle ($^\circ$)	$\Phi_i - \Phi_a$ ($^\circ$)	Constant Unit Wt. Above Piezometric Surface (kN/m^3)
Yellow	Remblai	Mohr-Coulomb	20			0	34	0	17,5
Orange	Roc	Bedrock (Impenetrable)							
Green	Sable et silt	Mohr-Coulomb	21			0	35	0	
Blue	Silt et sable lâche post liquéfaction	SHANSEP	19	0	0,05				

Factor of Safety

- ≤ 0,600 - 0,800
- 0,800 - 1,000
- 1,000 - 1,200
- 1,200 - 1,400
- 1,400 - 1,600
- 1,600 - 1,800
- 1,800 - 2,000
- 2,000 - 2,200
- 2,200 - 2,400
- ≥ 2,400

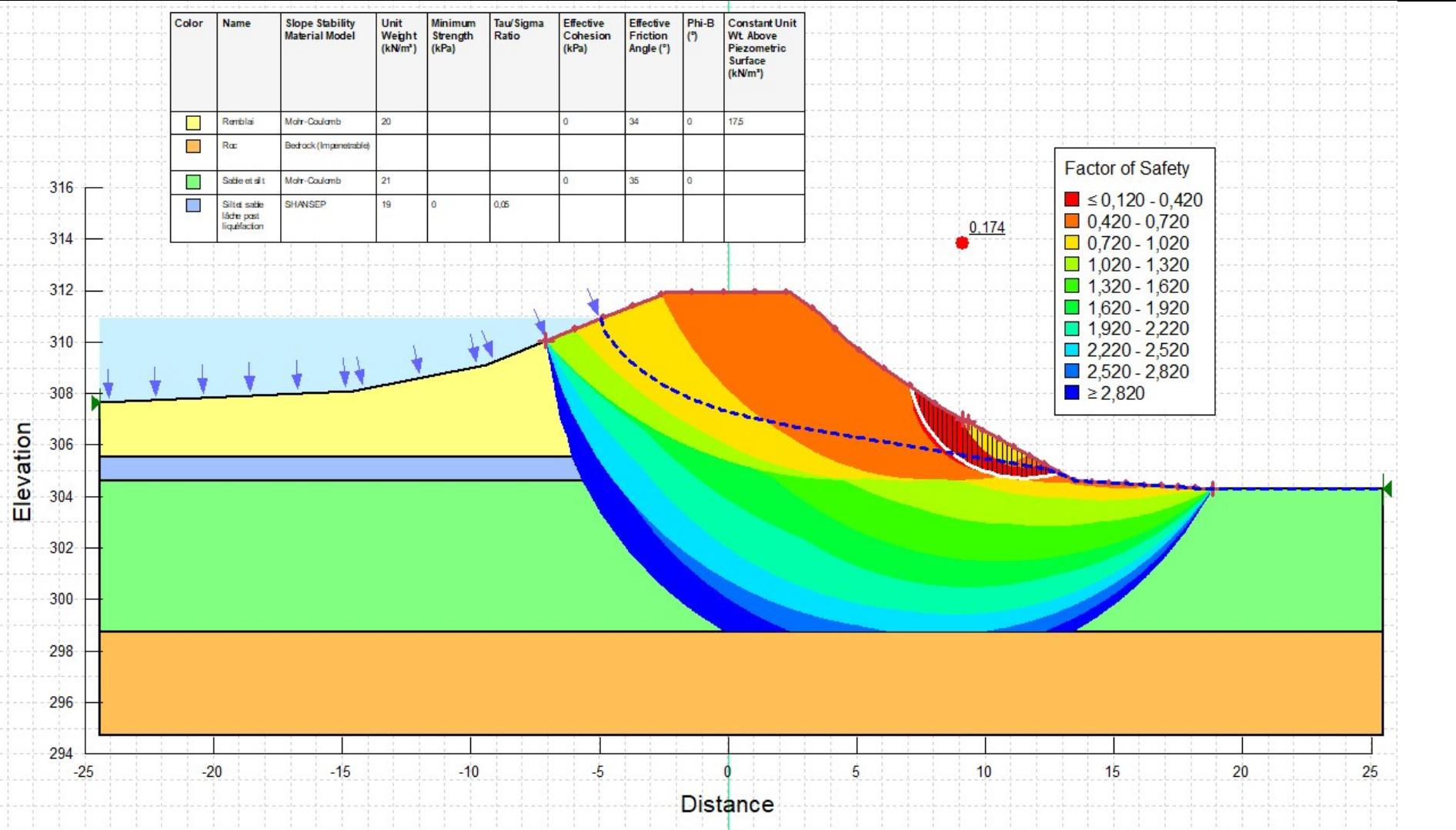


Étude d'évaluation de sécurité - Barrage Loiselle
Coupe B

Analyse de stabilité de pente
Pente amont – Crue de sécurité (niveau amont 311,77 m) – Analyse post-sismique

Fig. E.10





Étude d'évaluation de sécurité - Barrage Loiselle

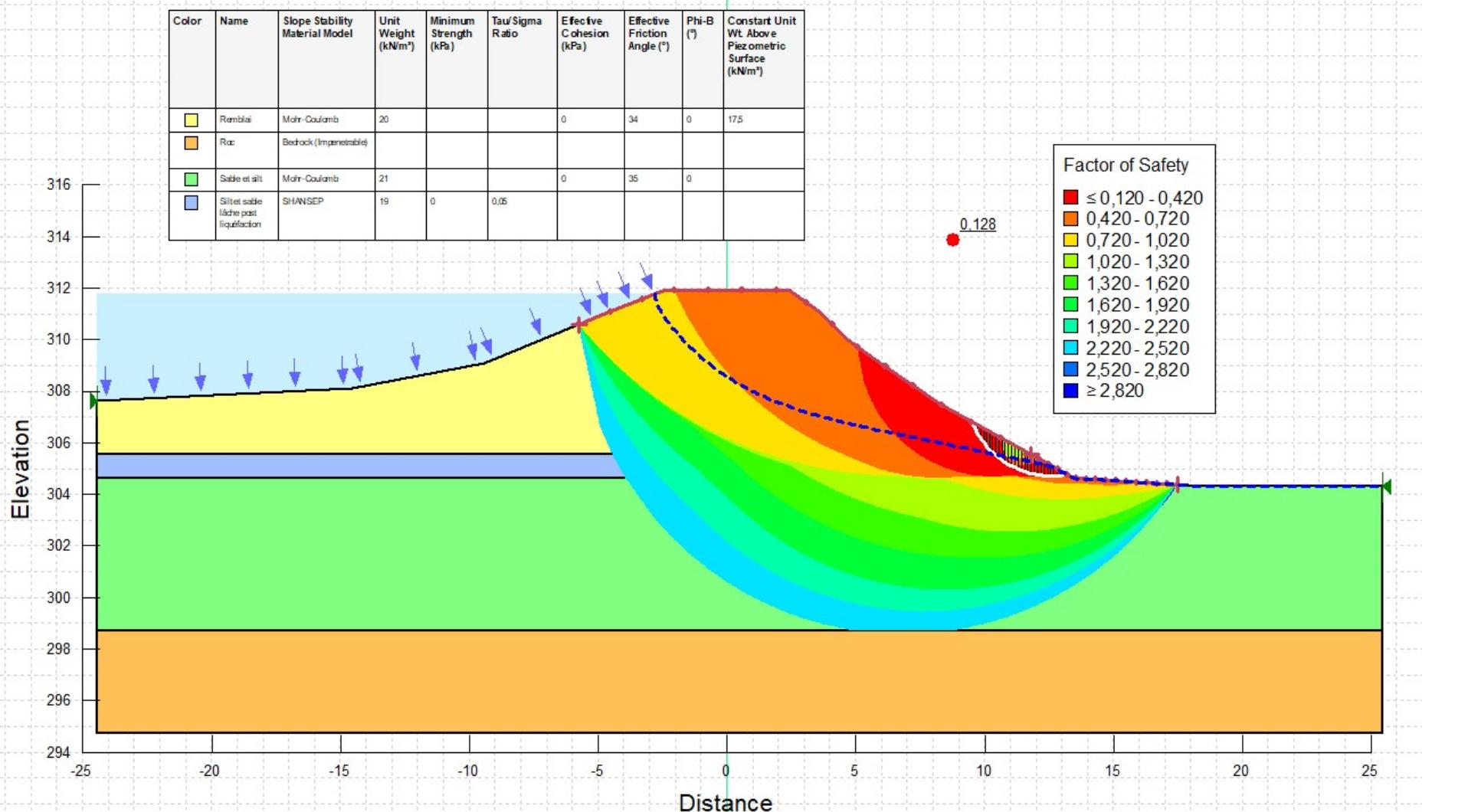
Coupe C

Analyse de stabilité de pente

Pente aval - Conditions normales d'exploitation (niveau amont 310,91 m) – Analyse post-sismique

Fig. E.11

WSP



Étude d'évaluation de sécurité - Barrage Loiselle
Coupe C

Analyse de stabilité de pente
Pente aval – Crue de sécurité (niveau amont 311,77 m) – Analyse post-sismique

Fig. E.12



ANNEXE

F POTENTIEL DE LIQUÉFACTION

V_s BASED LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

Project title : Évaluation du potentiel de liquéfaction

V_s Name: Vs Coupe A

Location : Barrage Loiselle

Input parameters and analysis properties ::

Analysis method: Kayen et al. 2013

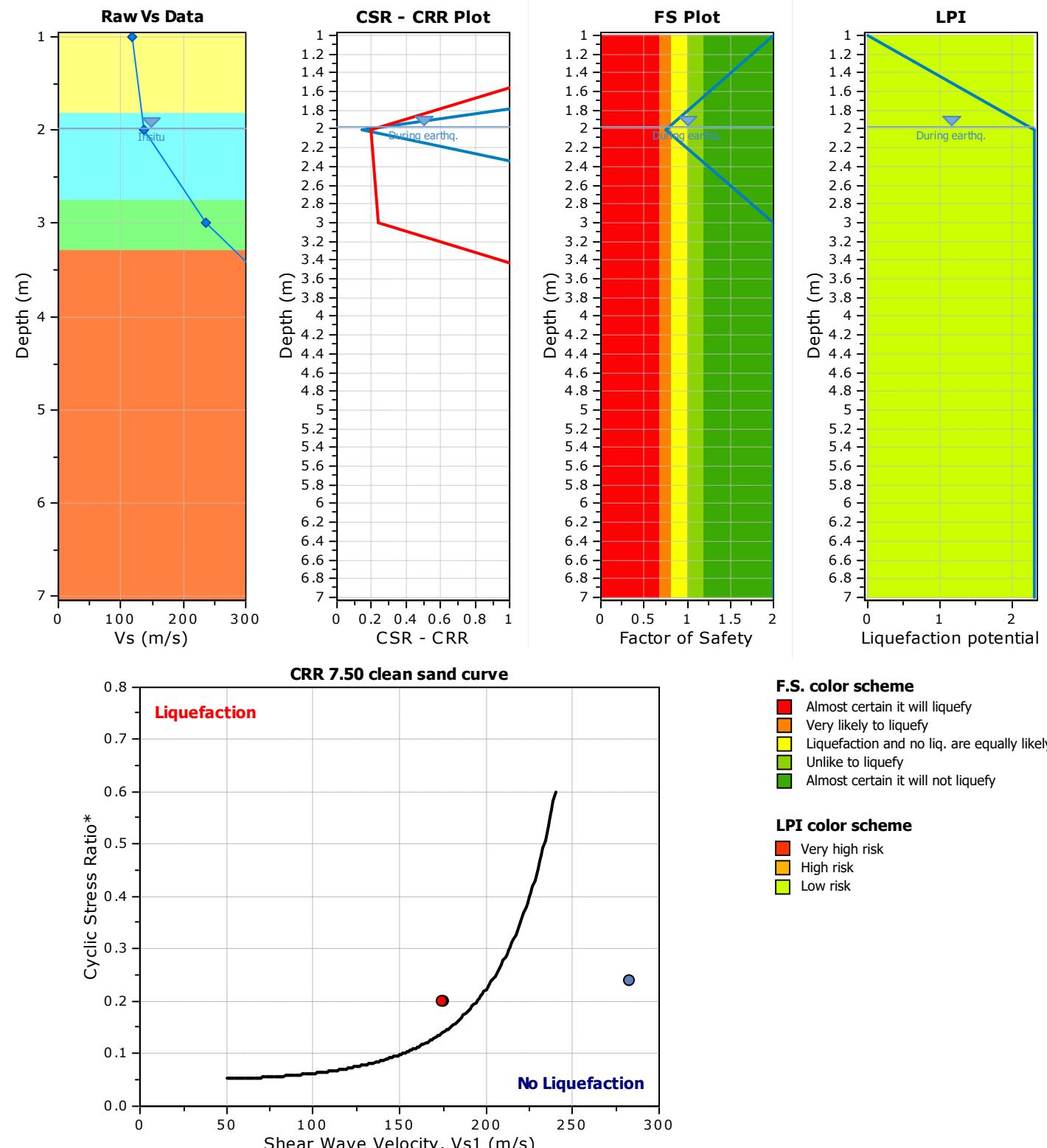
G.W.T. (in-situ): 1.98 m

G.W.T. (earthq.): 1.98 m

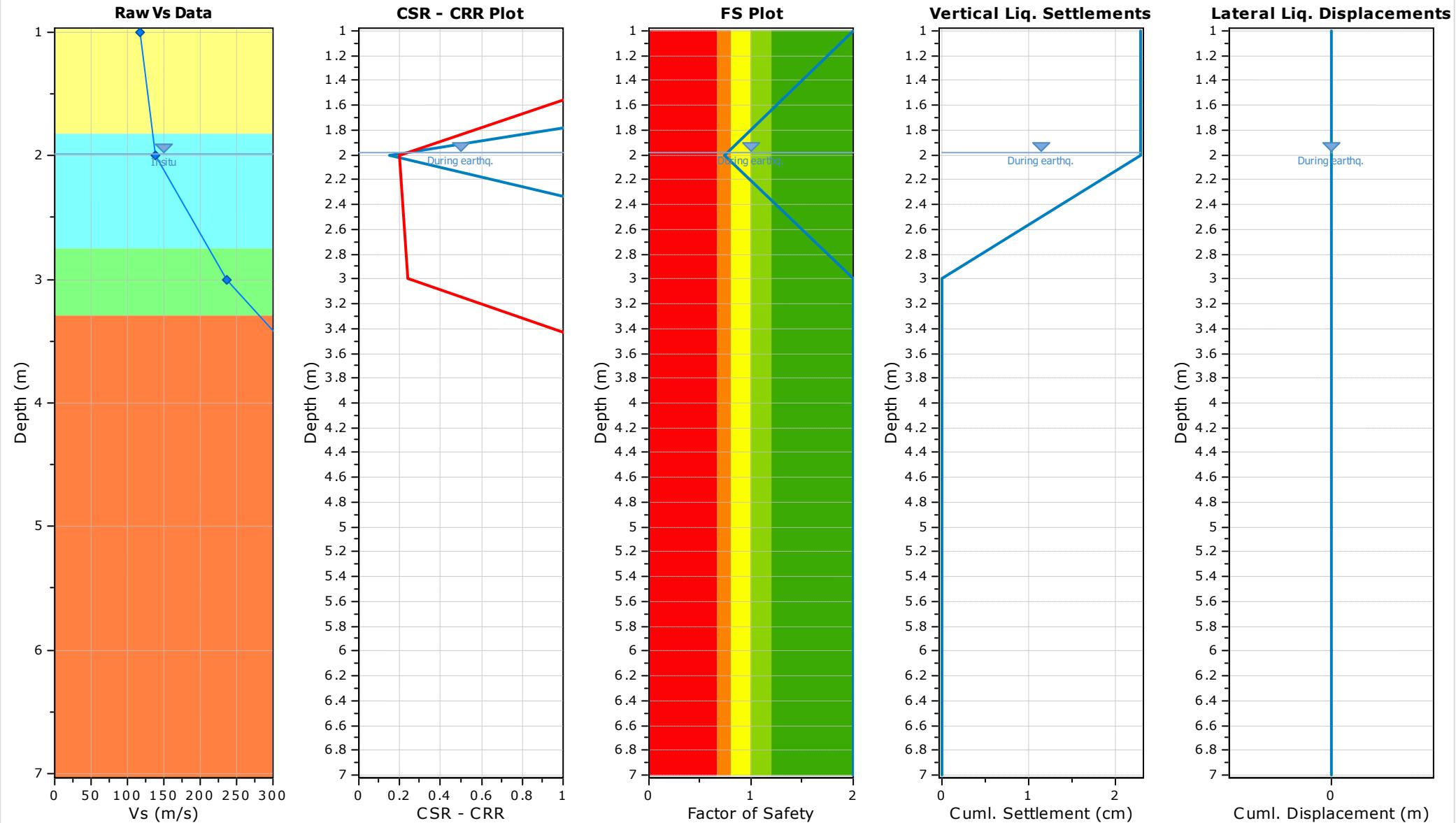
Earthquake magnitude M_w: 6.30

Peak ground acceleration: 0.39 g

Eq. external load: 0.00 kPa



:: Overall Liquefaction Assessment Analysis Plots ::



:: Field input data ::					
Test Depth (m)	Vs Field Value (m/s)	Fines Content (%)	Unit Weight (kN/m³)	Infl. Thickness (m)	Can Liquefy
1.00	117.00	45.50	20.00	1.00	Yes
2.00	138.00	54.50	20.00	1.00	Yes
3.00	236.00	42.10	19.00	1.00	Yes
4.00	391.00	40.00	21.00	1.00	Yes
5.00	635.00	40.00	21.00	1.00	Yes
6.00	859.00	40.00	21.00	1.00	Yes
7.00	1076.00	40.00	21.00	1.00	Yes

Abbreviations

Depth: Depth at which test was performed (m)
 Vs Field Value: Measured shear waves velocity (m/s)
 Fines Content: Fines content at test depth (%)
 Unit Weight: Unit weight at test depth (kN/m³)
 Infl. Thickness: Thickness of the soil layer to be considered in settlements analysis (m)
 Can Liquefy: User defined switch for excluding/including test depth from the analysis procedure

:: Cyclic Resistance Ratio (CRR) calculation data ::									
Depth (m)	Vs Field Value (ft/s)	Unit Weight (pcf)	σ_v (kPa)	u_o (kPa)	σ'_{vo} (kPa)	Norm. Factor	V_{s1} (m/s)	CRR _{7.5}	
1.00	117.00	20.00	20.00	0.00	20.00	1.50	175.53	4.000	
2.00	138.00	20.00	40.00	0.20	39.80	1.26	174.31	0.149	
3.00	236.00	19.00	59.00	10.01	48.99	1.20	283.01	2.702	
4.00	391.00	21.00	80.00	19.82	60.18	1.14	445.39	4.000	
5.00	635.00	21.00	101.00	29.63	71.37	1.09	693.14	4.000	
6.00	859.00	21.00	122.00	39.44	82.56	1.05	904.12	4.000	
7.00	1076.00	21.00	143.00	49.25	93.75	1.02	1097.09	4.000	

Abbreviations

σ_v : Total stress during SPT test (kPa)
 u_o : Water pore pressure during SPT test (kPa)
 σ'_{vo} : Effective overburden pressure during SPT test (kPa)
 Norm. Factor: overburden-stress correction factor
 V_{s1} : Overburden-stress corrected shear wave velocity
 CRR_{7.5}: Cyclic resistance ratio for M=7.5

:: Cyclic Stress Ratio calculation (CSR fully adjusted and normalized) ::												
Depth (m)	Unit Weight (pcf)	$\sigma_{v,eq}$ (kPa)	$u_{o,eq}$ (kPa)	$\sigma'_{vo,eq}$ (kPa)	r_d	α	CSR	MSF	CSR _{eq,M=7.5}	K_{sigma}	CSR*	FS
1.00	20.00	20.00	0.00	20.00	1.00	1.00	0.254	1.27	0.200	1.00	0.200	2.000 ●
2.00	20.00	40.00	0.20	39.80	1.00	1.00	0.255	1.27	0.201	1.00	0.201	0.744 ●
3.00	19.00	59.00	10.01	48.99	1.00	1.00	0.305	1.27	0.241	1.00	0.241	2.000 ●
4.00	21.00	80.00	19.82	60.18	1.00	1.00	0.337	1.27	0.266	1.00	0.266	2.000 ●
5.00	21.00	101.00	29.63	71.37	1.00	1.00	0.359	1.27	0.283	1.00	0.283	2.000 ●
6.00	21.00	122.00	39.44	82.56	1.00	1.00	0.375	1.27	0.295	1.00	0.295	2.000 ●
7.00	21.00	143.00	49.25	93.75	1.00	1.00	0.387	1.27	0.305	1.00	0.305	2.000 ●

:: Cyclic Stress Ratio calculation (CSR fully adjusted and normalized) ::

Depth (m)	Unit Weight (pcf)	σ_v,eq (kPa)	u_o,eq (kPa)	$\sigma'_{vo,eq}$ (kPa)	r_d	α	CSR	MSF	$CSR_{eq,M=7.5}$	K_{sigma}	CSR^*	FS

Abbreviations

σ_v,eq : Total overburden pressure at test point, during earthquake (kPa)
 u_o,eq : Water pressure at test point, during earthquake (kPa)
 $\sigma'_{vo,eq}$: Effective overburden pressure, during earthquake (kPa)
 r_d : Nonlinear shear mass factor
 α : Improvement factor due to stone columns
CSR : Cyclic Stress Ratio
MSF : Magnitude Scaling Factor
 $CSR_{eq,M=7.5}$: CSR adjusted for M=7.5
 K_{sigma} : Effective overburden stress factor
 CSR^* : CSR fully adjusted (user FS applied)***
FS: Calculated factor of safety against soil liquefaction

*** User FS: 1.00

:: Liquefaction potential according to Iwasaki ::

Depth (m)	FS	F	wz	Thickness (m)	I_L
1.00	2.000	0.00	9.50	1.00	0.00
2.00	0.744	0.26	9.00	1.00	2.30
3.00	2.000	0.00	8.50	1.00	0.00
4.00	2.000	0.00	8.00	1.00	0.00
5.00	2.000	0.00	7.50	1.00	0.00
6.00	2.000	0.00	7.00	1.00	0.00
7.00	2.000	0.00	6.50	1.00	0.00

Overall potential I_L : 2.30

$I_L = 0.00$ - No liquefaction

I_L between 0.00 and 5 - Liquefaction not probable

I_L between 5 and 15 - Liquefaction probable

$I_L > 15$ - Liquefaction certain

:: Vertical settlements estimation for dry sands ::

Depth (m)	$V_{s1,cs}$ (ft/s)	$(N_1)_{60,cs}$	T_{av}	p	G_{max} (MPa)	α	b	γ	ϵ_{15}	N_c	ϵ_{Nc} (%)	Δh (m)	ΔS (cm)
1.00	183.83	19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.000

Cumulative settlemetns: 0.000

Abbreviations

$V_{s1,cs}$: Normalized shear wave velocity clean sand equivalent
 $(N_1)_{60,cs}$: Estimated normalized corrected clean sand SPT
 T_{av} : Average cyclic shear stress
p: Average stress
 G_{max} : Maximum shear modulus (MPa)
 α, b : Shear strain formula variables
 γ : Average shear strain
 ϵ_{15} : Volumetric strain after 15 cycles
 N_c : Number of cycles
 ϵ_{Nc} : Volumetric strain for number of cycles N_c (%)
 Δh : Thickness of soil layer (cm)
 ΔS : Settlement of soil layer (cm)

:: Vertical settlements estimation for saturated sands ::

Depth (m)	$V_{s1,cs}$ (m/s)	$q_{t1N,cs}$	e_v weight factor	e_v (%)	Δh (m)	s (cm)
2.00	182.40	102.47	1.00	2.29	1.00	2.290
3.00	355.93	1851.35	1.00	0.00	1.00	0.000
4.00	924.17	115178.78	1.00	0.00	1.00	0.000
5.00	3105.54	21882692.5	1.00	0.00	1.00	0.000
6.00	6900.42	693636667.	1.00	0.00	1.00	0.000
7.00	12510.9	911620406	1.00	0.00	1.00	0.000

Cumulative settlements: 2.290**Abbreviations**

- $V_{s1,cs}$: Normalized shear wave velocity clean sand equivalent
 $q_{t1N,cs}$: Estimated normalized corrected clean sand cone resistance
 e_v : Post liquefaction volumetric strain (%)
 Δh : Thickness of soil layer to be considered (m)
 s : Estimated settlement (cm)

:: Lateral displacements estimation for saturated sands ::

Depth (m)	$V_{s1,cs}$ (m/s)	$(N_1)_{60,cs}$	D_r (%)	γ_{max} (%)	d_z (m)	LDI	LD (m)
1.00	183.83	19	61.02	0.00	1.00	0.000	0.00
2.00	182.40	18	59.40	13.24	1.00	0.000	0.00
3.00	355.93	50	100.00	0.00	1.00	0.000	0.00
4.00	924.17	50	100.00	0.00	1.00	0.000	0.00
5.00	3105.54	50	100.00	0.00	1.00	0.000	0.00
6.00	6900.42	50	100.00	0.00	1.00	0.000	0.00
7.00	12510.9	50	100.00	0.00	1.00	0.000	0.00

Cumulative lateral displacements: 0.00**Abbreviations**

- $V_{s1,cs}$: Normalized shear wave velocity clean sand equivalent
 $(N_1)_{60,cs}$: Estimated normalized corrected clean sand SPT
 D_r : Relative density (%)
 γ_{max} : Maximum amplitude of cyclic shear strain (%)
 d_z : Soil layer thickness (m)
 LDI : Lateral displacement index (m)
 LD : Actual estimated displacement (m)

SPT BASED LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

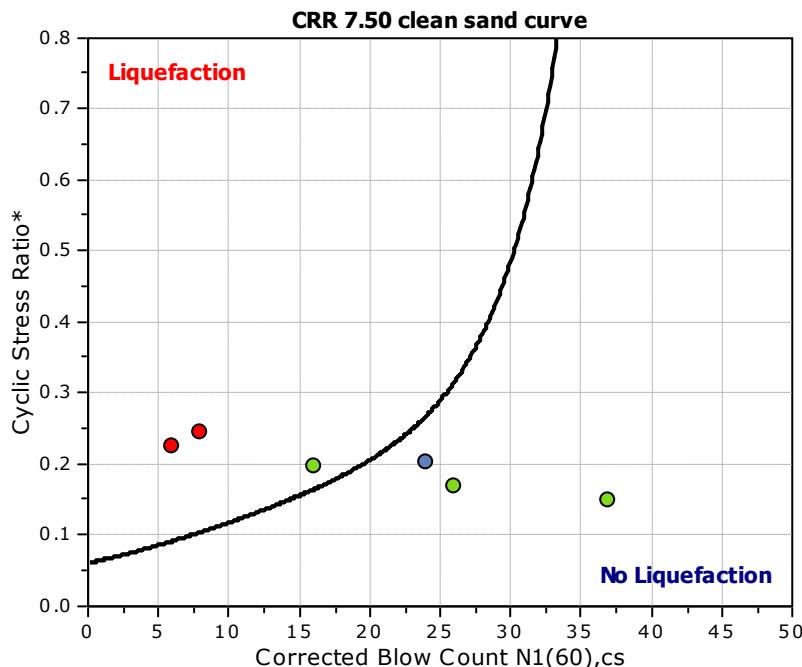
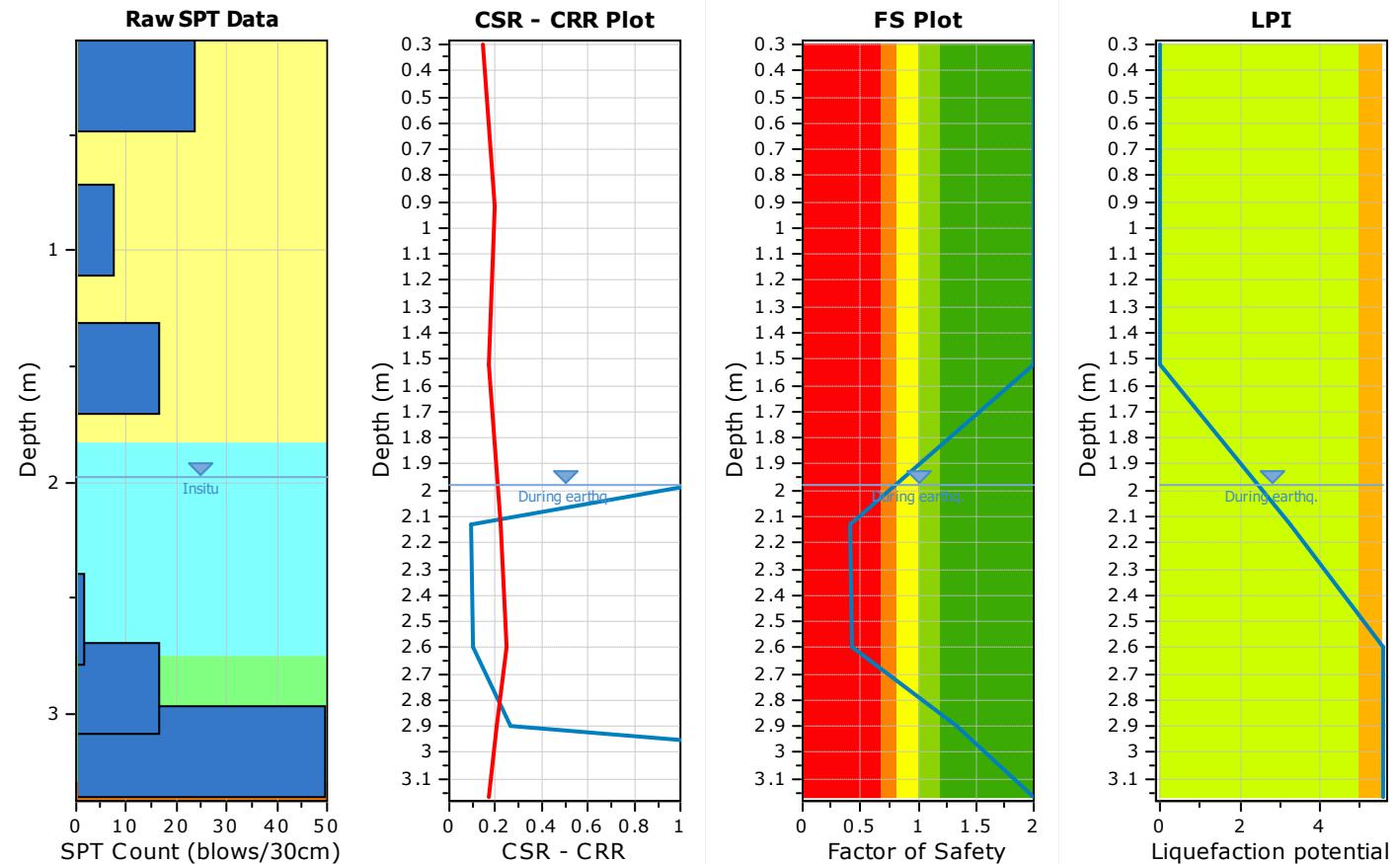
Project title : Évaluation du potentiel de liquéfaction

SPT Name: SPT F-2-2024

Location : Barrage Loiselle

:: Input parameters and analysis properties ::

Analysis method:	Boulanger & Idriss, 2014	G.W.T. (in-situ):	1.98 m
Fines correction method:	Boulanger & Idriss, 2014	G.W.T. (earthq.):	1.98 m
Sampling method:	Standard Sampler	Earthquake magnitude M_w :	6.30
Borehole diameter:	65mm to 115mm	Peak ground acceleration:	0.39 g
Rod length:	1.00 m	Eq. external load:	0.00 kPa
Hammer energy ratio:	1.00		



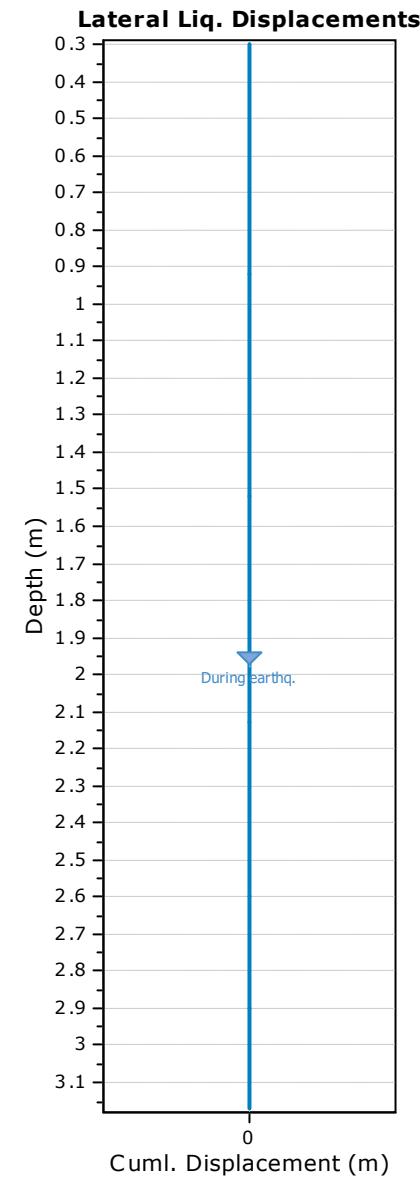
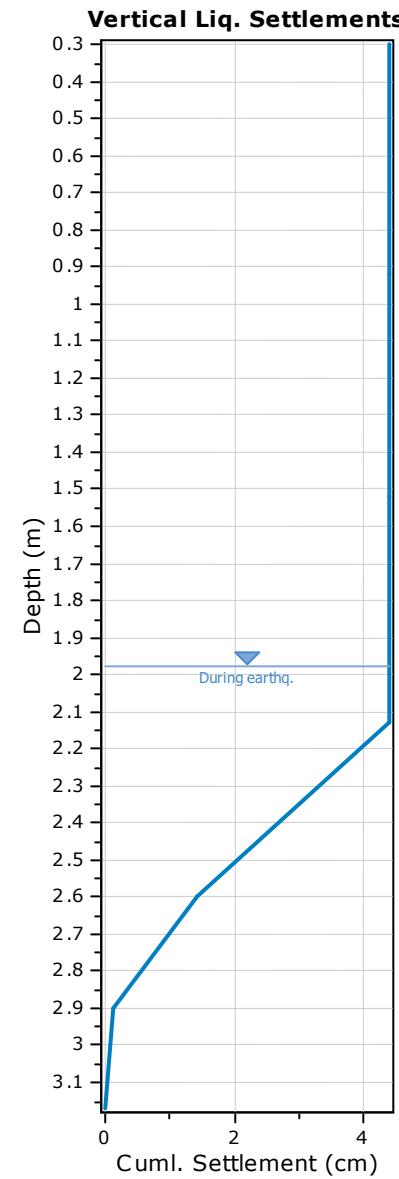
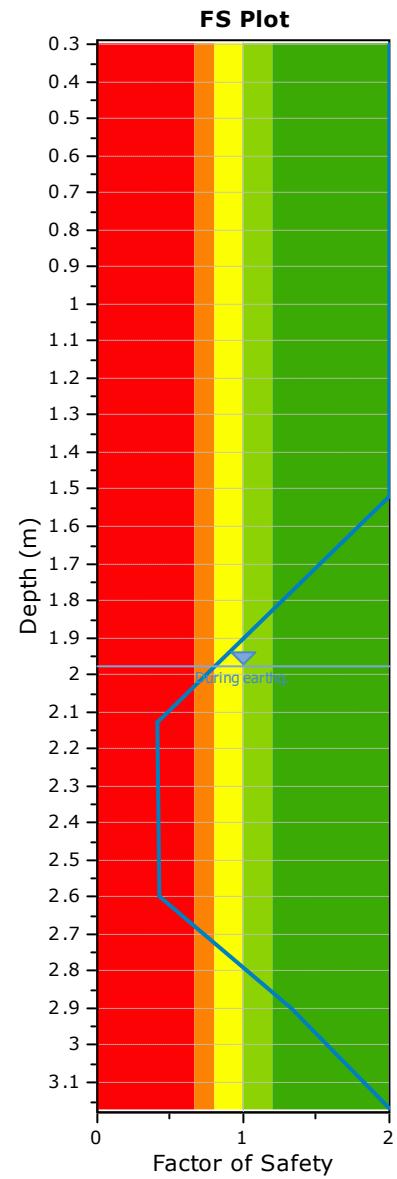
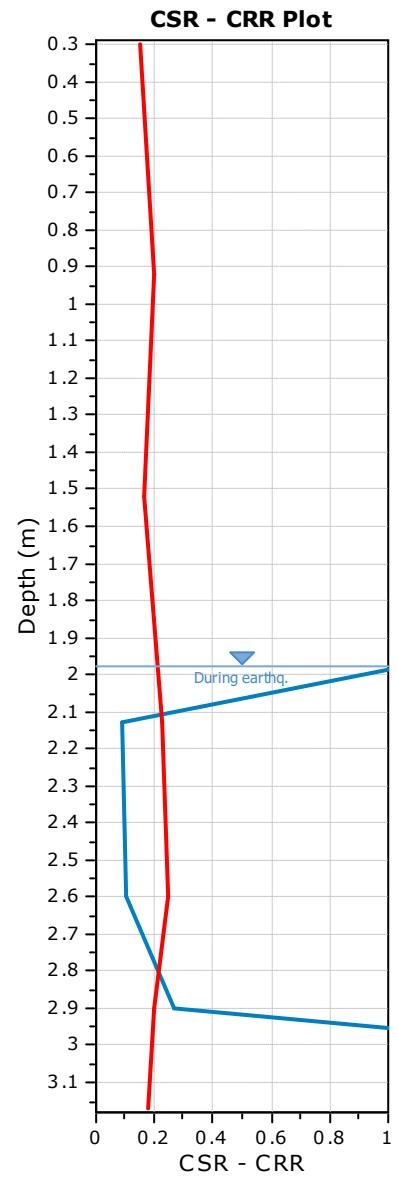
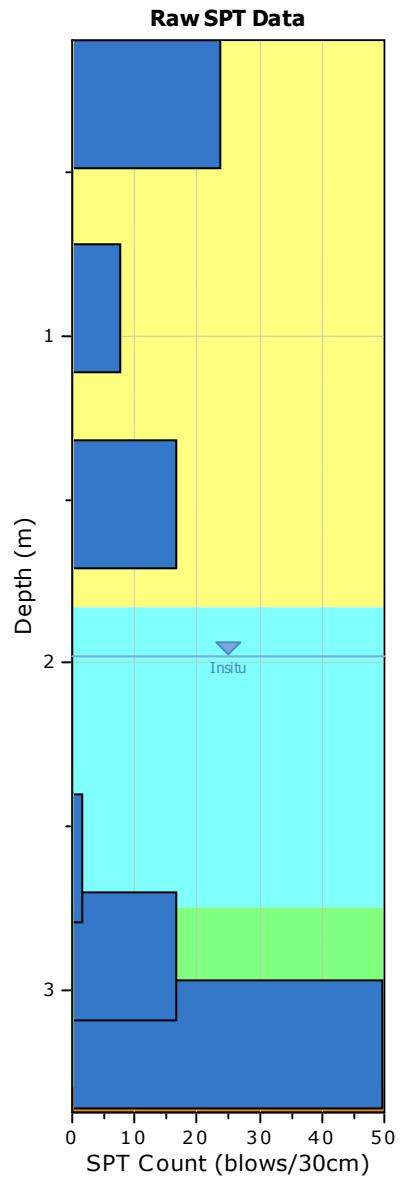
F.S. color scheme

- Almost certain it will liquefy
- Very likely to liquefy
- Liquefaction and no liq. are equally likely
- Unlike to liquefy
- Almost certain it will not liquefy

LPI color scheme

- Very high risk
- High risk
- Low risk

:: Overall Liquefaction Assessment Analysis Plots ::



:: Field input data ::					
Test Depth (m)	SPT Field Value (blows)	Fines Content (%)	Unit Weight (kN/m³)	Infl. Thickness (m)	Can Liquefy
0.30	24	35.00	20.00	0.61	Yes
0.92	8	35.40	20.00	0.61	Yes
1.52	17	45.60	20.00	0.61	Yes
2.13	0	54.50	19.00	0.61	Yes
2.60	2	50.00	19.00	0.31	Yes
2.90	17	42.10	21.00	0.30	Yes
3.17	50	40.00	21.00	0.25	Yes

Abbreviations

Depth: Depth at which test was performed (m)
 SPT Field Value: Number of blows per 30 cm
 Fines Content: Fines content at test depth (%)
 Unit Weight: Unit weight at test depth (kN/m³)
 Infl. Thickness: Thickness of the soil layer to be considered in settlements analysis (m)
 Can Liquefy: User defined switch for excluding/including test depth from the analysis procedure

:: Cyclic Resistance Ratio (CRR) calculation data ::																
Depth (m)	SPT Field Value	Unit Weight (kN/m³)	σ_v (kPa)	u_o (kPa)	σ'_{vo} (kPa)	m	C_N	C_E	C_B	C_R	C_S	$(N_1)_{60}$	FC (%)	$\Delta(N_1)_{60}$	$(N_1)_{60cs}$	CRR _{7.5}
0.30	24	20.00	6.00	0.00	6.00	0.30	1.70	1.00	1.00	0.75	1.00	31	35.00	5.51	37	4.000
0.92	8	20.00	18.40	0.00	18.40	0.44	1.70	1.00	1.00	0.75	1.00	10	35.40	5.51	16	4.000
1.52	17	20.00	30.40	0.00	30.40	0.37	1.56	1.00	1.00	0.75	1.00	20	45.60	5.61	26	4.000
2.13	0	19.00	41.99	1.47	40.52	0.55	1.65	1.00	1.00	0.80	1.00	0	54.50	5.61	6	0.092
2.60	2	19.00	50.92	6.08	44.84	0.53	1.54	1.00	1.00	0.80	1.00	2	50.00	5.61	8	0.105
2.90	17	21.00	57.22	9.03	48.19	0.39	1.34	1.00	1.00	0.80	1.00	18	42.10	5.59	24	0.268
3.17	50	21.00	62.89	11.67	51.22	0.26	1.20	1.00	1.00	0.85	1.00	51	40.00	5.58	57	4.000

Abbreviations

σ_v : Total stress during SPT test (kPa)

u_o : Water pore pressure during SPT test (kPa)

σ'_{vo} : Effective overburden pressure during SPT test (kPa)

m: Stress exponent normalization factor

C_N : Overburden correction factor

C_E : Energy correction factor

C_B : Borehole diameter correction factor

C_R : Rod length correction factor

C_S : Liner correction factor

$N_{1(60)}$: Corrected N_{SPT} to a 60% energy ratio

$\Delta(N_1)_{60}$: Equivalent clean sand adjustment

$N_{1(60)cs}$: Corrected $N_{1(60)}$ value for fines content

CRR_{7.5}: Cyclic resistance ratio for M=7.5

:: Cyclic Stress Ratio calculation (CSR fully adjusted and normalized) ::														
Depth (m)	Unit Weight (kN/m³)	$\sigma_{v,eq}$ (kPa)	$u_{o,eq}$ (kPa)	$\sigma'_{vo,eq}$ (kPa)	r_d	α	CSR	MSF _{max}	$(N_1)_{60cs}$	MSF	CSR _{eq,M=7.5}	K_{sigma}	CSR*	FS
0.30	20.00	6.00	0.00	6.00	1.00	1.00	0.255	2.20	37	1.56	0.164	1.10	0.149	2.000 ●
0.92	20.00	18.40	0.00	18.40	1.00	1.00	0.253	1.35	16	1.16	0.217	1.10	0.198	2.000 ●
1.52	20.00	30.40	0.00	30.40	0.99	1.00	0.250	1.77	26	1.36	0.184	1.10	0.168	2.000 ●
2.13	19.00	41.99	1.47	40.52	0.98	1.00	0.257	1.13	6	1.06	0.243	1.07	0.226	0.407 ●
2.60	19.00	50.92	6.08	44.84	0.97	1.00	0.279	1.15	8	1.07	0.261	1.07	0.244	0.429 ●
2.90	21.00	57.22	9.03	48.19	0.97	1.00	0.291	1.67	24	1.31	0.222	1.10	0.202	1.330 ●
3.17	21.00	62.89	11.67	51.22	0.96	1.00	0.299	2.20	57	1.56	0.192	1.10	0.175	2.000 ●

:: Cyclic Stress Ratio calculation (CSR fully adjusted and normalized) ::														
Depth (m)	Unit Weight (kN/m³)	$\sigma_{v,eq}$ (kPa)	$u_{o,eq}$ (kPa)	$\sigma'_{vo,eq}$ (kPa)	r_d	α	CSR	MSF_{max}	$(N_1)_{60cs}$	MSF	$CSR_{eq,M=7.5}$	K_{sigma}	CSR^*	FS

Abbreviations

$\sigma_{v,eq}$:	Total overburden pressure at test point, during earthquake (kPa)
$u_{o,eq}$:	Water pressure at test point, during earthquake (kPa)
$\sigma'_{vo,eq}$:	Effective overburden pressure, during earthquake (kPa)
r_d :	Nonlinear shear mass factor
α :	Improvement factor due to stone columns
CSR :	Cyclic Stress Ratio
MSF :	Magnitude Scaling Factor
$CSR_{eq,M=7.5}$:	CSR adjusted for M=7.5
K_{sigma} :	Effective overburden stress factor
CSR^* :	CSR fully adjusted (user FS applied)***
FS:	Calculated factor of safety against soil liquefaction

*** User FS: 1.00

:: Liquefaction potential according to Iwasaki ::					
Depth (m)	FS	F	wz	Thickness (m)	I_L
0.30	2.000	0.00	9.85	0.62	0.00
0.92	2.000	0.00	9.54	0.62	0.00
1.52	2.000	0.00	9.24	0.60	0.00
2.13	0.407	0.59	8.94	0.61	3.23
2.60	0.429	0.57	8.70	0.47	2.33
2.90	1.330	0.00	8.55	0.30	0.00
3.17	2.000	0.00	8.41	0.27	0.00

Overall potential I_L : 5.57 $I_L = 0.00$ - No liquefaction I_L between 0.00 and 5 - Liquefaction not probable I_L between 5 and 15 - Liquefaction probable $I_L > 15$ - Liquefaction certain

:: Vertical settlements estimation for dry sands ::													
Depth (m)	$(N_1)_{60}$	T_{av}	p	G_{max} (MPa)	α	b	γ	ϵ_{15}	N_c	ϵ_{Nc} weight factor	ϵ_{Nc} (%)	Δh (m)	ΔS (cm)
0.30	31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.61	0.000
0.92	10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.61	0.000
1.52	20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	0.61	0.000

Cumulative settlemetns: 0.000**Abbreviations**

T_{av} :	Average cyclic shear stress
p:	Average stress
G_{max} :	Maximum shear modulus (MPa)
α, b :	Shear strain formula variables
γ :	Average shear strain
ϵ_{15} :	Volumetric strain after 15 cycles
N_c :	Number of cycles
ϵ_{Nc} :	Volumetric strain for number of cycles N_c (%)
Δh :	Thickness of soil layer (cm)
ΔS :	Settlement of soil layer (cm)

:: Vertical & Lateral displacements estimation for saturated sands ::										
Depth (m)	(N ₁) _{60cs}	γ _{lim} (%)	F _a	FS _{liq}	γ _{max} (%)	e _v weight factor	e _v (%)	dz (m)	S _{v-1D} (cm)	LDI (m)
2.13	6	74.98	0.95	0.407	74.98	1.00	4.86	0.61	2.965	0.00
2.60	8	59.22	0.94	0.429	59.22	1.00	4.23	0.31	1.310	0.00
2.90	24	10.02	0.29	1.330	1.60	1.00	0.39	0.30	0.118	0.00
3.17	57	0.00	-2.17	2.000	0.00	1.00	0.00	0.25	0.000	0.00

Cumulative settlements: **4.393** **0.00**

Abbreviations

- γ_{lim}: Limiting shear strain (%)
 F_a/N: Maximum shear strain factor
 γ_{max}: Maximum shear strain (%)
 e_v:: Post liquefaction volumetric strain (%)
 S_{v-1D}: Estimated vertical settlement (cm)
 LDI: Estimated lateral displacement (m)

V_s BASED LIQUEFACTION ANALYSIS REPORT

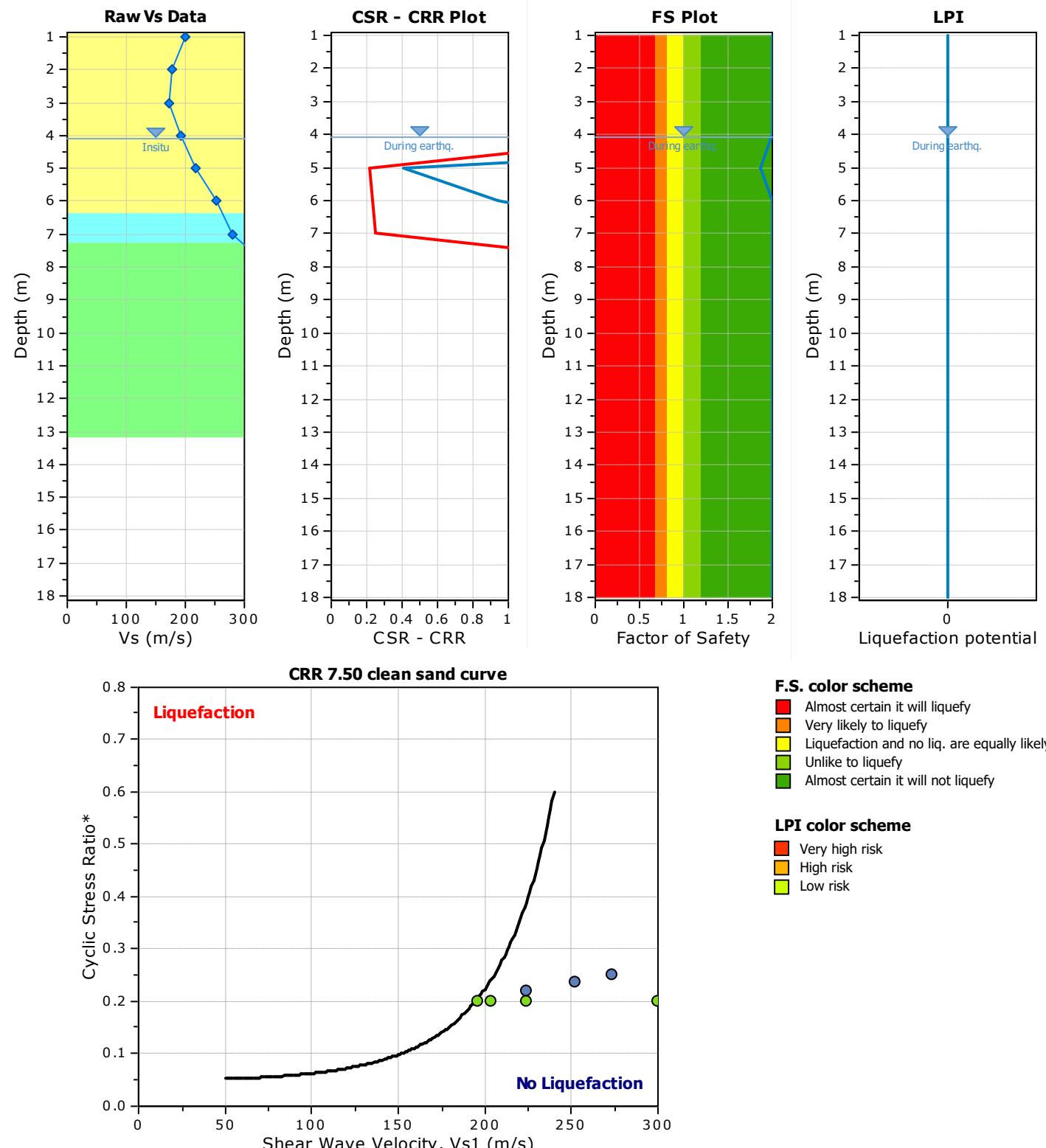
Project title : Évaluation du potentiel de liquéfaction

V_s Name: Vs Coupe C

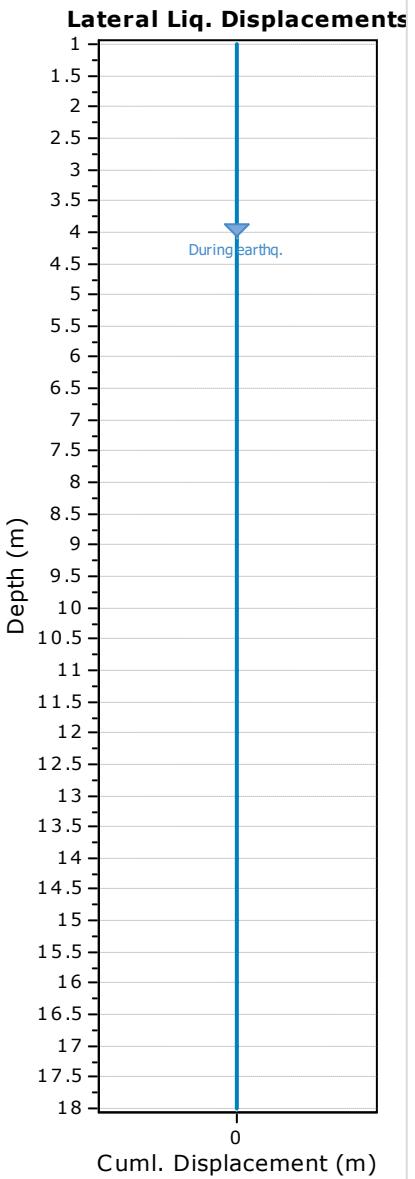
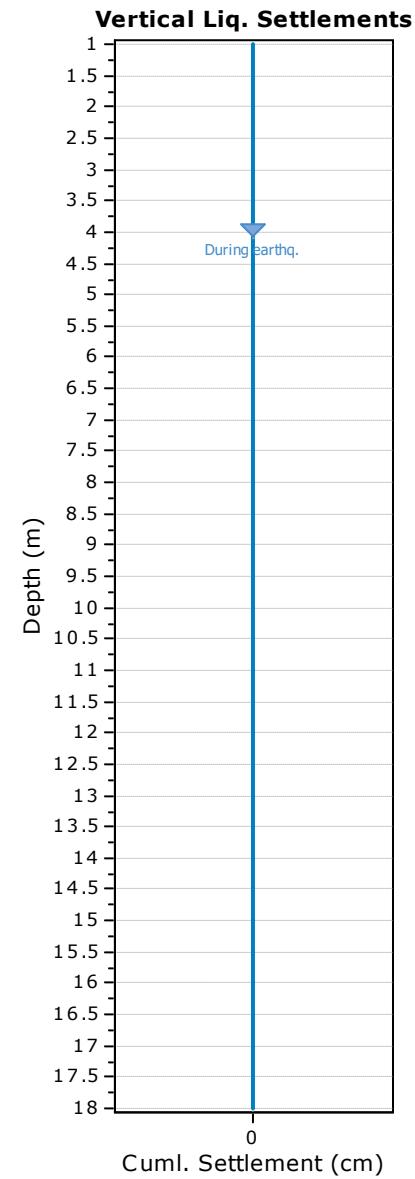
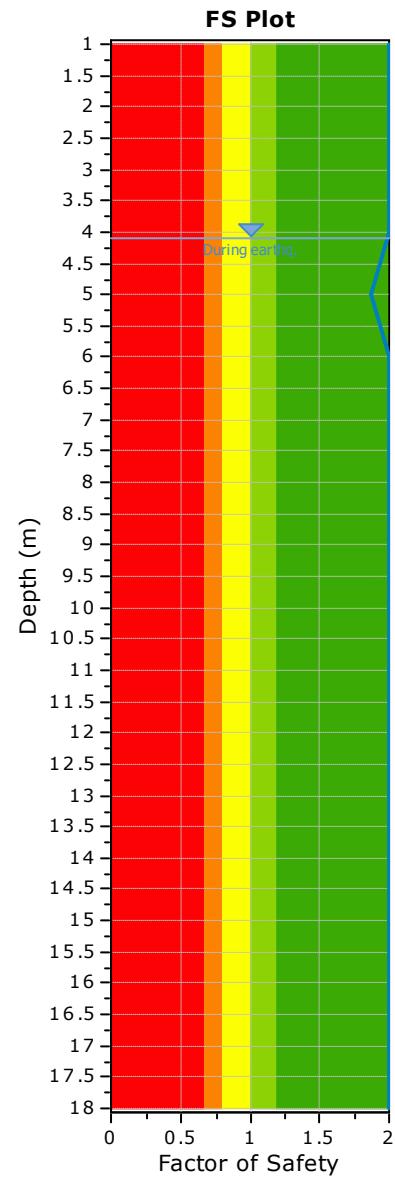
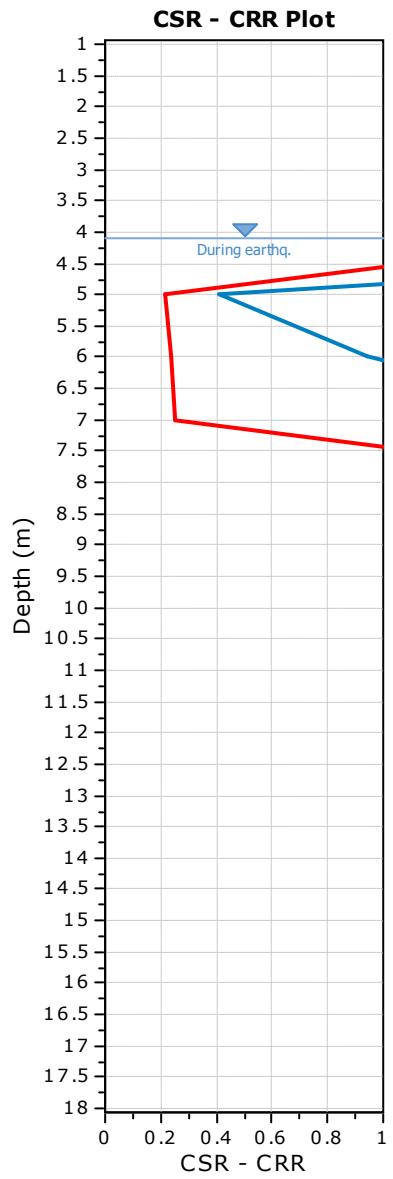
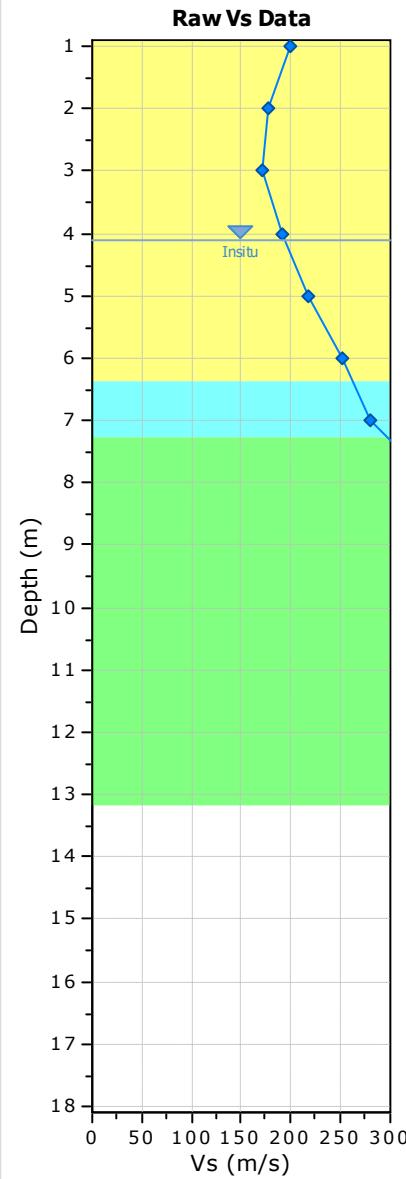
Location : Barrage Loiselle

Input parameters and analysis properties ::

Analysis method: Kayen et al. 2013
 G.W.T. (in-situ): 4.10 m
 G.W.T. (earthq.): 4.10 m
 Earthquake magnitude M_w: 6.30
 Peak ground acceleration: 0.39 g
 Eq. external load: 0.00 kPa



:: Overall Liquefaction Assessment Analysis Plots ::



:: Field input data ::					
Test Depth (m)	V _s Field Value (m/s)	Fines Content (%)	Unit Weight (kN/m ³)	Infl. Thickness (m)	Can Liquefy
1.00	200.00	45.00	20.00	1.00	Yes
2.00	178.00	45.00	20.00	1.00	Yes
3.00	172.00	45.00	20.00	1.00	Yes
4.00	192.00	45.00	20.00	1.00	Yes
5.00	218.00	45.00	20.00	1.00	Yes
6.00	252.00	54.50	19.00	1.00	Yes
7.00	280.00	40.00	21.00	1.00	Yes
8.00	342.00	40.00	21.00	1.00	Yes
9.00	367.00	40.00	21.00	1.00	Yes
10.00	467.00	40.00	21.00	1.00	Yes
11.00	608.00	40.00	21.00	1.00	Yes
12.00	644.00	40.00	21.00	1.00	Yes
13.00	767.00	40.00	21.00	1.00	Yes
14.00	887.00	40.00	21.00	1.00	Yes
15.00	994.00	40.00	21.00	1.00	Yes
16.00	1309.00	40.00	21.00	1.00	Yes
17.00	1618.00	40.00	21.00	1.00	Yes
18.00	1700.00	40.00	21.00	1.00	Yes

Abbreviations

Depth: Depth at which test was performed (m)
 Vs Field Value: Measured shear waves velocity (m/s)
 Fines Content: Fines content at test depth (%)
 Unit Weight: Unit weight at test depth (kN/m³)
 Infl. Thickness: Thickness of the soil layer to be considered in settlements analysis (m)
 Can Liquefy: User defined switch for excluding/including test depth from the analysis procedure

:: Cyclic Resistance Ratio (CRR) calculation data ::								
Depth (m)	V _s Field Value (ft/s)	Unit Weight (pcf)	σ _v (kPa)	u _o (kPa)	σ' _{vo} (kPa)	Norm. Factor	V _{s1} (m/s)	CRR _{7.5}
1.00	200.00	20.00	20.00	0.00	20.00	1.50	300.06	4.000
2.00	178.00	20.00	40.00	0.00	40.00	1.26	224.56	4.000
3.00	172.00	20.00	60.00	0.00	60.00	1.14	196.07	4.000
4.00	192.00	20.00	80.00	0.00	80.00	1.06	203.68	4.000
5.00	218.00	20.00	100.00	8.83	91.17	1.03	223.83	0.410
6.00	252.00	19.00	119.00	18.64	100.36	1.00	252.60	0.944
7.00	280.00	21.00	140.00	28.45	111.55	0.98	273.35	1.873
8.00	342.00	21.00	161.00	38.26	122.74	0.95	325.99	4.000
9.00	367.00	21.00	182.00	48.07	133.93	0.93	342.27	4.000
10.00	467.00	21.00	203.00	57.88	145.12	0.91	426.89	4.000
11.00	608.00	21.00	224.00	67.69	156.31	0.90	545.55	4.000
12.00	644.00	21.00	245.00	77.50	167.50	0.88	567.95	4.000
13.00	767.00	21.00	266.00	87.31	178.69	0.87	665.58	4.000
14.00	887.00	21.00	287.00	97.12	189.88	0.85	758.11	4.000
15.00	994.00	21.00	308.00	106.93	201.07	0.84	837.49	4.000
16.00	1309.00	21.00	329.00	116.74	212.26	0.83	1088.06	4.000
17.00	1618.00	21.00	350.00	126.55	223.45	0.82	1327.74	4.000
18.00	1700.00	21.00	371.00	136.36	234.64	0.81	1378.09	4.000

:: Cyclic Resistance Ratio (CRR) calculation data ::								
Depth (m)	V _s Field Value (ft/s)	Unit Weight (pcf)	σ _v (kPa)	u _o (kPa)	σ' _{vo} (kPa)	Norm. Factor	V _{s1} (m/s)	CRR _{7.5}

Abbreviations

σ_v : Total stress during SPT test (kPa)
 u_o : Water pore pressure during SPT test (kPa)
 σ'_{vo} : Effective overburden pressure during SPT test (kPa)
 Norm. Factor: overburden-stress correction factor
 V_{s1} : Overburden-stress corrected shear wave velocity
 CRR_{7.5}: Cyclic resistance ratio for M=7.5

:: Cyclic Stress Ratio calculation (CSR fully adjusted and normalized) ::												
Depth (m)	Unit Weight (pcf)	σ _{v,eq} (kPa)	u _{o,eq} (kPa)	σ' _{vo,eq} (kPa)	r _d	α	CSR	MSF	CSR _{eq,M=7.5}	K _{sigma}	CSR*	FS
1.00	20.00	20.00	0.00	20.00	1.00	1.00	0.254	1.27	0.200	1.00	0.200	2.000
2.00	20.00	40.00	0.00	40.00	1.00	1.00	0.254	1.27	0.200	1.00	0.200	2.000
3.00	20.00	60.00	0.00	60.00	1.00	1.00	0.254	1.27	0.200	1.00	0.200	2.000
4.00	20.00	80.00	0.00	80.00	1.00	1.00	0.254	1.27	0.200	1.00	0.200	2.000
5.00	20.00	100.00	8.83	91.17	1.00	1.00	0.278	1.27	0.219	1.00	0.219	1.872
6.00	19.00	119.00	18.64	100.36	1.00	1.00	0.301	1.27	0.237	1.00	0.237	2.000
7.00	21.00	140.00	28.45	111.55	1.00	1.00	0.318	1.27	0.251	1.00	0.251	2.000
8.00	21.00	161.00	38.26	122.74	1.00	1.00	0.333	1.27	0.262	1.00	0.262	2.000
9.00	21.00	182.00	48.07	133.93	1.00	1.00	0.344	1.27	0.272	1.00	0.272	2.000
10.00	21.00	203.00	57.88	145.12	1.00	1.00	0.355	1.27	0.279	1.00	0.279	2.000
11.00	21.00	224.00	67.69	156.31	1.00	1.00	0.363	1.27	0.286	1.00	0.286	2.000
12.00	21.00	245.00	77.50	167.50	1.00	1.00	0.371	1.27	0.292	1.00	0.292	2.000
13.00	21.00	266.00	87.31	178.69	1.00	1.00	0.377	1.27	0.297	1.00	0.297	2.000
14.00	21.00	287.00	97.12	189.88	1.00	1.00	0.383	1.27	0.302	1.00	0.302	2.000
15.00	21.00	308.00	106.93	201.07	1.00	1.00	0.388	1.27	0.306	1.00	0.306	2.000
16.00	21.00	329.00	116.74	212.26	1.00	1.00	0.393	1.27	0.310	1.00	0.310	2.000
17.00	21.00	350.00	126.55	223.45	1.00	1.00	0.397	1.27	0.313	1.00	0.313	2.000
18.00	21.00	371.00	136.36	234.64	1.00	1.00	0.401	1.27	0.316	1.00	0.316	2.000

Abbreviations

$\sigma_{v,eq}$: Total overburden pressure at test point, during earthquake (kPa)
 $u_{o,eq}$: Water pressure at test point, during earthquake (kPa)
 $\sigma'_{vo,eq}$: Effective overburden pressure, during earthquake (kPa)
 r_d : Nonlinear shear mass factor
 α : Improvement factor due to stone columns
 CSR : Cyclic Stress Ratio
 MSF : Magnitude Scaling Factor
 CSR_{eq,M=7.5}: CSR adjusted for M=7.5
 K_{sigma}: Effective overburden stress factor
 CSR*: CSR fully adjusted (user FS applied)***
 FS: Calculated factor of safety against soil liquefaction

*** User FS: 1.00

:: Liquefaction potential according to Iwasaki ::					
Depth (m)	FS	F	wz	Thickness (m)	I _L
1.00	2.000	0.00	9.50	1.00	0.00
2.00	2.000	0.00	9.00	1.00	0.00
3.00	2.000	0.00	8.50	1.00	0.00
4.00	2.000	0.00	8.00	1.00	0.00

:: Liquefaction potential according to Iwasaki ::					
Depth (m)	FS	F	wz	Thickness (m)	I _L
5.00	1.872	0.00	7.50	1.00	0.00
6.00	2.000	0.00	7.00	1.00	0.00
7.00	2.000	0.00	6.50	1.00	0.00
8.00	2.000	0.00	6.00	1.00	0.00
9.00	2.000	0.00	5.50	1.00	0.00
10.00	2.000	0.00	5.00	1.00	0.00
11.00	2.000	0.00	4.50	1.00	0.00
12.00	2.000	0.00	4.00	1.00	0.00
13.00	2.000	0.00	3.50	1.00	0.00
14.00	2.000	0.00	3.00	1.00	0.00
15.00	2.000	0.00	2.50	1.00	0.00
16.00	2.000	0.00	2.00	1.00	0.00
17.00	2.000	0.00	1.50	1.00	0.00
18.00	2.000	0.00	1.00	1.00	0.00

Overall potential I_L : 0.00

I_L = 0.00 - No liquefaction

I_L between 0.00 and 5 - Liquefaction not probable

I_L between 5 and 15 - Liquefaction probable

I_L > 15 - Liquefaction certain

:: Vertical settlements estimation for dry sands ::													
Depth (m)	V _{s1,cs} (ft/s)	(N _I) _{60,cs}	T _{av}	p	G _{max} (MPa)	a	b	γ	ε ₁₅	N _c	ε _{nc} (%)	Δh (m)	ΔS (cm)
1.00	394.63	50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.000
2.00	249.39	50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.000
3.00	209.23	31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.000
4.00	219.35	37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.000

Cumulative settlemetns: 0.000

Abbreviations

- V_{s1,cs}: Normalized shear wave velocity clean sand equivalent
 (N_I)_{60,cs}: Estimated normalized corrected clean sand SPT
 T_{av}: Average cyclic shear stress
 p: Average stress
 G_{max}: Maximum shear modulus (MPa)
 a, b: Shear strain formula variables
 γ: Average shear strain
 ε₁₅: Volumetric strain after 15 cycles
 N_c: Number of cycles
 ε_{nc}: Volumetric strain for number of cycles N_c (%)
 Δh: Thickness of soil layer (cm)
 ΔS: Settlement of soil layer (cm)

:: Vertical settlements estimation for saturated sands ::						
Depth (m)	V _{s1,cs} (m/s)	q _{t1N,cs}	e _v weight factor	e _v (%)	Δh (m)	s (cm)
5.00	248.28	389.33	1.00	0.00	1.00	0.000
6.00	295.90	832.18	1.00	0.00	1.00	0.000
7.00	335.66	1436.35	1.00	0.00	1.00	0.000
8.00	461.44	5696.31	1.00	0.00	1.00	0.000

:: Vertical settlements estimation for saturated sands ::

Depth (m)	V _{s1,cs} (m/s)	q _{t1N,cs}	e _v weight factor	e _v (%)	Δh (m)	s (cm)
9.00	508.72	8689.30	1.00	0.00	1.00	0.000
10.00	833.09	73502.04	1.00	0.00	1.00	0.000
11.00	1570.63	1144042.76	1.00	0.00	1.00	0.000
12.00	1755.01	1849795.98	1.00	0.00	1.00	0.000
13.00	2757.95	13089836.9	1.00	0.00	1.00	0.000
14.00	4050.52	69111654.9	1.00	0.00	1.00	0.000
15.00	5466.45	253025649.	1.00	0.00	1.00	0.000
16.00	12195.0	81607744	1.00	0.00	1.00	0.000
17.00	22604.9	118029638	1.00	0.00	1.00	0.000
18.00	25375.7	194/0093/	1.00	0.00	1.00	0.000
		271 94				

Cumulative settlements: 0.000**Abbreviations**

- V_{s1,cs}: Normalized shear wave velocity clean sand equivalent
 q_{t1N,cs}: Estimated normalized corrected clean sand cone resistance
 e_v: Post liquefaction volumetric strain (%)
 Δh: Thickness of soil layer to be considered (m)
 s: Estimated settlement (cm)

:: Lateral displacements estimation for saturated sands ::

Depth (m)	V _{s1,cs} (m/s)	(N ₁) _{60,cs}	D _r (%)	γ _{max} (%)	d _z (m)	LDI	LD (m)
1.00	394.63	50	100.00	0.00	1.00	0.000	0.00
2.00	249.39	50	100.00	0.00	1.00	0.000	0.00
3.00	209.23	31	77.95	0.00	1.00	0.000	0.00
4.00	219.35	37	85.16	0.00	1.00	0.000	0.00
5.00	248.28	50	100.00	1.05	1.00	0.000	0.00
6.00	295.90	50	100.00	0.00	1.00	0.000	0.00
7.00	335.66	50	100.00	0.00	1.00	0.000	0.00
8.00	461.44	50	100.00	0.00	1.00	0.000	0.00
9.00	508.72	50	100.00	0.00	1.00	0.000	0.00
10.00	833.09	50	100.00	0.00	1.00	0.000	0.00
11.00	1570.63	50	100.00	0.00	1.00	0.000	0.00
12.00	1755.01	50	100.00	0.00	1.00	0.000	0.00
13.00	2757.95	50	100.00	0.00	1.00	0.000	0.00
14.00	4050.52	50	100.00	0.00	1.00	0.000	0.00
15.00	5466.45	50	100.00	0.00	1.00	0.000	0.00
16.00	12195.0	50	100.00	0.00	1.00	0.000	0.00
	7						

References

- Ronald D. Andrus, Hossein Hayati, Nisha P. Mohanan, 2009. Correcting Liquefaction Resistance for Aged Sands Using Measured to Estimated Velocity Ratio, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 135, No. 6, June 1
- Boulanger, R.W. and Idriss, I. M., 2014. CPT AND SPT BASED LIQUEFACTION TRIGGERING PROCEDURES. DEPARTMENT OF CIVIL & ENVIRONMENTAL ENGINEERING COLLEGE OF ENGINEERING UNIVERSITY OF CALIFORNIA AT DAVIS
- Dipl.-Ing. Heinz J. Priebe, Vibro Replacement to Prevent Earthquake Induced Liquefaction, Proceedings of the Geotechnique-Colloquium at Darmstadt, Germany, on March 19th, 1998 (also published in Ground Engineering, September 1998), Technical paper 12-57E
- Robertson, P.K. and Cabal, K.L., 2007, Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering. Available at no cost at <http://www.geologismiki.gr/>
- Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J., Liao, S., Marcuson III, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R., and Stokoe, K.H., Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, ASCE, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, October, pp 817-833
- Zhang, G., Robertson. P.K., Brachman, R., 2002, Estimating Liquefaction Induced Ground Settlements from the CPT, Canadian Geotechnical Journal, 39: pp 1168-1180
- Zhang, G., Robertson. P.K., Brachman, R., 2004, Estimating Liquefaction Induced Lateral Displacements using the SPT and CPT, ASCE, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, Vol. 130, No. 8, 861-871
- Pradel, D., 1998, Procedure to Evaluate Earthquake-Induced Settlements in Dry Sandy Soils, ASCE, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, Vol. 124, No. 4, 364-368
- R. Kayen, R. E. S. Moss, E. M. Thompson, R. B. Seed, K. O. Cetin, A. Der Kiureghian, Y. Tanaka, K. Tokimatsu, 2013. Shear-Wave Velocity-Based Probabilistic and Deterministic Assessment of Seismic Soil Liquefaction Potential, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 139, No. 3, March 1

ANNEXE

G CLASSEMENT

Projet : CA0019924.4595
 Objet : Classement du barrage du lac Loiselle

Par : S. Laforce, ing., M. Ing.
 Date : 2024-06-26

1.0 Informations générales

N° et nom du barrage : X2181546
 Entité hydrographique : Lac Loiselle
 Section du barrage : Digue en terre

2.0 Paramètres physiques constants

Hauteur du barrage selon le RSB (m) : 8.2
 Points : 1.64

Capacité de retenue selon le RSB (10^6 m 3) : 0.054
 Points : 1.00

Type de barrage :

Inscrire OUI dans la case appropriée (une seule case)

Béton-gravité	
Béton-gravité remblayé	
Béton-voûte	
Enrocement - zoné (écran d'étanchéité)	
Enrocement - zoné (noyau)	
Caissons de bois ou palplanches en acier remplies de pierres	
Caissons de bois ou de palplanches en acier remplies de terre	
Contreforts de béton	
Contreforts de bois (caissons)	
Contreforts de bois (chandelles)	
Déversoir libre - carapace de béton	
Déversoir libre en enrocement	
Ecran de béton ou de palplanches en acier à l'amont d'une digue de terre	
Enrocement	
Enrocement- masque amont de béton ou de terre	
Palplanches en acier	
Terre	oui
Points :	10

Type de terrain de fondation (voir annexe 2) :

Inscrire OUI dans la case appropriée (une seule case)

Roc traité	
Roc	
Noyau au roc traité	
Till traité	
Noyau au roc	
Till	oui
Noyau dans le till	
Argile traitée	
Argile	
Alluvion traitée	
Noyau dans l'argile	
Alluvion ou nature inconnue	
Points :	4

Projet : CA0019924.4595
 Objet : Classement du barrage

Par : S. Laforce, ing., M. Ing.
 Date : 2024-06-26

3.0 Paramètres variables

Âge du barrage

Barrage en béton :	
Barrage en remblai :	65
Barrage en bois :	
Barrage déversoir en enrochements :	
Points :	1

Zone de séismicité (voir annexe 4) :	4
Points :	6

Fiabilité des appareils d'évacuation :

Inscrire OUI dans la case appropriée (une seule case)

Adéquate	
Acceptable	oui
Inadéquate ou indéterminée	
Points :	5

État du barrage (voir annexe 5) :

Inscrire OUI dans la case appropriée (une seule case)

Très bon	
Bon	
Acceptable	oui
Pauvre ou indéterminé	
Points :	5

Pointage Paramètres variables (PV) :	4.25
--------------------------------------	------

Pointage de Vulnérabilité (V = PC x PV) :	17.68
---	-------

4.0 Mesure des conséquences de rupture du barrage

Niveau des conséquences :

Inscrire OUI dans la case appropriée (une seule case)

Minimal	
Faible	
Moyen	oui
Important	
Très important	
Considérable	
Points :	3

Valeur « P »	Classe du barrage
$P \geq 120$	A
$70 \leq P < 120$	B
$25 \leq P < 70$	C
$P < 25$	D
$P < 70$ et Minimal	E

Pointage de Conséquence (C) :	3
-------------------------------	---

Pointage Global (P = V x C) :	53.04
Classe du barrage :	C

ANNEXE

H ÉTUDE GÉOTECHNIQUE

Rapport technique – Version finale

**Caractérisation géophysique et
géotechnique du barrage du lac
Loiselle**

Barrage du lac Loiselle (X2181546)

Chemin des érables, Sainte-Anne-des-Lacs
(Québec)

WSP Canada Inc.



Rapport technique – Version finale

Caractérisation géophysique et géotechnique du barrage du lac Loiselle

Barrage du lac Loiselle (X2181546)

Chemin des érables, Sainte-Anne-des-Lacs
(Québec)

WSP Canada Inc.

Rapport final

N° de référence géostack : 231237

Date : 22 avril 2024

Les Solutions Géostack inc.
135-6780, 1^{re} Avenue
Québec (QC) G1H 2W8

Signatures

Présenté à :

Monsieur Charles Desgagnés, CPI
Civil et géotechnique - Hydro et Barrage
WSP Canada inc.
1135, boulevard Lebourgneuf
Québec, Qc, G2K 0M5
Courriel : charles.desgagnes@wsp.com

Préparé par :



Bastien Bollea
Assistant géoscientifique
Courriel : bbollea@geostack.ca



Thomas Béraud, PhD
Chargé de projet en géophysique
Courriel : tberaud@geostack.ca



Martin Blouin, ing. PhD
Président – Directeur technique
Courriel : mblouin@geostack.ca

Révisé par :



Philippe Morin, ing.
Directeur des opérations
Courriel : pmorin@geostack.ca

Table des matières

1	INTRODUCTION	1
1.1	CONTEXTE DE L'ÉTUDE	1
1.2	OBJECTIF DE L'ÉTUDE	2
2	DESCRIPTION DU SITE.....	2
3	ÉQUIPE DE PROJET.....	3
4	DESCRIPTION DES TRAVAUX DE CARACTÉRISATION.....	3
4.1	CONDITIONS SUR LE SITE ET DÉROULEMENT DES TRAVAUX.....	3
4.2	LEVÉS PAR SISMIQUE COMBINÉE	4
4.2.1	CARACTÉRISATION DE SITE PAR SISMIQUE COMBINÉE	4
4.2.2	DESCRIPTION DE L'ÉQUIPEMENT UTILISÉ	4
4.2.3	DISPOSITIF ET MONTAGE UTILISÉS	5
4.3	INVESTIGATION GÉOTECHNIQUE	6
4.3.1	FORAGES AVEC PRÉLÈVEMENT D'ÉCHANTILLON.....	6
4.3.2	TRAVAUX DE LABORATOIRE	8
4.4	DONNÉES GPS ET ARPENTAGE	8
5	RÉSULTATS DE L'INVESTIGATION GÉOTECHNIQUE	8
5.1	DESCRIPTION DES SOLS ET DU SOCLE ROCHEUX RENCONTRÉ DANS LES FORAGES GÉOTECHNIQUES.....	8
5.1.1	REMBLAI	9
5.1.2	DÉPÔTS NATURELS	10
5.1.3	SOCLE ROCHEUX.....	10
5.2	EAU SOUTERRAINE	10
6	RÉSULTAT DE L'INVESTIGATION GÉOPHYSIQUE	11
6.1	APPROCHE PRÉCONISÉE	11
6.1.1	CARACTÉRISATION DE SITE MULTI-MÉTHODE	11
6.2	LE TRAITEMENT DES DONNÉES	11
6.2.1	LA SISMIQUE RÉFRACTION	11
6.2.2	MASW 2D	12
6.3	L'INTERPRÉTATION DES DONNÉES.....	14
6.3.1	SONDAGE DE CONTRÔLE	14
6.3.2	LA SISMIQUE COMBINÉE (RÉFRACTION + MASW2D).....	14
6.4	HORIZONS INTERPRÉTÉS.....	14
7	CONCLUSION	15

Tableaux

TABLEAU 1	LISTE DES PARTICIPANTS	3
TABLEAU 2	CARACTÉRISTIQUES DES FORAGES RÉALISÉS	6
TABLEAU 3	LISTE DES ESSAIS GÉOTECHNIQUES RÉALISÉS EN LABORATOIRE.....	8
TABLEAU 4	STRATIGRAPHIE RENCONTRÉE AU DROIT DES FORAGES	9
TABLEAU 5	RÉSULTATS DES ANALYSES EN LABORATOIRE - REMBLAI.....	9
TABLEAU 6	RÉSULTATS DES ANALYSES EN LABORATOIRE – DÉPÔTS NATURELS PROBABLES.....	10

Figures

FIGURE 1	LOCALISATION DU SITE À L'ÉTUDE	1
FIGURE 2	APERÇU DU BARRAGE ACTUEL ET DE LA ZONE À L'ÉTUDE	2
FIGURE 3	EMPLACEMENTS DES LEVÉS GÉOPHYSIQUES ET DES FORAGES GÉOTECHNIQUES RÉALISÉS.....	4
FIGURE 4	SOURCE ET CAPTEURS UTILISÉS POUR LES LEVÉS SISMIQUES.....	5
FIGURE 5	MONTAGE DU LEVÉ SISMIQUE : FLÛTE ET MODULE D'ACQUISITION.....	5
FIGURE 6	FORAGE F-1-2024, VUE VERS L'EST (2024-02-12).....	7
FIGURE 7	EXEMPLE D'ENREGISTREMENT D'UN TIR SISMIQUE ET IDENTIFICATION DE L'ONDE RÉFRACTÉE.....	11
FIGURE 8	DROMOCHRONIQUES DU LEVÉ LSP-01.....	12
FIGURE 9	EXEMPLE D'UN DIAGRAMME DE DISPERSION ISSU D'UN ENREGISTREMENT SISMIQUE.....	12
FIGURE 10	AJUSTEMENT DE LA COURBE DE DISPERSION THÉORIQUE À LA COURBE POINTÉE SUR LES DONNÉES.....	13
FIGURE 11	MODÈLE DE VITESSE RÉSULTANT DE L'AJUSTEMENT DES DONNÉES MESURÉES.....	13

Annexes

- ANNEXE A CARTES DE LOCALISATION DU SITE À L'ÉTUDE, DES LEVÉS GÉOPHYSIQUES ET DES FORAGES GÉOTECHNIQUES
- ANNEXE B INTERPRETATION DES LEVÉS GÉOPHYSIQUES EFFECTUÉS
- ANNEXE C RAPPORT DES FORAGES GÉOTECHNIQUES
- ANNEXE D RÉSULTATS DES ESSAIS DE LABORATOIRES RÉALISÉS PAR LABORATOIRES D'EXPERTISES DE QUÉBEC LTÉE
- ANNEXE E PHOTOGRAPHIES
- ANNEXE F PRINCIPES THÉORIQUES DES MÉTHODES GÉOPHYSIQUES DÉPLOYÉES DANS LE CADRE DU PROJET
- ANNEXE G LIVRABLES NUMÉRIQUES

1 Introduction

1.1 Contexte de l'étude

Dans le cadre de l'étude d'évaluation de la sécurité du barrage de lac Loiselle (barrage X218154) situé dans la municipalité de Sainte-Anne-des-Monts, WSP Canada Inc. (**WSP**), par l'entremise de Nicolas Bélanger et Charles Desgagnés, a mandaté Les Solutions Géostack inc. (**Géostack**) afin de procéder à la réalisation d'une étude de caractérisation géophysique et géotechnique. Cette étude a consisté en la réalisation d'un levé en sismique combinée (réfraction – MASW2D), et de forages géotechniques. Le site est localisé en bordure du chemin des érables, dans la municipalité de Saint-Anne-des-Lacs, au Québec. La Figure 1 ci-dessous illustre la localisation du site à l'étude.

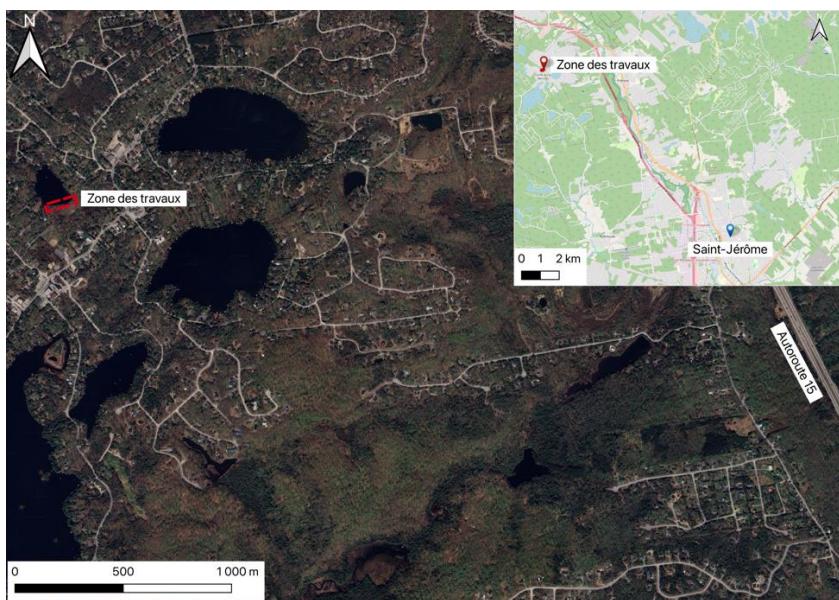


Figure 1 Localisation du site à l'étude

Les travaux de géophysiques ont consisté en la réalisation d'un profil de sismique combinée (LSP-01). Le levé en sismique combinée a été réalisé à l'aide de géophones plantés dans le sol. Ce levé a été analysé par MASW2D et sismique réfraction. Ce levé géophysique a ensuite été complété par des forages géotechniques et des analyses en laboratoire.

Des cartes de localisation du site à l'étude, du levé géophysique et des forages géotechniques effectués sont présentées à l'annexe A. L'annexe B présente les résultats des interprétations des différentes méthodes pour le levé en sismique combinée. Les rapports des forages géotechniques F-1-2024 et F-2-2024 sont présentés à l'annexe C tandis que les résultats des essais en laboratoire sont présentés à l'annexe D. Des photographies prises lors des travaux de terrain ont été regroupées à l'annexe E. L'annexe F présente un bref document décrivant les différentes méthodes géophysiques ayant été utilisées dans le cadre de cette étude. Finalement, les livrables numériques ayant été produits lors de cette expertise sont inclus à l'annexe G.

1.2 Objectif de l'étude

Selon les informations transmises, l'objectif principal de ces travaux est de caractériser la nature et les propriétés des sols et du roc en place au droit de l'ouvrage. Plus spécifiquement, il est demandé de déterminer la stratigraphie des sols ainsi que le profil du socle rocheux dans l'axe de la digue, à l'aide d'un profil géophysique en sismique combinée (MASW 2D et sismique réfraction) et de forages géotechniques.

Pour y parvenir, les objectifs spécifiques suivants sont visés :

1. Procéder au prélèvement d'échantillons de sols remaniés et de carottes de roc afin de définir les propriétés géotechniques des sols ainsi que les conditions d'eau souterraine;
2. Réaliser des analyses en laboratoire sur des échantillons représentatifs de sols prélevés lors des forages;
3. Délimiter les contacts stratigraphiques probables dans les dépôts meubles (remblais et dépôts naturels);
4. Déterminer la profondeur du socle rocheux, et;
5. Obtenir un profil continu des vitesses des ondes de cisaillement (V_s) sur les levés géophysiques réalisés.

2 Description du site

La zone d'étude correspond principalement à la digue en terre du barrage du lac Loiselle (barrage X2181546) localisé dans la municipalité de Sainte-Anne-des-Monts, au Québec. Les levés géophysiques ont été réalisés en crête de l'ouvrage. Les forages géotechniques quant à eux ont été effectués près de la rive gauche (à l'extrémité est) de l'ouvrage. Le site était accessible depuis un chemin d'accès pouvant être emprunté par le chemin des érables. La Figure 2 présente une vue satellite du site à l'étude.



Figure 2 Aperçu du barrage actuel et de la zone à l'étude

3 Équipe de projet

Le nom des participants ayant contribués à cette étude ainsi que leurs rôles et responsabilités au sein du projet sont présentés au Tableau 1.

Tableau 1 Liste des participants

Nom	Titre
Martin Blouin, ing., PhD	Directeur Technique – Ingénieur géophysique Traitement et interprétation des levés, Assurance de la qualité technique des données et du rapport
Philippe Morin, ing.	Directeur de projet – Ingénieur géologue spécialisé en géotechnique Levés sur le terrain, supervision des forages, interprétation géotechnique et géologique et préparation du rapport technique
Thomas Béraud, PhD	Chargé de projet en géophysique Traitement des données, interprétation et exportation des données
Claude Bouchard-T, tech.	Technicienne en géosciences Levés sur le terrain, supervision des forages, cartographie, préparation du rapport technique
Bastien Bollea	Assistant technique en géosciences Traitement des données, préparation du rapport technique

4 Description des travaux de caractérisation

4.1 Conditions sur le site et déroulement des travaux

Les travaux de terrain se sont déroulés les 12 et 13 février 2024. Les conditions météorologiques étaient favorables à l'acquisition des données. La qualité du rapport signal/bruit est donc bonne et permet l'interprétation de l'ensemble des données acquises.

Les forages géotechniques ont été effectués pendant la journée du 12 février 2024 et ont atteint des profondeurs de 2,57 et 5,13 m aux emplacements des forages F-1-2024 et F-2-2024, respectivement.

La Figure 3 illustre les emplacements des levés géophysiques et des forages réalisés.



Figure 3 Emplacements des levés géophysiques et des forages géotechniques réalisés

4.2 Levés par sismique combinée

Les travaux de terrain géophysiques ont consisté en la réalisation d'un levé par sismique combinée comprenant un traitement par MASW2D et par sismique réfraction. Ce levé totalise un linéaire d'environ 142 mètres.

4.2.1 Caractérisation de site par sismique combinée

Le programme d'acquisition, d'interprétation et d'intégration des données géophysiques pour la caractérisation du site a mis de l'avant deux méthodes sismiques combinées. L'approche utilisée permet de couvrir une grande superficie, de surmonter les défis posés par les environnements d'acquisition et la profondeur variable des cibles, et de valider les interprétations.

Dans ce projet, la sismique réfraction et le MASW2D sont utilisés conjointement pour positionner en XYZ les interfaces entre les changements de propriété des sols (e.g surface du socle).

4.2.2 Description de l'équipement utilisé

Tous les levés ont été réalisés à l'aide de 48 géophones plantés d'une fréquence de 4.5 Hz. Avec ce système, l'onde est provoquée par l'énergie restituée par la plaque lors de l'impact d'une masse de 12 lb (Figure 4 – gauche). Le temps d'arrivée du front d'ondes sismiques est capté par la flûte sismique (Figure 4 – droite) qui est reliée aux sismographes et à un ordinateur de terrain.

L'ordinateur de terrain est relié à deux sismographes de 24 canaux chacun (un total de 48) de type Geode de la compagnie Geometrics, ainsi qu'à la flûte sismique et la masse. Enfin, les sismographes sont alimentés par une batterie 12V (Figure 5).

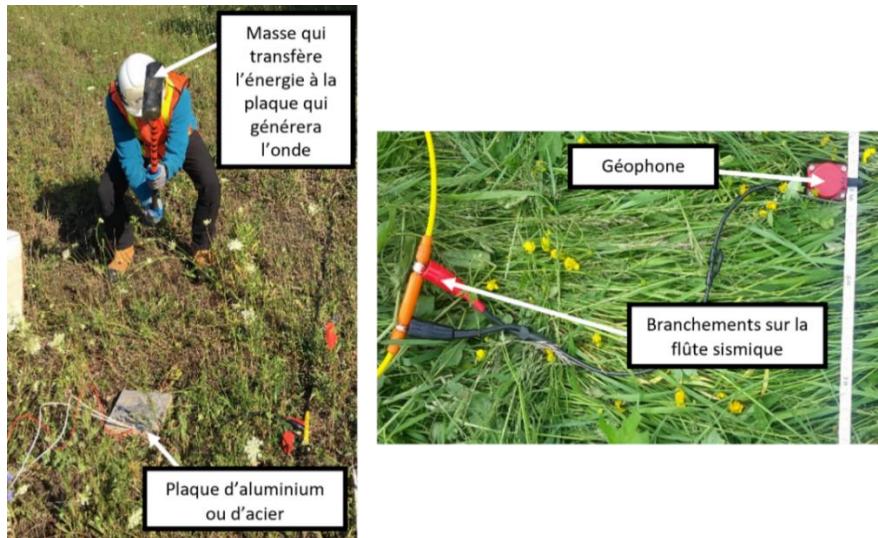


Figure 4 **Source et capteurs utilisés pour les levés sismiques**

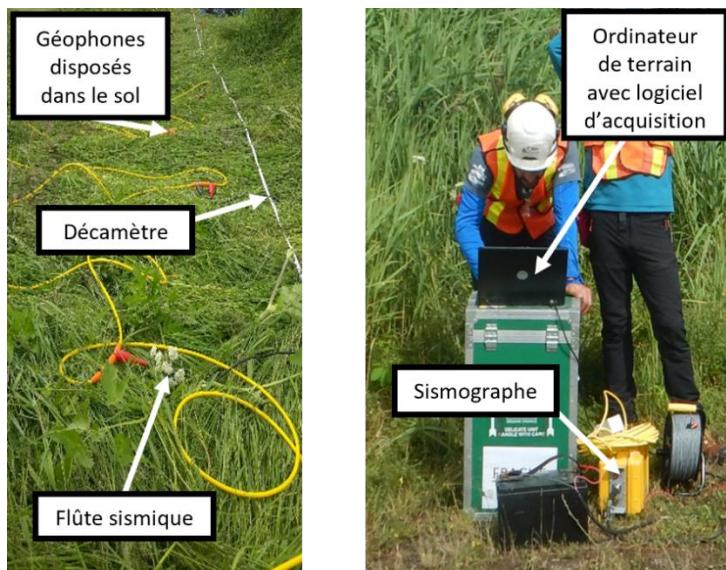


Figure 5 **Montage du levé sismique : flûte et module d'acquisition**

4.2.3 Dispositif et montage utilisés

Dans le cadre de ce projet, le profil a été effectué avec des espacements de géophones de 1,5 m. La méthode d'acquisition par *déplacement séquentiel* (« *roll-along* ») a été utilisée pour les travaux de terrain. Cette configuration consiste à réaliser une acquisition sur 48 géophones, et ensuite, déplacer une partie des géophones au bout de la ligne, pour procéder à une nouvelle acquisition. Dans ce projet, deux déplacements de 24 géophones ont été effectués.

Pour le profil, les tirs ont été réalisés à des intervalles correspondant à l'espacement entre deux géophones le long de la ligne. En fonction de l'espace disponible, des tirs additionnels par rapport au premier et au dernier géophone ont aussi été réalisés pour compléter l'acquisition des données avec des déports de 3, 6 et 9 m, pour un total de 92 tirs. Les enregistrements de chaque tir sont de 1.5 s avec un intervalle d'échantillonnage de 0.125 ms.

4.3 Investigation Géotechnique

Les travaux d'investigations géotechniques réalisés par Géostack ont consisté en l'exécution de deux forages géotechniques, nommés F-1-2024 et F-2-2024, puis à la réalisation des essais de laboratoire sur des échantillons de sols récupérés lors des forages. Une description des travaux réalisés est présentée aux sous-sections subséquentes. Les informations relatives aux forages réalisés dans le cadre de cette expertise sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2 Caractéristiques des forages réalisés

Forage	Emplacement	Position X (m)	Position Y (m)	Élevation de la surface (m)	Profondeur atteinte (m)	Élevation correspondante (m)
F-1-2024	En crête aval de l'ouvrage, au chainage approximatif de 126 m de la ligne sismique	256327.9	5080744.8	312.7	2,57	310.13
F-2-2024	Au centre de la crête de l'ouvrage, au chainage approximatif de 110 m de la ligne sismique	256312.4	5080734.7	312.3	5,13	307.17

4.3.1 Forages avec prélèvement d'échantillon

Les travaux de reconnaissance géotechnique sur le terrain ont été réalisés le 12 février 2024. Lors de ces travaux, deux (2) forages, identifiés F-1-2024 à F-2-2024, ont été exécutés par une équipe de Forage Comeau (un foreur et un aide-foreur), provenant de Notre-Dame-De-Lourdes, Québec. Les travaux ont été supervisés sur place par Claude Bouchard-Trottier, technicienne en géoscience et Philippe Morin, ingénieur en géologie et géotechnique.

Chaque forage a été réalisé à l'aide d'une foreuse à diamants de marque GT8 montée sur chenilles. Les forages ont été avancés dans les dépôts meubles par rotation et par lavage d'un train de tubages lisses de calibre NW (diamètre extérieur : 89 mm) aux emplacements des deux forages réalisés.

Un carottier fendu normalisé de calibre B (diamètre extérieur de 51 mm et longueur de 610 mm) a été utilisé pour récupérer des échantillons remaniés de sol de remblai et pour mesurer l'indice N

de l'essai de pénétration standard (SPT), selon la norme ASTM D1586. Les indices « N » mesurés sont présentés sur les rapports de forages pouvant être consultés à l'annexe C.

Le socle rocheux rencontré lors des forages a été carotté au moyen d'un carottier diamanté de calibre NQ.

Les échantillons de sols ont été placés dans des sacs de plastique, scellés à l'aide d'une attache, puis identifiés adéquatement. Des échantillons représentatifs des sols ayant été rencontrés lors des forages ont été sélectionnés et ont été soumis à des essais en laboratoire pour mieux préciser la nature des sols rencontrés.

Le trou du forage F-2-2024 a été instrumenté au moyen d'un piézomètre de type Casagrande afin de mesurer le niveau de l'eau dans le sol. À l'exception de la lentille de sable de silice ayant été laissée en place à l'élévation du Casagrande, les trous de forages ont tous été remplis par de la bentonite. Un boîtier de protection au ras du sol a également été installé à l'emplacement du forage F-2-2024.

La Figure 6 illustre l'équipement utilisé pour les travaux de forage lors de la réalisation du forage F-1-2024.



Figure 6 Forage F-1-2024, vue vers l'est (2024-02-12)

Les positions des 2 forages réalisés lors de ces travaux d'investigation sont représentées sur la carte de localisation de l'annexe A.

4.3.2 Travaux de laboratoire

À la suite de l'examen et de la description des échantillons de sols ayant été prélevés lors des forages, certains des échantillons représentatifs des sols du secteur à l'étude ont été soumis à des essais géotechniques en laboratoires. Ces analyses ont été réalisées par l'entreprise Laboratoires d'Expertises de Québec Ltée (LEQ) engagée en sous-traitance pour ces travaux de caractérisation. La description et le nombre d'essais réalisés en laboratoire ont été rapportés au Tableau 3.

Tableau 3 Liste des essais géotechniques réalisés en laboratoire

Essai	Norme Appliquée	Quantité
Analyse granulométrique par tamisage et lavage au tamis 80 µm	BNQ 2501-025	4
Sédimentométrie	BNQ 2501-025	4
Teneur en eau naturelle, w	BNQ 2501-170	4

Les résultats des essais en laboratoire sont abordés aux sections 5.1.1 et 5.1.2 de ce rapport tandis que les résultats complets de ces analyses peuvent être consultés à l'annexe D.

Les échantillons prélevés qui n'ont pas été utilisés à des fins d'analyses seront conservés dans les entrepôts de Géostack durant une période de trois mois suivant la date d'émission de ce rapport. Après cette période, ces échantillons seront détruits, à moins d'un avis contraire de la part de WSP.

4.4 Données GPS et Arpentage

Un système de géoréférencement avec base et unité mobile de type RTK a également été déployé pour les travaux de caractérisation. Cette unité permet d'obtenir une précision de l'ordre du demi-mètre en élévation et en positionnement en plan (X,Y).

5 Résultats de l'investigation géotechnique

5.1 Description des sols et du socle rocheux rencontré dans les forages géotechniques

Les forages F-1-2024 et F-2-2024 ont permis de préciser la stratigraphie des sols ainsi que la lithologie du socle rocheux se trouvant dans le secteur à l'étude. Les rapports des forages sont présentés à l'annexe C.

Le Tableau 4 présente la synthèse des sols et du roc rencontrés au droit des forages F-1-2024 et F-2-2024.

Tableau 4 Stratigraphie rencontrée au droit des forages

Forage	Stratigraphie – Profondeur (m) [Épaisseur (m)]			Socle rocheux Gneiss de mauvaise à bonne qualité
	Couche organique de surface Terre végétale brune	Remblai Silt et sable avec des traces d'argile et de gravier, lâche à compact	Dépôts naturels Silt et sable avec des traces à un peu de gravier et des traces d'argile, très lâche à compact	
F-1-2024	0,00 – 0,48 [0,48]	---	---	0,48 – 2,57 [2,09]
F-2-2024	0,00 – 0,74 [0,74]	0,74 – 1,83 [1,09]	¹ 1,83 – 3,30 [1,47]	3,30 – 5,13 [2,33]

¹ : Un horizon très lâche a été observé entre 1,83 et 2,54 m de profondeur (descente de l'échantillonner par le poids du marteau). À cet emplacement, des sols organiques saturés ont été observés entre les remblais et le début possible des dépôts naturels.

5.1.1 Remblai

Aux emplacements des deux forages, une couche organique de surface a été rencontrée à partir de la surface. Ces sols sont composés d'un mélange de terre végétale brune avec présence de racines. À l'emplacement du forage F-2-2024, des sols composés de sable silteux étaient également présent au sein de cette couche organique. Ces sols étaient lâches à compacte et humide lors des travaux de terrain.

Sous la couche organique de surface et à l'emplacement du forage F-2-2024, un remblai composé de silt et sable avec des traces d'argile et de gravier a ensuite pu être échantillonné jusqu'à environ 1,83 m de profondeur. Les sols de remblais étaient gris à brun, humides et de lâches à compacts.

Ces sols de remblai silto-sableux n'ont pas été observés au droit du forage F-1-2024 puisque que le roc se trouvait directement sous les sols organiques.

D'après les analyses granulométriques et sédimentométriques exécutées sur les échantillons CF-2 et CF-3 provenant du forage F-2-2024, ces sols seraient composés de 52 % de sable, de 39 à 41 % de silt, de 5 à 6 % d'argile et de 2 à 3 % de gravier. Les sols de remblai étaient de couleur brun à gris et humides lors de la réalisation des forages. Le Tableau 5 suivant présente les résultats des essais de laboratoire effectués sur deux (2) échantillons représentatifs des sols de remblai.

Tableau 5 Résultats des analyses en laboratoire - Remblai

Forage	Échantillon	Profondeur (m)	Granulométrie				Teneur en eau (%)
			Gravier (%)	Sable (%)	Silt (%)	Argile (%)	
F-2-2024	CF-2	0,61 à 1,22	3,1	51,5	39,9	6,4	23,1
F-2-2024	CF-3	1,22 à 1,83	2,3	52,1	40,6	5,0	23,4

5.1.2 Dépôts naturels

Sous la couche de remblai et toujours à l'emplacement du forage F-2-2024, des dépôts naturels de composition très similaire aux sols de remblais ont été rencontrés jusqu'au socle rocheux, lequel a été rencontré à 3,30 m de profondeur à cet emplacement.

Les dépôts naturels sont composés de silt et sable à sable et silt avec des traces à un peu de gravier et des traces d'argile. Ces sols étaient humides à saturés et très lâches à compacts.

Étant donné la très grande similitude de granulométrie entre les remblais et les dépôts naturels, la décision de positionner la limite entre ces 2 couches à environ 1,83 m s'est appuyée sur la baisse abrupte de la compacité dans ces sols et par le fait qu'une seconde couche organique a été rencontrée à cette profondeur. En effet, un indice N de 0 a été mesuré pour lors de l'échantillonnage des sols entre 1,83 et 2,54 m (descente par le poids du marteau).

D'après les analyses granulométriques et sédimentométriques exécutées sur les échantillons CF-4 et CF-5 provenant du forage F-2-2024, ces sols seraient composés de 42 à 46 % de sable, de 40 à 51 % de silt, de 4 à 12 % de gravier et de 2 à 3 % d'argile. Les dépôts naturels étaient de bruns et saturés lors de la réalisation des forages. Le Tableau 6 suivant présente les résultats des essais de laboratoire effectués sur deux (2) échantillons représentatifs des dépôts naturels.

Tableau 6 Résultats des analyses en laboratoire – Dépôts naturels probables

Forage	Échantillon	Profondeur (m)	Granulométrie				Teneur en eau (%)
			Gravier (%)	Sable (%)	Silt (%)	Argile (%)	
F-2-2024	CF-4	1,83 à 2,44	3,7	41,8	51,1	3,4	45,0
F-2-2024	CF-5	2,44 à 3,05	12,4	45,5	40,3	1,8	30,7

5.1.3 Socle rocheux

Les deux forages géotechniques réalisés dans le cadre de ces travaux de caractérisation ont atteint le socle rocheux. Le roc a été rencontré à partir de 0,48 m et de 3,30 m de profondeur aux emplacements des forages F-1-2024 et F-2-2024, respectivement. Selon nos observations, le roc est composé d'un gneiss gris pâle présentant une foliation à environ 75° par rapport à l'axe de la carotte. La qualité du roc est de mauvaise à bonne selon les valeurs de l'indice RQD (*Rock Quality Designation*) variant entre 39 et 78 % ayant été mesurées sur les carottes de roche.

5.2 Eau souterraine

Un piézomètre de type Casagrande a été installé à l'interface entre les dépôts naturels et le socle rocheux à l'emplacement du trou laissé par le forage F-2-2024. La profondeur de l'eau souterraine à l'intérieur de cet instrument (par rapport à la surface) a été mesurée à **1,98 m de profondeur** le 13 février 2023 à 8h10 AM.

Il est important de noter que ces observations ne sont représentatives que de la journée et de l'heure à laquelle elles ont été relevées.

6 Résultat de l'investigation géophysique

6.1 Approche préconisée

6.1.1 Caractérisation de site multi-méthode

Le programme d'acquisition, d'interprétation et d'intégration des données géophysiques pour la caractérisation du site a mis de l'avant plusieurs méthodes. L'approche utilisée permet de couvrir la superficie du site, de surmonter les défis posés par les environnements d'acquisition et la profondeur des cibles, et de valider les interprétations. L'emplacement du levé est présenté à l'Annexe A.

6.2 Le traitement des données

6.2.1 La sismique réfraction

Pour le traitement des données de sismique réfraction, l'analyse des ondes réfractées par tomographie de vitesse a été utilisée. Plus spécifiquement, la séquence de traitement inclut les étapes suivantes :

1. Pointée des temps d'arrivée (voir exemple à la Figure 7)
2. Production et inspection des dromochroniques (Figure 8)
3. Inversion des temps d'arrivée par tomographie de vitesse (voir annexe B).

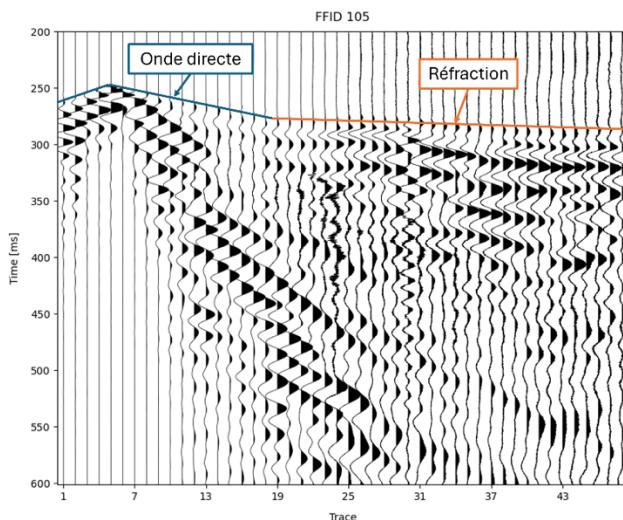


Figure 7 Exemple d'enregistrement d'un tir sismique et identification de l'onde réfractée

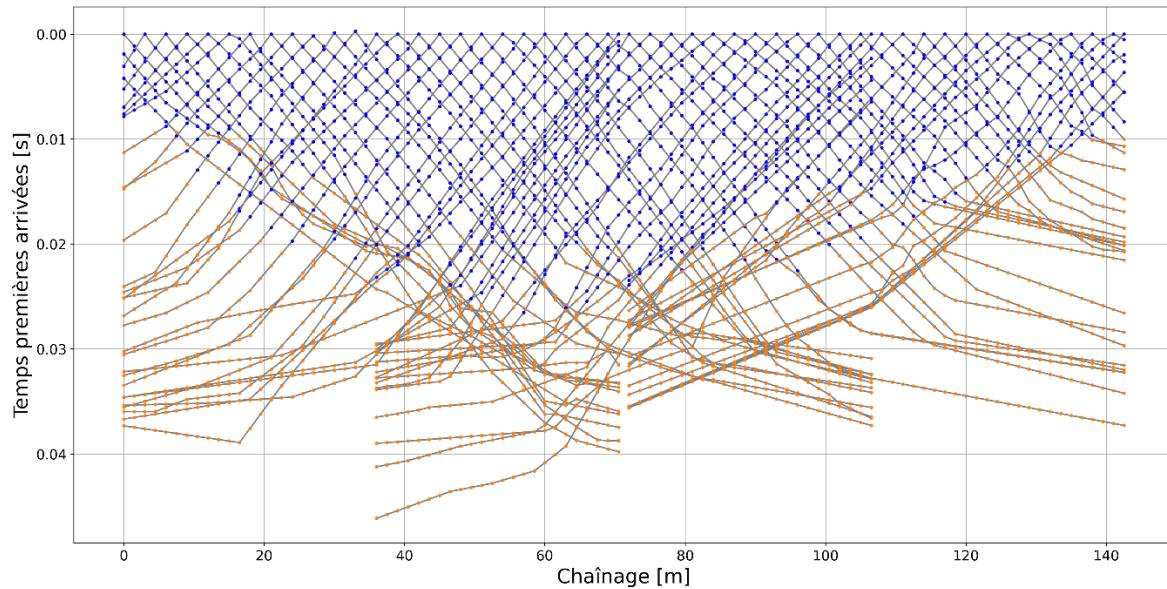


Figure 8 Dromochroniques du levé LSP-01

6.2.2 MASW 2D

L'analyse par MASW faite sur les enregistrements sismiques regroupés en points communs permet l'estimation d'un profil 2D des vitesses des ondes de cisaillement par leur analyse 1D conjointe. La transformation de ces enregistrements dans le domaine fréquentiel (F-V) a permis l'obtention des diagrammes de dispersion. Ces diagrammes sont diagnostiques de la vitesse de propagation des ondes sismiques à différentes fréquences. À partir de ces différents diagrammes de dispersion, des courbes ont pu être identifiées pour chacun des enregistrements. La Figure 9 présente un exemple de diagramme de dispersion et la Figure 10 présente l'ajustement de la courbe théorique. Enfin, la Figure 11 fournit le modèle de vitesses 1D résultant de cette analyse (inversion numérique).

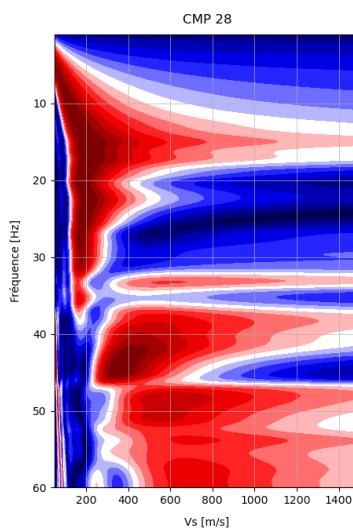


Figure 9 Exemple d'un diagramme de dispersion issu d'un enregistrement sismique

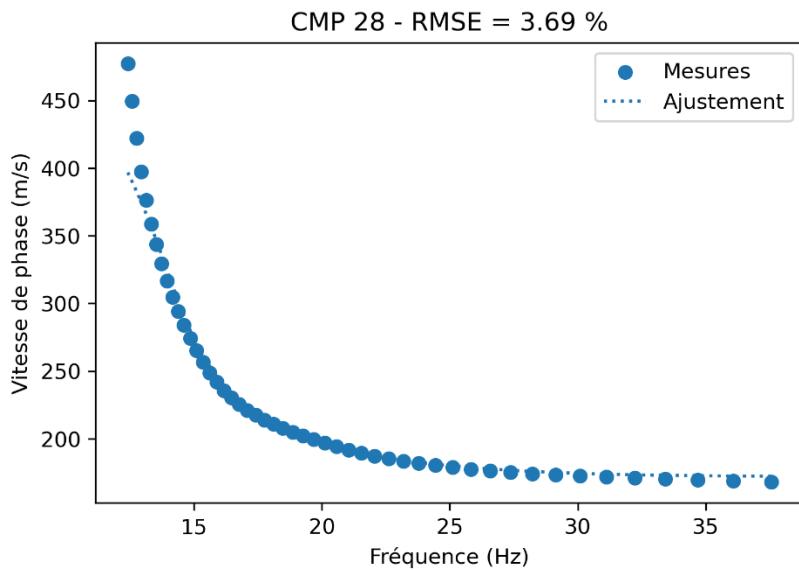


Figure 10 Ajustement de la courbe de dispersion théorique à la courbe pointée sur les données

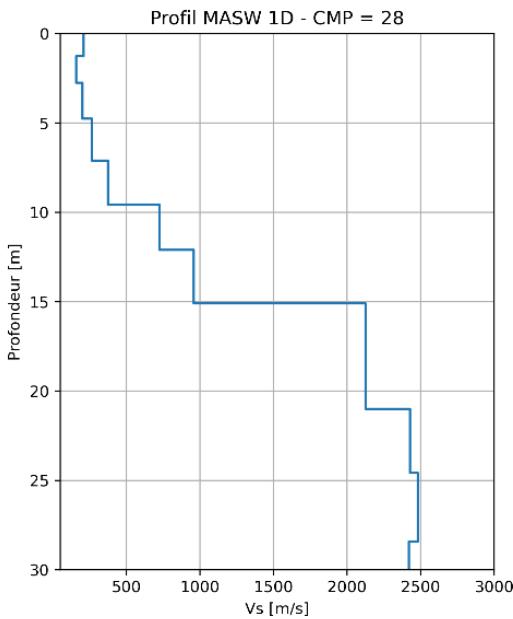


Figure 11 Modèle de vitesse résultant de l'ajustement des données mesurées

En utilisant la géométrie d'acquisition 2D, c'est-à-dire avec différentes configurations spatiales des points de tirs et des géophones, il est possible de générer plusieurs courbes de dispersion et de les analyser. En procédant à leur inversion numérique conjointe, on peut retrouver un profil de vitesse sismique tel que représenté à l'annexe B. Le grand nombre de tirs effectués entre les géophones a ainsi permis d'obtenir un profil MASW2D.

6.3 L'interprétation des données

L'interprétation de l'ensemble des données et des observations de terrain a été réalisée dans un processus itératif permettant de bonifier les interprétations d'une méthode en utilisant les résultats obtenus à l'aide d'une autre.

6.3.1 Sondage de contrôle

En complément aux différentes étapes de calcul et de traitement des données géophysiques acquises, les résultats des forages géotechniques F-1-2024 et F-2-2024 réalisés par Géostack ont été considérés et intégrés à nos résultats lors des travaux d'interprétations.

6.3.2 La sismique combinée (réfraction + MASW2D)

Étant donné la nature des dépôts ayant pu être observés en surface lors de l'investigation géophysique et en considérant la profondeur du socle rocheux, la réfraction et les ondes de surface ont été privilégiées pour l'analyse des données recueillies lors du levé par sismique combinée.

L'analyse des données par sismique réfraction a permis l'interprétation du profil de socle rocheux et un modèle 2D des vitesses des ondes de compression V_p a pu être obtenu.

Les données analysées par MASW2D ont quant à elles permis de déterminer le modèle de vitesses 2D des ondes de cisaillement (V_s). Ces données ont également été considérées dans l'interprétation du profil du roc et pour interpréter la nature des dépôts rencontrés de la surface jusqu'au roc.

Les résultats obtenus à la suite des travaux d'interprétation des données géophysiques acquises sont présentés à l'Annexe B. La section qui suit offre un aperçu et une description des différentes interprétations obtenues, ainsi qu'une appréciation de la portée de celles-ci. La section des résultats en annexe inclut :

- Section du modèle de vitesse V_p par tomographie de réfraction et interprétation du roc ;
- Section V_s haute résolution par MASW2D et interprétation du haut de la couche de terrain naturel et de zones possiblement fracturées du roc, et ;
- Section présentant les valeurs de V_s ainsi que les V_{s30} sur toute la section analysée par MASW2D.

6.4 Horizons interprétés

L'interprétation de la position des interfaces entre les différents horizons a été réalisée en utilisant l'ensemble des informations provenant de la sismique combinée et des forages. L'interface de roc a été positionnée en tenant compte de l'augmentation du gradient de vitesse V_p et de vitesses supérieures à 1750 m/s. La section de MASW2D a été considérée pour visualiser les variations

WSP Canada Inc.

Etude de caractérisation géophysique et géotechnique

Barrage X2181546, Sainte-Anne-des-Lacs, (Québec)

 geostack

Page 14

des vitesses des ondes de cisaillement obtenues dans le roc et pour identifier les différentes couches dans la portion non-consolidée (remblai probable et dépôts naturels).

Les unités ayant été identifiées dans le cadre de cette interprétation sont les suivantes :

1. **Remblai probable**

Cet horizon a été délimité en utilisant les valeurs de Vs entre 100 et 300 m/s. Les valeurs de Vp les plus faibles, soit entre 1000 et 1500 m/s sont également associées à cet horizon. Ces vitesses sont associées à un horizon non-saturé, ou faiblement saturé en eau.

2. **Dépôts naturels**

Les valeurs de Vs obtenues pour cet horizon sont majoritairement comprises entre 300 et 1100 m/s, avec quelques zones supérieures à 1100 m/s. Les valeurs entre 300 et 700 m/s sont généralement associées à la présence de sols de compacité plus élevée. Les portions plus rapides (Vs entre 700 et 1300 m/s) pourraient aussi être associées à des zones de roc plus fracturé. Les valeurs de Vp se trouvent entre 1250 et 1750 m/s, traduisant des sols non consolidés saturés en eau.

3. **Roc possiblement fracturé**

Les valeurs de Vs obtenues pour ces zones sont comprises entre 300 et 1500 m/s. Les valeurs de Vp se trouvent entre 1500 et 2250 m/s. Ces zones ont été identifiées lorsque des divergences entre les gradients de vitesses Vs et Vp existent.

4. **Socle rocheux**

L'interface du socle rocheux a été interprétée aux endroits où le gradient de vitesse Vp augmente rapidement et où les valeurs de Vs sont majoritairement supérieures à 1300 m/s. Étant donnée la limitation de détection de la méthode, des vitesses maximales Vs de 2500 m/s ont été considérées. Les vitesses Vp qui caractérisent cet horizon sont généralement supérieures à 2250 m/s et peuvent atteindre 4100 m/s.

7 Conclusion

Dans le cadre de l'étude faisant l'objet de ce rapport, des levés par sismique combinée à haute résolution ont été analysés par tomographie de réfraction et MASW2D. Ces levés ont permis de définir les variations spatiales d'horizons stratigraphiques qui pourront ainsi être utilisées pour la modélisation et la prise de décision.

De manière générale, la qualité des résultats obtenus par réfraction est bonne et permet de supporter les interprétations, cependant une limitation dans la résolution latérale est à noter due aux variations rapides de la profondeur du roc. Les résultats obtenus par MASW2D ont une résolution limitée en surface lorsque l'interface au roc est trop proche, et les résultats ont

WSP Canada Inc.

Etude de caractérisation géophysique et géotechnique

Barrage X2181546, Sainte-Anne-des-Lacs, (Québec)

 geostack

Page 15

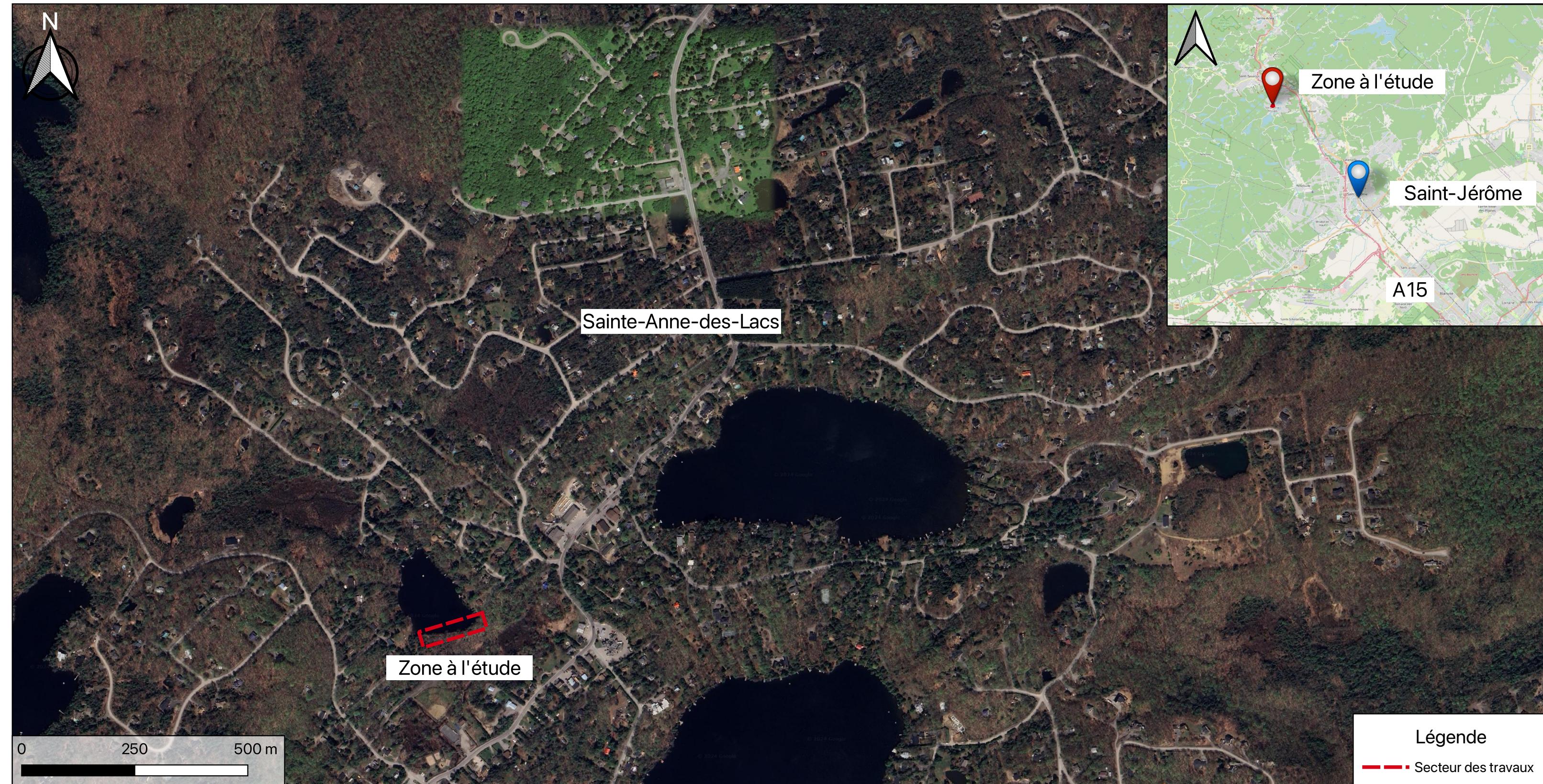
tendance à lisser les variations latérales de vitesses. L'approche multi-méthodes couplée aux forages réalisés a ainsi permis de relever les défis tant au niveau de la nature des sols que des particularités de l'environnement du site.

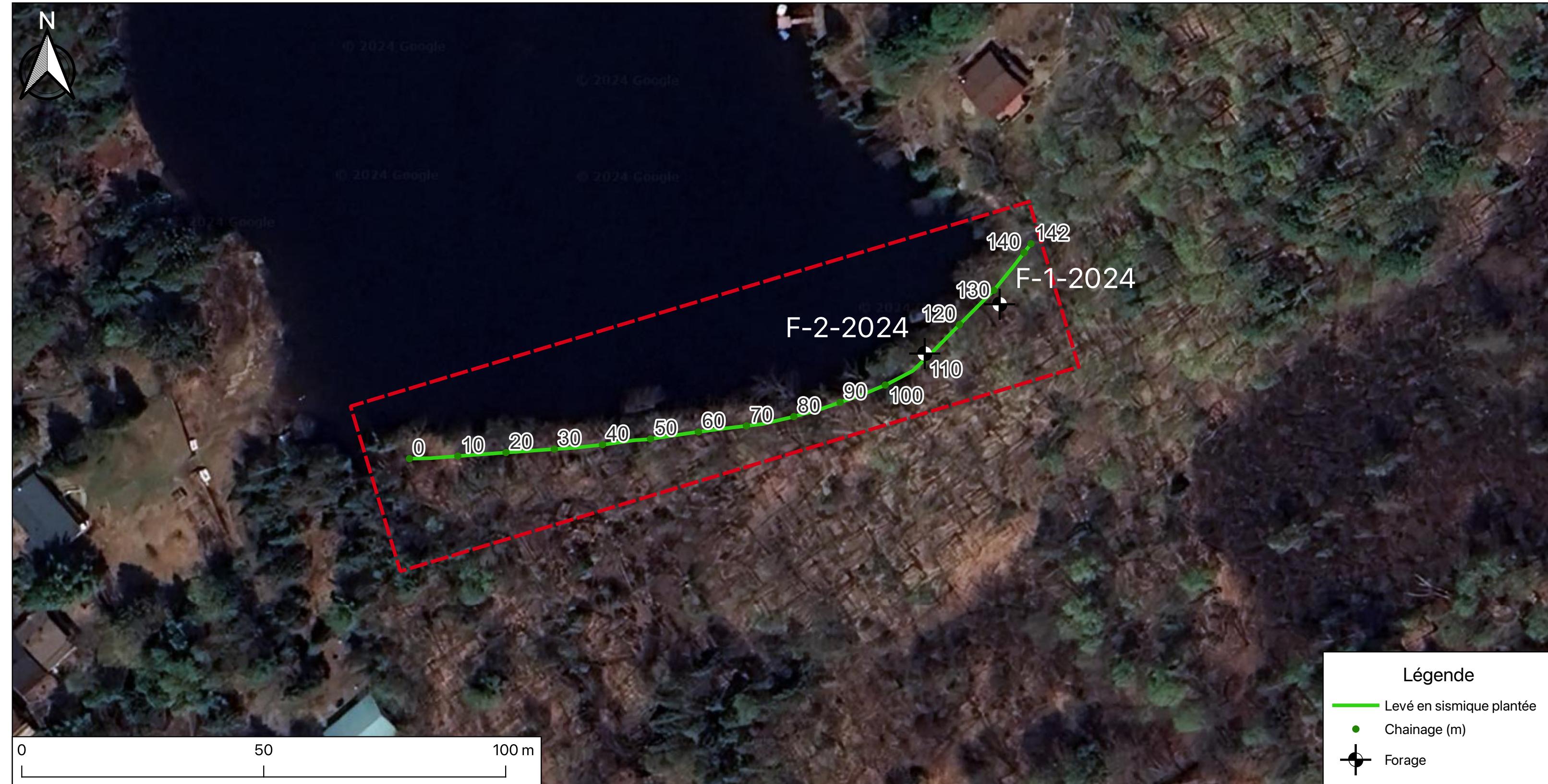
Pour l'ensemble de l'investigation, différentes observations peuvent être mises en évidence :

- Les variations de l'interface du socle rocheux sont bien définies à l'exception des chainages compris entre 25 et 43 m et 95 et 115 m. En effet, une divergence dans les résultats provenant des deux méthodes d'analyse peut être observée, traduisant potentiellement des zones de fracturation dans le roc. Bien qu'étant très près de la surface au droit du forage F-1-2024 (0,48 m), le roc atteindrait une profondeur maximale, à environ 14 m de profondeur, au niveau du chainage 50 m.
- La moyenne latérale de Vs30 le long du profil varie entre 525 m/s (entre les chainages 41 et 47 m) et 1379 m/s (entre 127 et 133 m).
- De possibles effets de bords sont présent à partir du chainage 130m, limitant la qualité de l'interprétation à ces endroits.
- Les interprétations géophysiques sont corroborées par la description des forages.
- Les forages ont quant à eux permis d'identifier la nature des sols composant la digue en terre étudiée. Selon les analyses en laboratoire réalisées, ces sols sont principalement composés de silt et de sable et renferment de faibles proportions de gravier et d'argile.
- Le socle rocheux a été carotté au droit des deux forages à partir de 0,48 m de profondeur (F-1-2024) et 3,30 m de profondeur (F-2-2024). Ce dernier a été décrit comme étant un gneiss de mauvaise à bonne qualité.

Annexe A **Cartes de localisation du site à l'étude, des levés géophysiques et des forages géotechniques**

Localisation du site à l'étude





PROJET : Caractérisation géophysique et géotechnique
 CLIENT : WSP Canada Inc.

LOCALISATION :
 Barrage du lac Loiselle (X2181546)
 Chemin des érables, Sainte-Anne-des-Lacs,
 (Québec)

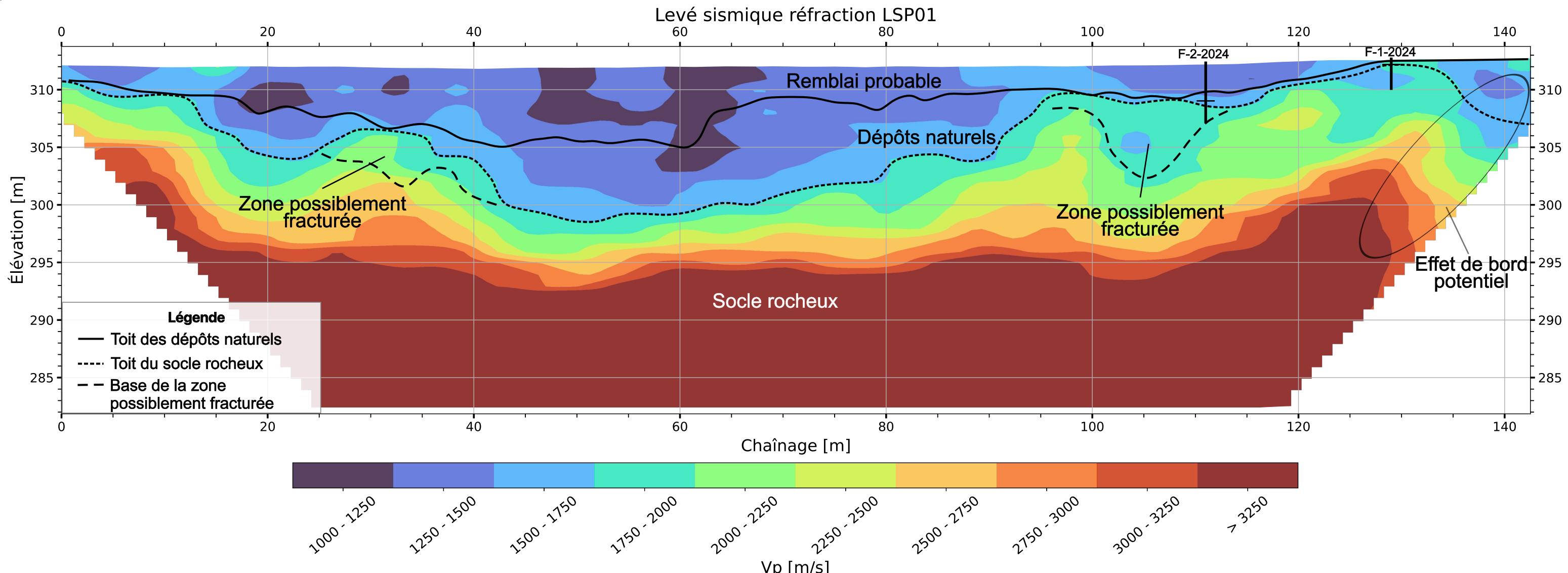
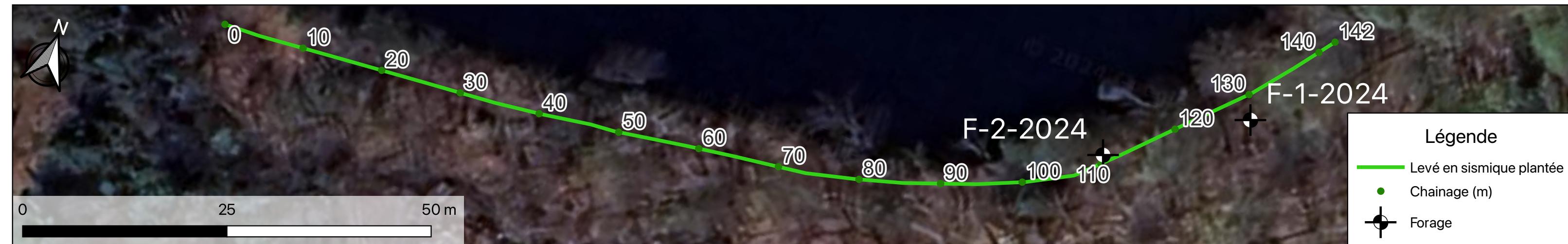
DESSINÉ PAR : Claude Bouchard-T, tech.
 Bastien Bolléa
 DATE : 2024-04-19

APPROUVÉ PAR : Philippe Morin, ing.
 DATE : 2024-04-19

ANNEXE A - PLANCHE 2
 NO PROJET : 231237
 VERSION : FINALE

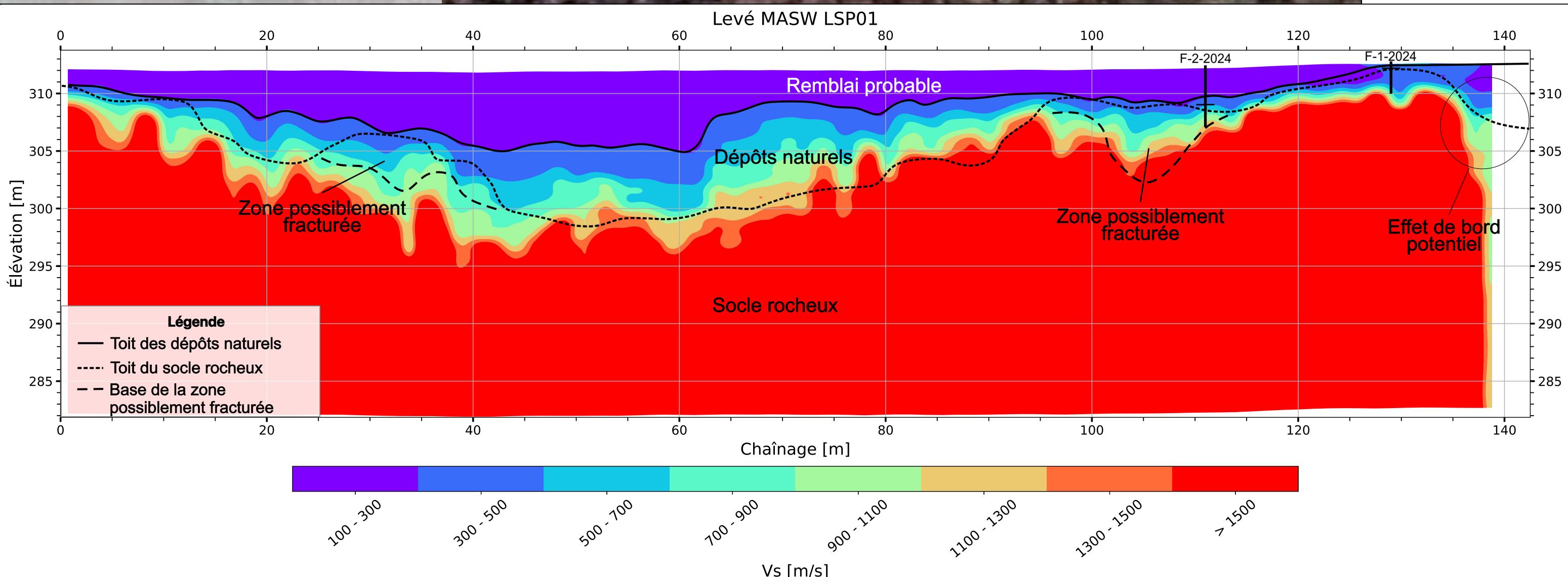
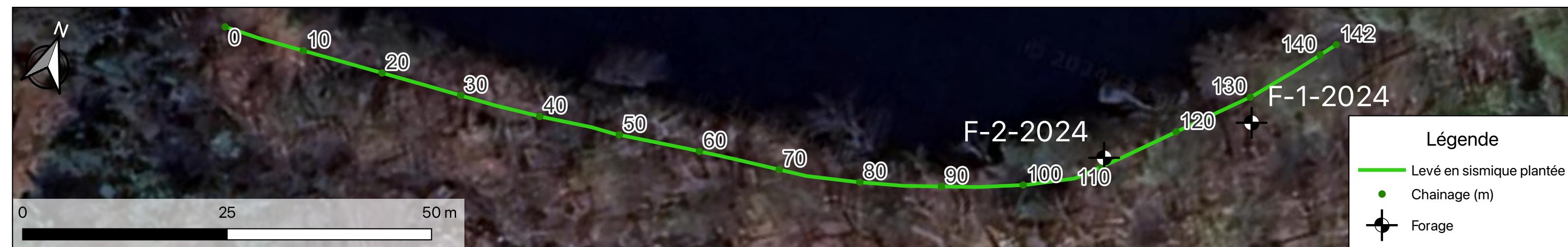
Annexe B Interprétation des levés géophysiques effectués





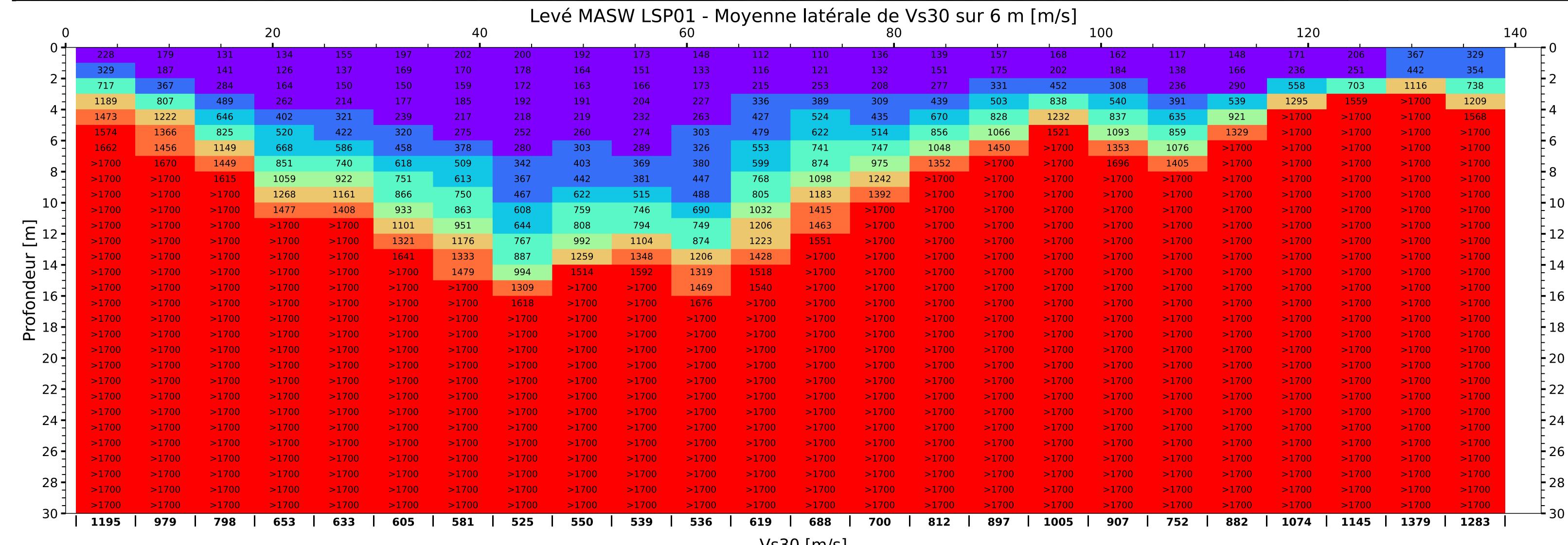
Interprétation du levé LSP-01 en MASW2D

Vue en section



Interprétation du levé LSP-01 en MASW2D avec Vs30

Vue en section



PROJET:	Caractérisation géophysique et géotechnique		LOCALISATION:	Barrage du lac Loiselle (X2181546) Chemin des érables, Sainte-Anne-des-Lacs, (Québec)	
CLIENT:	WSP Canada Inc.				

DESSINÉ PAR:	Claude Bouchard-T, tech. Bastien Bolléa	APPROUVÉ PAR:	Philippe Morin, ing.	ANNEXE B - PLANCHE 3	
DATE:	2024-04-19	DATE:	2024-04-19	NO PROJET:	231237

VERSION:
FINALE

Annexe C Rapport des forages géotechniques

Client : WSP Canada Inc.			Arpentage Est: 256327.9 m (x) Nord: 5080744.8 m (y) Élévation: 312.70 m (z)				Niveau d'eau Profondeur : N/A Date : N/A Prof. roc : 0.48 m Prof. fin : 2.57 m			Dossier : 231237 Sondage : F-1-2024 Début : 2024-02-12 Fin : 2024-02-12			
Localisation : Barrage du Lac Loiselle (X2181546), Sainte-Anne-des-Lacs, QC			Arpentage Est: 256327.9 m (x) Nord: 5080744.8 m (y) Élévation: 312.70 m (z)				Niveau d'eau Profondeur : N/A Date : N/A Prof. roc : 0.48 m Prof. fin : 2.57 m			Dossier : 231237 Sondage : F-1-2024 Début : 2024-02-12 Fin : 2024-02-12			
TYPE D'ÉCHANTILLON CF Cuillère fendue CR Échantillon par forage au diamant EM Manuel TA Tarière TE Tube d'échantillonage TM Tube à paroi mince		TERMINOLOGIE "traces" 1-10% "un peu" 10-20% adjetif (...eux) 20-35% "et" 35-50%			INDICE DE QUALITÉ DU ROC % RQD <25 Très mauvais 25-50 Mauvais 50-75 Moyen 75-90 Bon 90-100 Excellent			CLASSIFICATION Argile < 0,002 mm Gravier 4,75 à 75 mm Silt 0,002 à 0,075 mm Cailloux 75 à 300 mm Sable 0,075 à 4,75 mm Blocs > 300mm					
ÉTAT DE L'ÉCHANTILLON  Remanié  Intact (tube à paroi mince)  Perdu  Forage au diamant		SYMBOLES N: Indice de pénétration standard R: Refus (N > 100) R.Q.D: Indice de la qualité du roc PM: Poids du marteau PT: Poids des tiges			COMPACITÉ Très lâche 0-4 Lâche 4-10 Compact 10-30 Dense 30-50 Très dense >50			CONSISTANCE Très molle <12 kPa Molle 12-25 kPa Ferme 25-50 kPa Raide 50-100 kPa Très raide 100-200 kPa Dure >200 kPa			RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT (Cu) <12 kPa 12-25 kPa 25-50 kPa 50-100 kPa 100-200 kPa >200 kPa		
PROFONDEUR (m) 312.70	ÉLÉVATION (m) 0.00	COUPE GÉOLOGIQUE			ÉCHANTILLONS				ESSAIS		GRAPHIQUE		
		DESCRIPTION STRATIGRAPHIQUE Niveau			SYMBOLES 				Nombres de coups par 150mm				
		Niveau COUCHE ORGANIQUE DE SURFACE Terre végétale brune, humide, jugée lâche. Présence de racines.			ÉTAT  CF-01  CR-02  CR-03				SOUS - ÉCH. NO		RÉCUPÉRATION (%) R		
		Niveau SOCLE ROCHEUX Gneiss gris pâle à rosé, foliation à environ 75 degrés par rapport à l'axe des forages, de bonne qualité.							N ou RQD				
		Niveau FIN DU FORAGE											
Remarque(s):									Méthode de forage : Rotation et lavage Équipement : GT8 sur chenilles Technicien chantier : Claude Bouchard-T. Entrepreneur : Forages Comeau				
C:\Geotec\Style\Style Geostack\Log_Forage_Geostack.sty			Crée par: Claude Bouchard-T, tech.			Vérifié par: Philippe Morin, ing.			Date : 2024-03-27			Page 1 de 1	

Client : WSP Canada Inc.			Arpentage				Niveau d'eau		Dossier : 231237	
Localisation : Barrage du Lac Loiselle (X2181546), Sainte-Anne-des-Lacs, QC			Est: 256312.4 m (x)				Profondeur : 1.98 m		Sondage : F-2-2024	
			Nord: 5080734.7 m (y)				Date : 2024-02-13 08:10		Début : 2024-02-12	
			Élévation: 312.30 m (z)				Prof. roc : 3.30 m		Fin : 2024-02-02	
TYPE D'ÉCHANTILLON CF Cuillère fendue CR Échantillon par forage au diamant EM Manuel TA Tarière TE Tube d'échantillonnage TM Tube à paroi mince		TERMINOLOGIE "traces" 1-10% "un peu" 10-20% adjetif (...eux) 20-35% "et" 35-50%			INDICE DE QUALITÉ DU ROC % RQD <25 Très mauvais 25-50 Mauvais 50-75 Moyen 75-90 Bon 90-100 Excellent		CLASSIFICATION Argile < 0,002 mm Gravier 4,75 à 75 mm Silt 0,002 à 0,075 mm Cailloux 75 à 300 mm Sable 0,075 à 4,75 mm Blocs > 300mm			
ÉTAT DE L'ÉCHANTILLON  Remanié  Intact (tube à paroi mince)  Perdu  Forage au diamant		SYMBOLES N: Indice de pénétration standard R: Refus (N > 100) R.Q.D: Indice de la qualité du roc PM: Poids du marteau PT: Poids des tiges			COMPACITÉ Très lâche 0-4 Lâche 4-10 Compact 10-30 Dense 30-50 Très dense >50		INDICE "N" 0-4 4-10 10-30 30-50 >50		CONSISTANCE Très molle <12 kPa Molle 12-25 kPa Ferme 25-50 kPa Raide 50-100 kPa Très raide 100-200 kPa Dure >200 kPa	
PROFONDEUR (m)	ÉLÉVATION (m)	COUPE GÉOLOGIQUE			ÉCHANTILLONS			Nombres de coups par 150mm	ESSAIS	GRAPHIQUE
		DESCRIPTION STRATIGRAPHIQUE	SYMBOLES	NIVEAUX D'EAU INSTALLATION	ÉTAT	TYPE D'ÉCH. NO	SOUS - ÉCH.			
312.30	Niveau									
0.00	COUCHE ORGANIQUE DE SURFACE Terre végétale brune et sable silteux, compacte, humide. Présence de racines			CF-01		100	24	13-16-8-4		
311.56	REMBLAI Silt et sable, traces d'argile et gravier, gris, lâche, humide			CF-02		100	8	3-3-5-5	Ag, w, Sed	
0.74	Devenant brun et compact			CF-03		100	17	7-10-7-7	Ag, w, Sed	
1				CF-04		67	0	Poids du marteau pour 24 pouces	Ag, w, Sed	
311.08	DÉPÔTS NATURELS PROBABLES Silt et sable, traces d'argile et gravier, brun, humide, très lâche. Présence de matière organique.			CF-05		63	12	0-2-10-7	Ag, w, Sed	
1.22				CF-06				20-50 / 4pouces		
2				CR-07		100				
310.47				CR-08		93	39			
1.83										
309.76										
2.54										
3										
309.00										
3.30	SOCLE ROCHEUX Gneiss gris pâle à rosé, foliation à environ 75 degrés par rapport à l'axe des forages, de mauvaise qualité									
4										
307.17										
5										
5.13	FIN DU FORAGE									
6										
Remarque(s):								Méthode de forage : Rotation et lavage Équipement : GT8 sur chenilles Technicien chantier : Claude Bouchard-T. Entrepreneur : Forages Comeau		
Créé par: Claude Bouchard-T, tech.		Vérifié par: Philippe Morin, ing.		Date : 2024-03-27		Page 1 de 1				

Annexe D Résultats des essais de laboratoires réalisés par Laboratoires d'Expertises de Québec Ltée

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE

Soumis à : GÉOSTACK

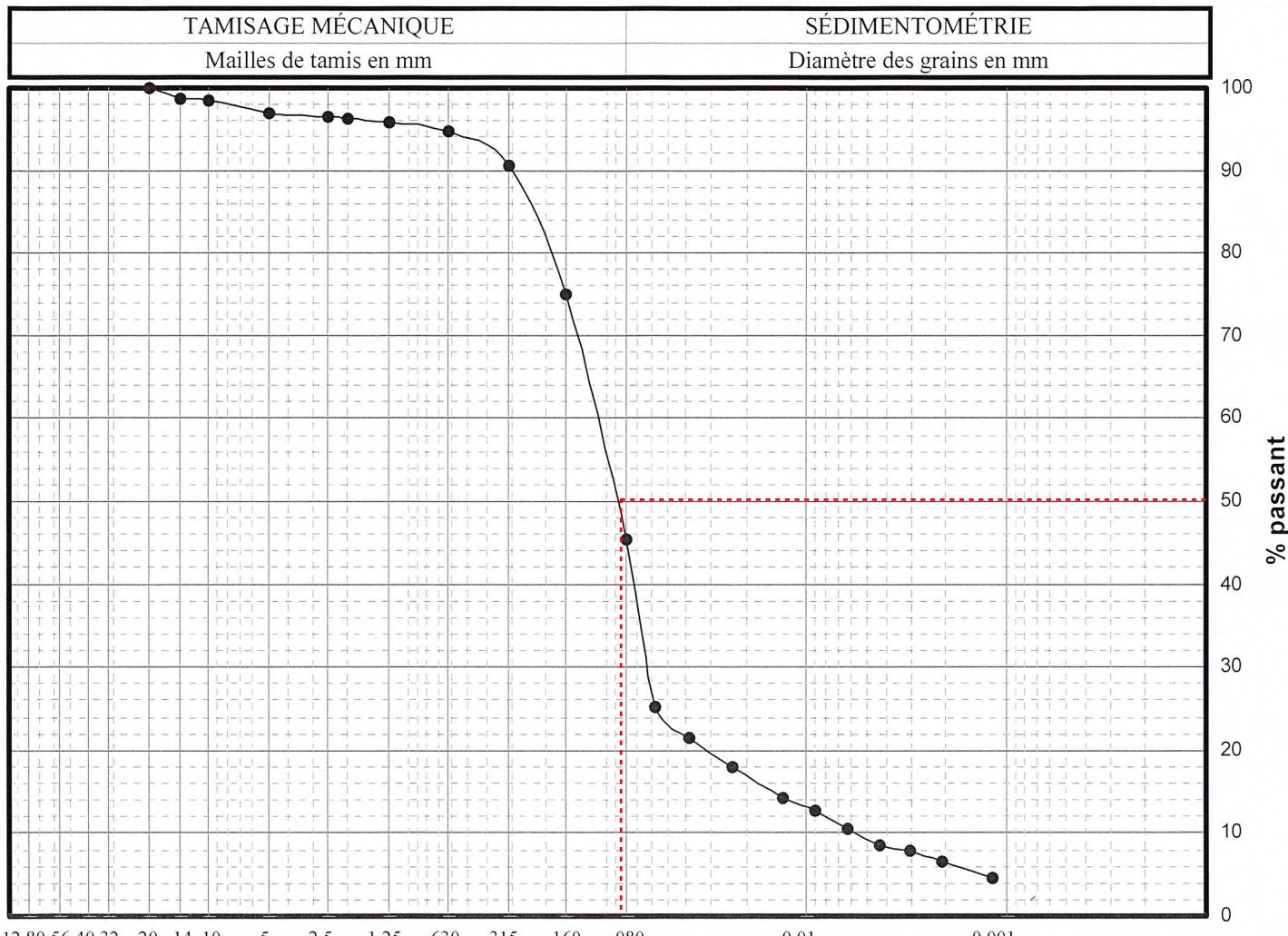
No. de projet : 8566-01

Projet : ANALYSES EN LABORATOIRE

échantillon : 8566-01-001

F-2-2024 CF-2 - 0,61 @ 1,22

PROJET-BARRAGE LAC LOISELLE-231237



112 80 56 40 32 20 14 10 5 2.5 1.25 .630 .315 .160 .080 .040 .020 .010 .001

GROS	FIN	GROS	MOYEN	FIN	SILT	ARGILE
GRAVIER			SABLE			

FORAGE ÉCHANTILLON PROFONDEUR (m) DESCRIPTION

-
- GRAV.= 3,1%
SABLE= 51,5%
SILT = 39,0%
ARGI.= 6,4%
Wc= 23,1%

Remarques

Approuvé par : Samuel Djardes

Date : 2024-03-22

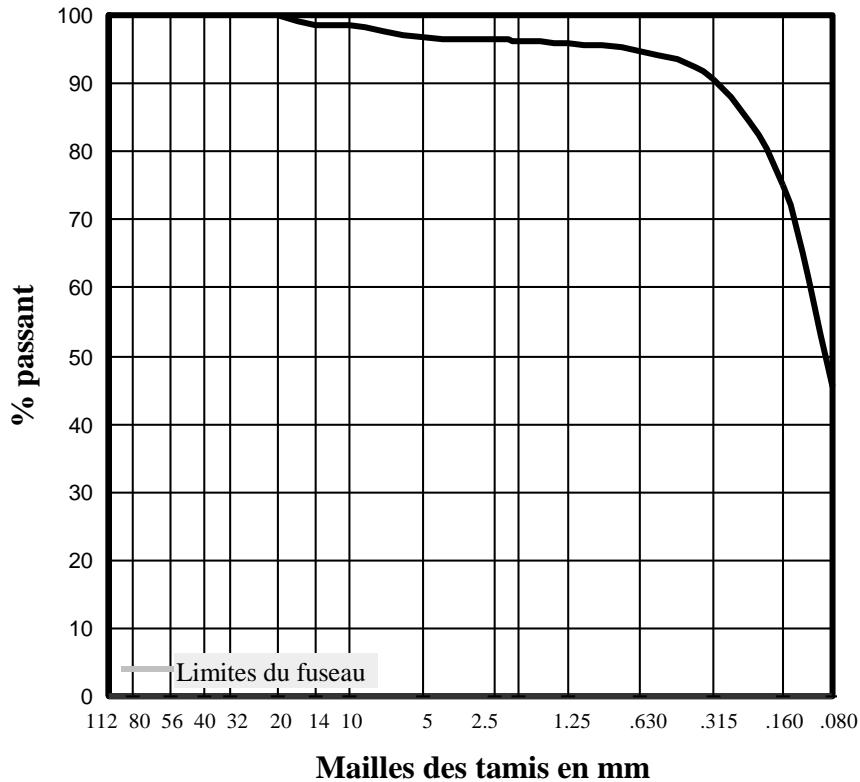


LABORATOIRES
D'EXPERTISES
de Québec ltée
Ingénierie des sols
et des matériaux
2320, De Celles
Québec (Québec)
Canada, G2C 1X8
(418) 845-0858
Télécopieur :
(418) 845-0300

ANALYSE DES SOLS ET GRANULATS

Soumis à :	GÉOSTACK	No. de projet :	8566-01
Lieu du projet :	ANALYSES EN LABORATOIRE	# échantillon :	8566-01-001
Provenance :	F-2-2024 CF-2 - 0,61 @ 1,22	Prélevé par :	CLIENT
Nature de l'éch. :		le :	2024-02-12
Localisation :		Reçu le :	2024-03-11
Usage prévu :	PROJET-BARRAGE LAC LOISELLE-231237		

Analyse granulométrique (norme LC 21-040)			
Tamis	% passant		
	Séparé	Combiné	Exigences
80 mm			
56 mm			
40 mm			
31,5 mm			
20 mm	100	100	
14 mm	63	99	
10 mm	57	98	
5 mm	15	97	
2,5 mm	4	96	
2 mm	0	96	
1,25 mm	100	96	
630 µm	98	95	
315 µm	94	91	
160 µm	78	75	
80 µm	47,1	45,4	



Essais

Teneur nat. en eau : 23,1% (LC 21-201)

Remarques :

Technicien : LB

Date : 2024-03-15

Approuvé par : Samuel Desjardins

Date : 2024-03-22

Note : Les résultats des essais ne se rapportent qu'à l'échantillon analysé.

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE

Soumis à : GÉOSTACK

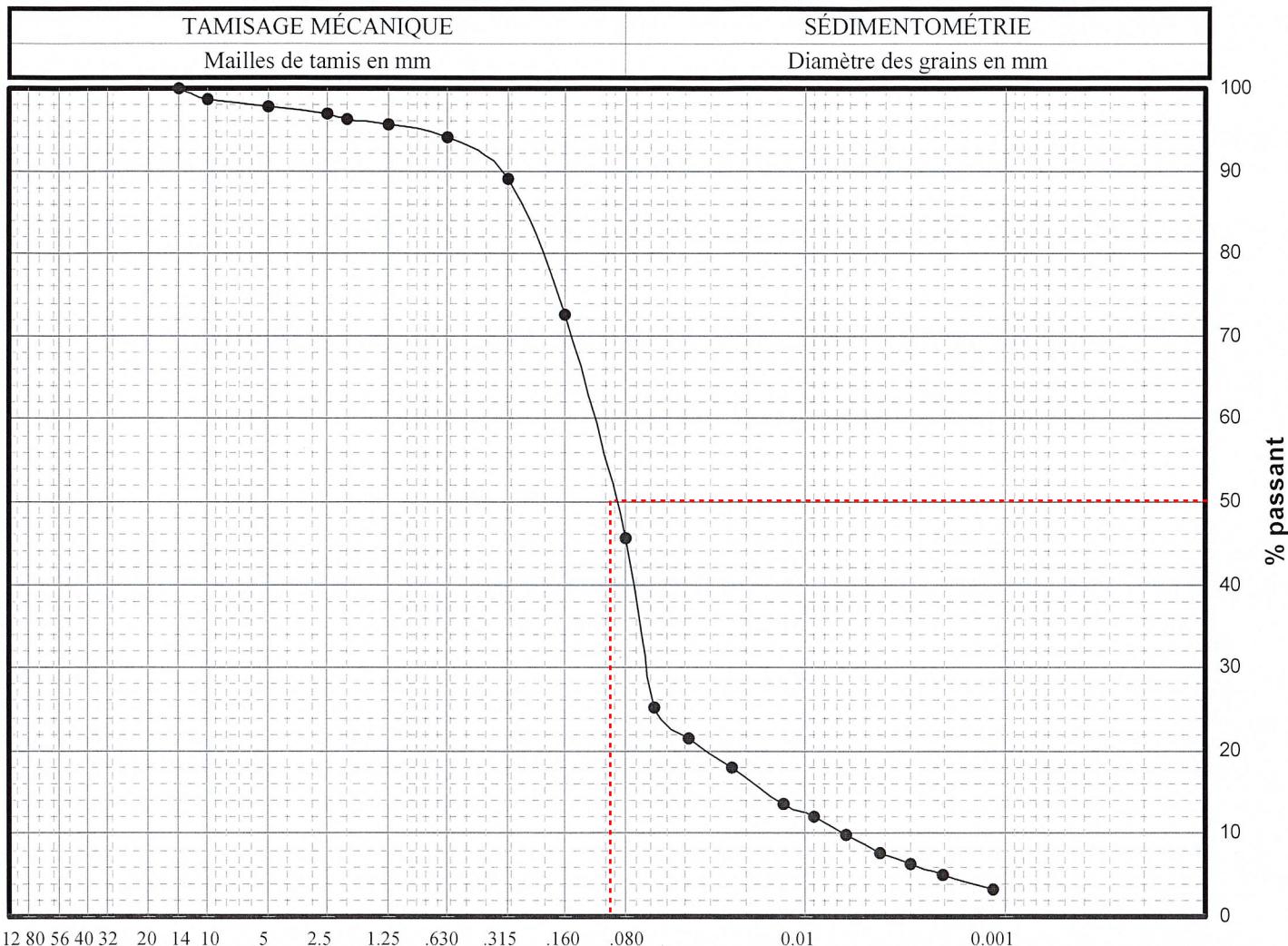
No. de projet : 8566-01

Projet : ANALYSES EN LABORATOIRE

échantillon : 8566-01-002

F-2-2024 CF-3 - 1,22 @ 1,83

PROJET-BARRAGE LAC LOISELLE-231237



GROS	FIN	GROS	MOYEN	FIN	SILT	ARGILE
GRAVIER		SABLE				
FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)			DESCRIPTION	

-
- GRAV.= 2,3%
SABLE= 52,1%
SILT = 40,6%
ARGI.= 5,0%
Wc= 23,4%

Remarques

Approuvé par : Samuel Déjardins

Note : Les résultats des essais ne se rapportent qu'à l'échantillon analysé.

Date : 2024-03-22

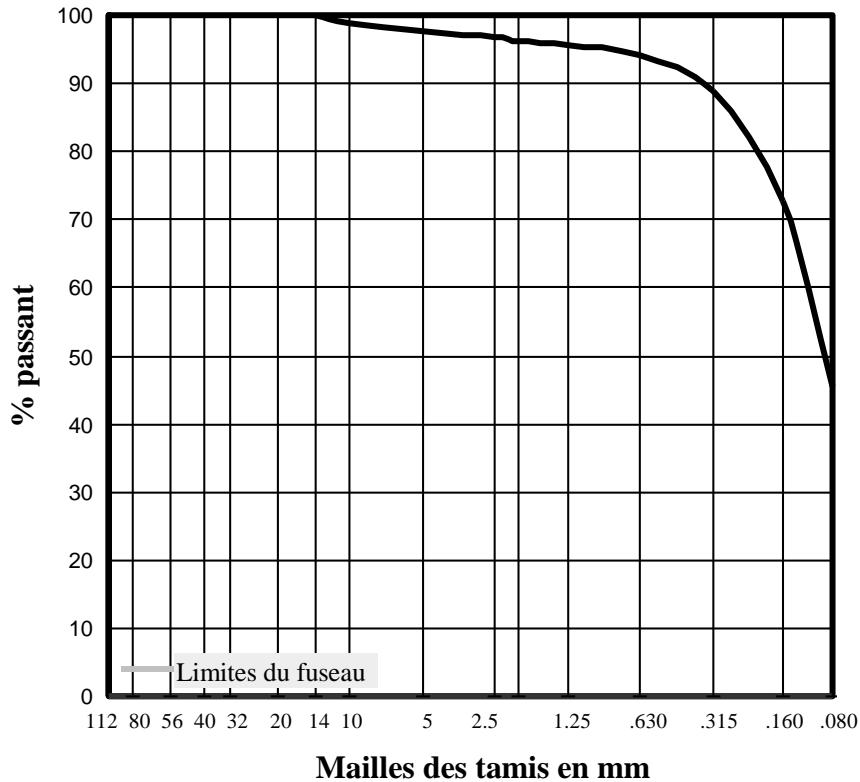


LABORATOIRES
D'EXPERTISES
de Québec ltée
Ingénierie des sols
et des matériaux
2320, De Celles
Québec (Québec)
Canada, G2C 1X8
(418) 845-0858
Télécopieur :
(418) 845-0300

ANALYSE DES SOLS ET GRANULATS

Soumis à :	GÉOSTACK	No. de projet :	8566-01
Lieu du projet :	ANALYSES EN LABORATOIRE	# échantillon :	8566-01-002
Provenance :	F-2-2024 CF-3 - 1,22 @ 1,83	Prélevé par :	CLIENT
Nature de l'éch. :		le :	2024-02-12
Localisation :		Reçu le :	2024-03-11
Usage prévu :	PROJET-BARRAGE LAC LOISELLE-231237		

Analyse granulométrique (norme LC 21-040)			
Tamis	% passant		
	Séparé	Combiné	Exigences
80 mm			
56 mm			
40 mm			
31,5 mm			
20 mm			
14 mm	100	100	
10 mm	66	99	
5 mm	40	98	
2,5 mm	15	97	
2 mm	0	96	
1,25 mm	99	96	
630 µm	98	94	
315 µm	92	89	
160 µm	76	73	
80 µm	47,4	45,6	



Essais

Teneur nat. en eau : 23,4% (LC 21-201)

Remarques :

Technicien : LB

Date : 2024-03-15

Approuvé par : Samuel Desjardins

Date : 2024-03-22

Note : Les résultats des essais ne se rapportent qu'à l'échantillon analysé.

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE

Soumis à : GÉOSTACK

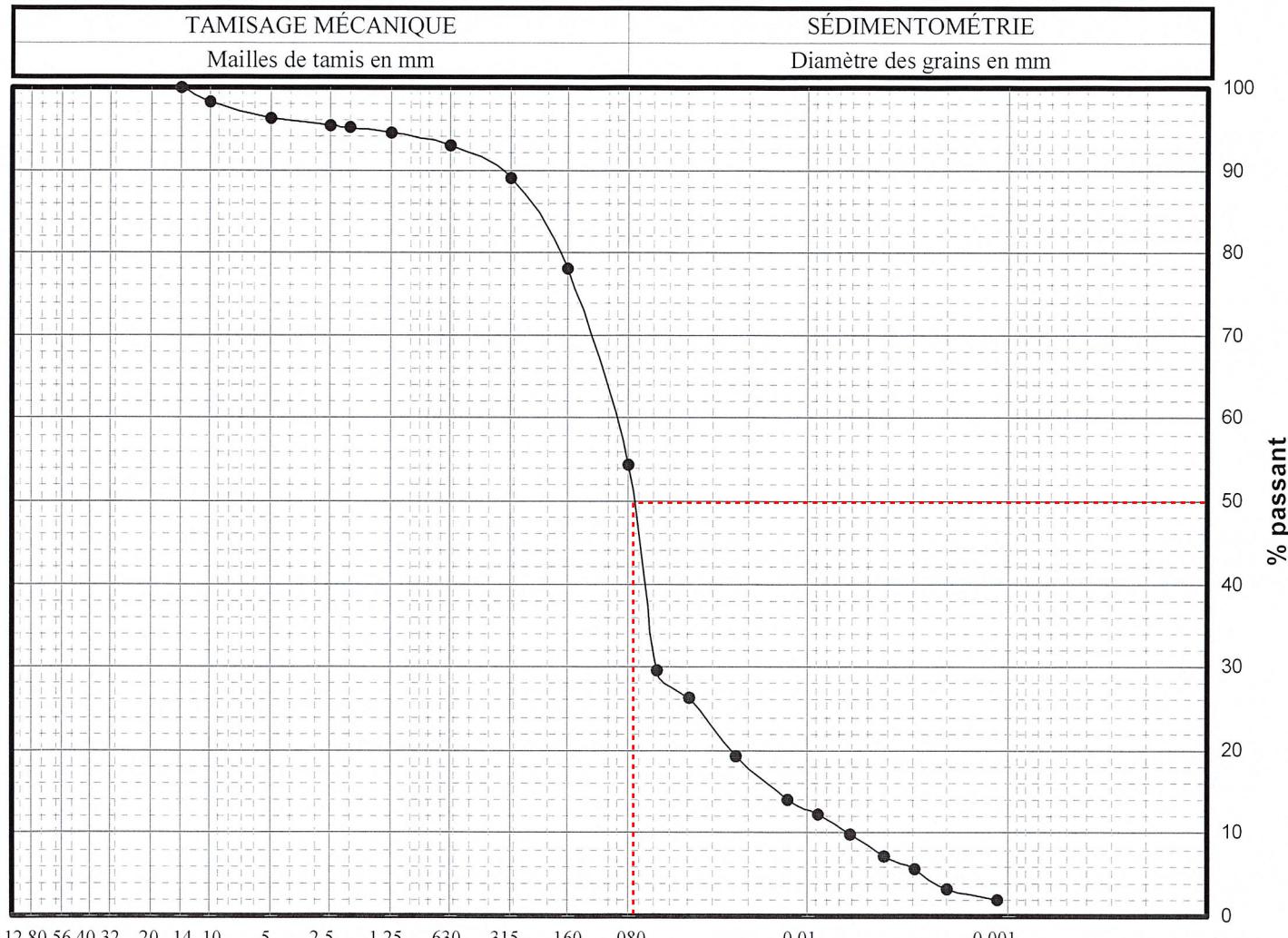
No. de projet : 8566-01

Projet : ANALYSES EN LABORATOIRE

échantillon : 8566-01-003

F-2-2024 CF-4 - 1,83 @ 2,44

PROJET-BARRAGE LAC LOISELLE-231237



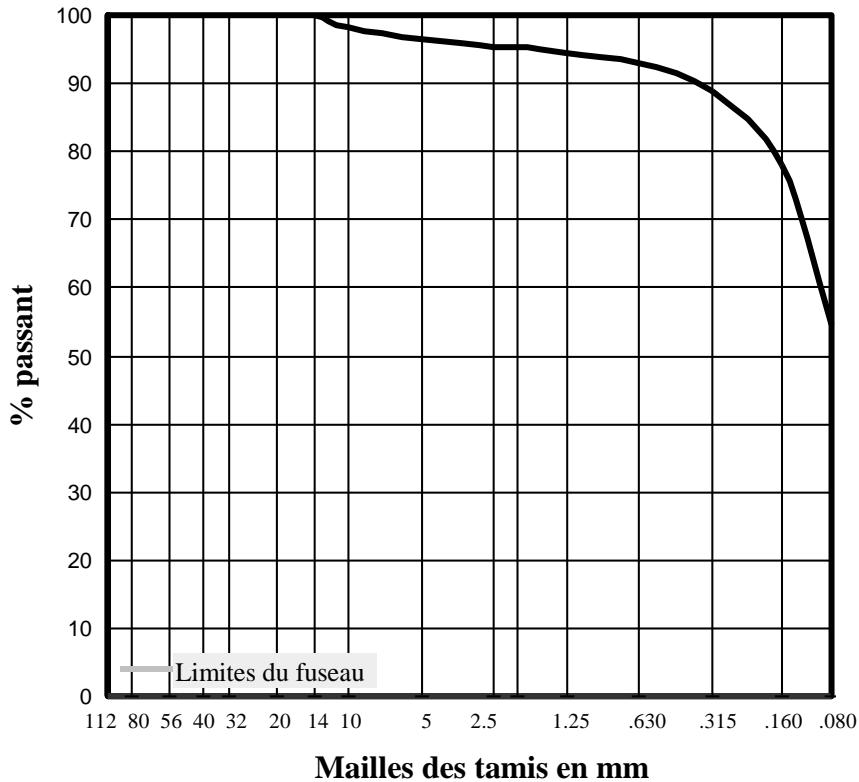


LABORATOIRES
D'EXPERTISES
de Québec ltée
Ingénierie des sols
et des matériaux
2320, De Celles
Québec (Québec)
Canada, G2C 1X8
(418) 845-0858
Télécopieur :
(418) 845-0300

ANALYSE DES SOLS ET GRANULATS

Soumis à :	GÉOSTACK	No. de projet :	8566-01
Lieu du projet :	ANALYSES EN LABORATOIRE	# échantillon :	8566-01-003
Provenance :	F-2-2024 CF-4 - 1,83 @ 2,44	Prélevé par :	CLIENT
Nature de l'éch. :		le :	2024-02-12
Localisation :		Reçu le :	2024-03-11
Usage prévu :	PROJET-BARRAGE LAC LOISELLE-231237		

Analyse granulométrique (norme LC 21-040)			
Tamis	% passant		
	Séparé	Combiné	Exigences
80 mm			
56 mm			
40 mm			
31,5 mm			
20 mm			
14 mm	100	100	
10 mm	61	98	
5 mm	23	96	
2,5 mm	2	95	
2 mm	0	95	
1,25 mm	99	95	
630 µm	98	93	
315 µm	93	89	
160 µm	82	78	
80 µm	57,2	54,5	



Essais

Teneur nat. en eau : 45,0% (LC 21-201)

Remarques :

Technicien : LB

Date : 2024-03-15

Approuvé par : Samuel Desjardins

Date : 2024-03-22

Note : Les résultats des essais ne se rapportent qu'à l'échantillon analysé.

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE

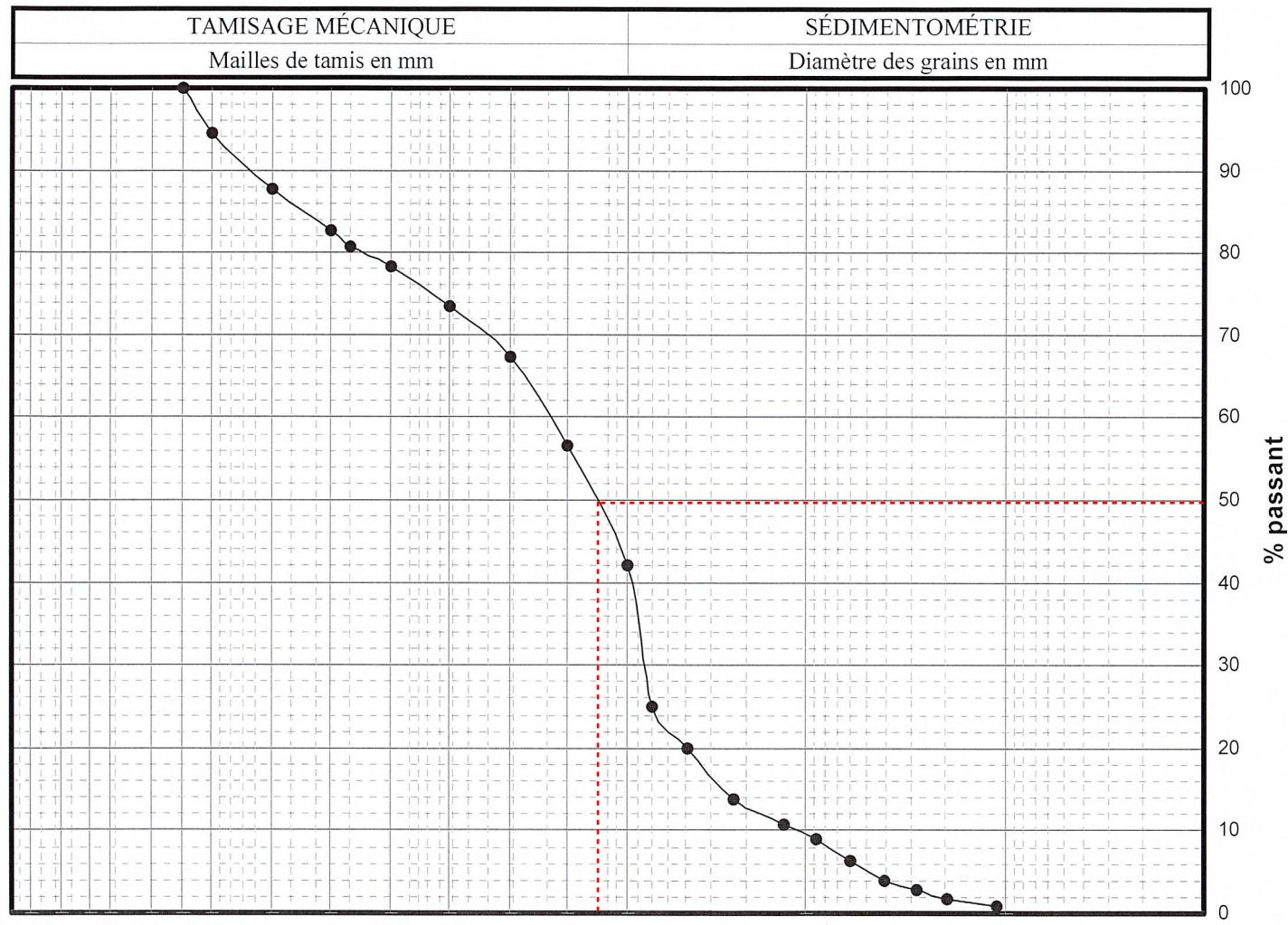
Soumis à : GÉOSTACK

No. de projet : 8566-01

Projet : ANALYSES EN LABORATOIRE
F-2-2024 CF-5 - 2,44 @ 3,05

échantillon : 8566-01-004

PROJET-BARRAGE LAC LOISELLE-231237



GROS	FIN	GROS	MOYEN	FIN	SILT	ARGILE
GRAVIER		SABLE				
FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)			DESCRIPTION	

GROS	FIN	GROS	MOYEN	FIN	SILT	ARGILE
GRAVIER		SABLE				

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE	ÉCHANTILLON	PROFONDEUR (m)	DESCRIPTION
--------	-------------	----------------	-------------

FORAGE

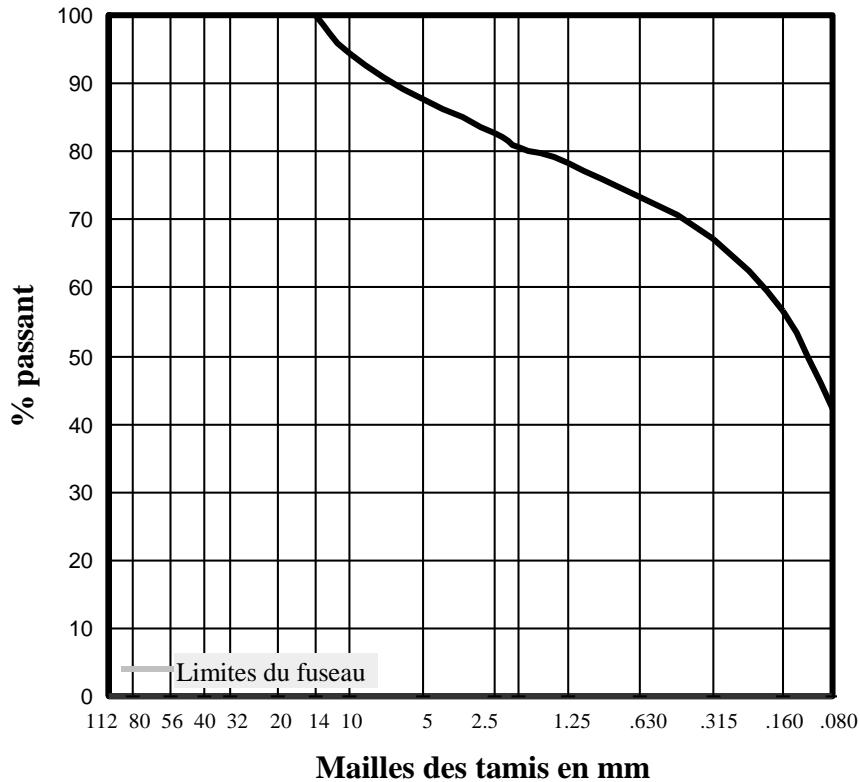


LABORATOIRES
D'EXPERTISES
de Québec ltée
Ingénierie des sols
et des matériaux
2320, De Celles
Québec (Québec)
Canada, G2C 1X8
(418) 845-0858
Télécopieur :
(418) 845-0300

ANALYSE DES SOLS ET GRANULATS

Soumis à :	GÉOSTACK	No. de projet :	8566-01
Lieu du projet :	ANALYSES EN LABORATOIRE	# échantillon :	8566-01-004
Provenance :	F-2-2024 CF-5 - 2,44 @ 3,05	Prélevé par :	CLIENT
Nature de l'éch. :		le :	2024-02-12
Localisation :		Reçu le :	2024-03-11
Usage prévu :	PROJET-BARRAGE LAC LOISELLE-231237		

Analyse granulométrique (norme LC 21-040)			
Tamis	% passant		
	Séparé	Combiné	Exigences
80 mm			
56 mm			
40 mm			
31,5 mm			
20 mm			
14 mm	100	100	
10 mm	72	95	
5 mm	36	88	
2,5 mm	11	83	
2 mm	0	81	
1,25 mm	97	78	
630 µm	91	73	
315 µm	83	67	
160 µm	70	56	
80 µm	52,3	42,2	



Essais

Teneur nat. en eau : 30,7% (LC 21-201)

Remarques :

Technicien : LB

Date : 2024-03-15

Approuvé par : Samuel Desjardins

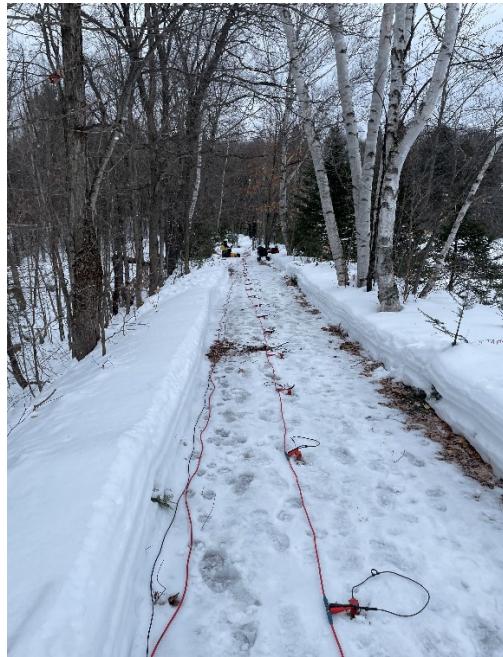
Date : 2024-03-22

Note : Les résultats des essais ne se rapportent qu'à l'échantillon analysé.

Annexe E Photographies

CARACTÉRISATION GÉOPHYSIQUE ET GÉOTECHNIQUE

Barrage du lac Loiselle (X2181546), Chemin des Érables, Sainte-Anne-des-Lacs, (Québec)

**Photo 1**

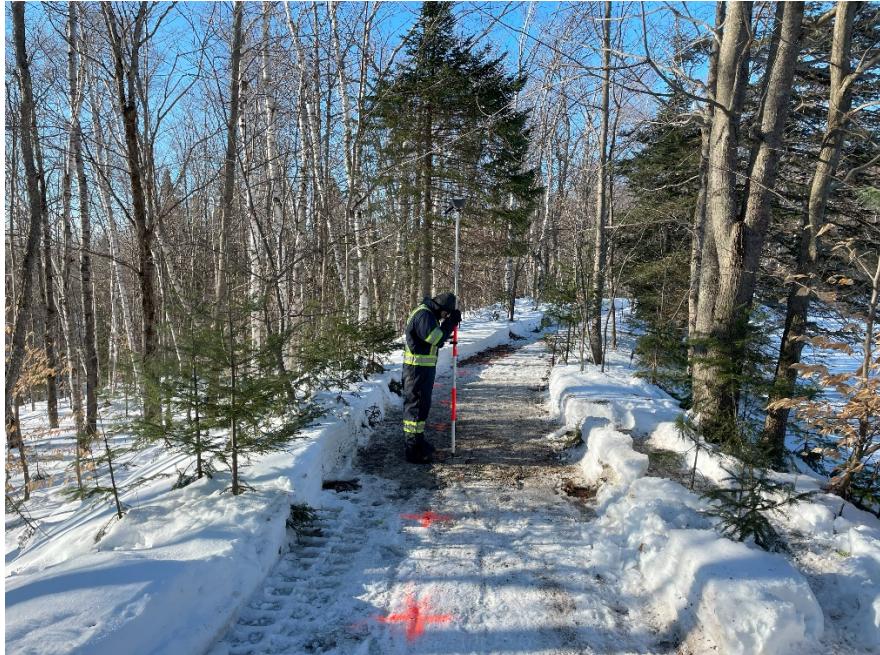
Ligne LSP-01 – vue vers l'ouest (2024-02-12)

**Photo 2**

Fin de ligne LSP-01 – Vue vers le nord-est (2024-02-12)

CARACTÉRISATION GÉOPHYSIQUE ET GÉOTECHNIQUE

Barrage du lac Loiselle (X2181546), Chemin des Érables, Sainte-Anne-des-Lacs, (Québec)

**Photo 3**

Relevé GPS du levé LSP-01 – vue vers l'est (2024-02-13)

**Photo 4**

Réalisation du forage géotechnique F-1-2024 – vue vers l'est (2024-02-12)

CARACTÉRISATION GÉOPHYSIQUE ET GÉOTECHNIQUE

Barrage du lac Loiselle (X2181546), Chemin des Érables, Sainte-Anne-des-Lacs, (Québec)

**Photo 5**

Réalisation du forage géotechnique F-2-2024 - vue vers l'ouest (2024-02-12)

**Photo 6**

Digue à l'étude - vue vers le sud-ouest (2024-02-13)

Annexe F **Principes théoriques des méthodes géophysiques déployées dans le cadre du projet**

Principes théoriques des méthodes géophysiques déployées dans le cadre du projet

L'analyse multicanaux des ondes de surface (MASW)

En raison de la présence d'une interface entre la surface du sol et l'air, des ondes de Love et de Rayleigh sont produites lors de la génération d'ondes sismiques. Ces ondes se propagent à la surface et leur comportement peut être analysé pour obtenir de l'information sur le sol en profondeur. La méthode d'analyse multicanaux des ondes de surface (MASW) permet d'estimer la vitesse des ondes de cisaillement en fonction de la profondeur par l'inversion numérique de courbes de dispersion des différents modes (modes fondamental et supérieurs selon la nature des sols).

Ainsi, en utilisant une géométrie d'acquisition 2D ou 3D, c'est-à-dire avec différentes configurations spatiales des points de tirs et des géophones, il est possible de générer plusieurs courbes de dispersion et de les analyser. En procédant à leur inversion numérique conjointe, on peut retrouver un profil de vitesse sismique tel que représenté à la figure 2.

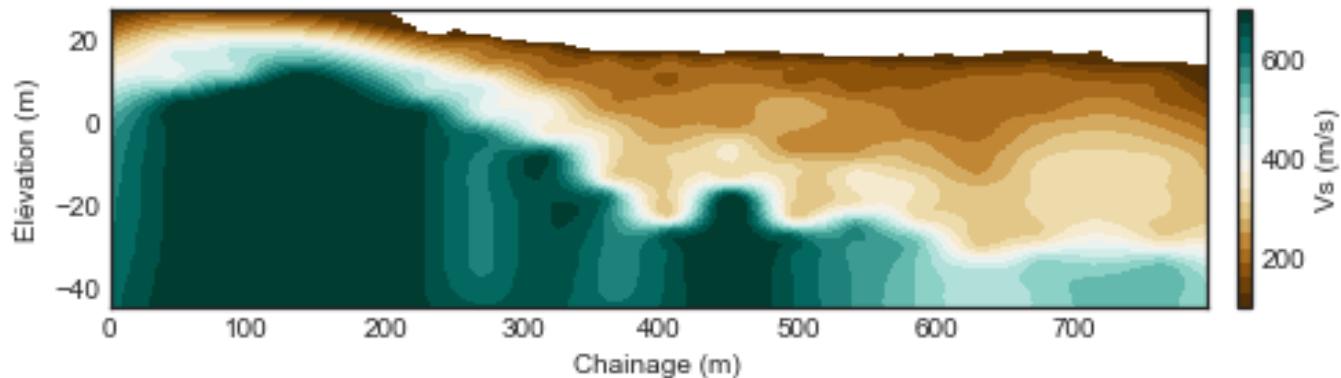


Figure 1 Exemple de résultat d'une analyse par MASW d'un levé sismique 2D

La sismique réfraction

La sismique réfraction utilise le principe de la réfraction des ondes aux interfaces des différentes couches et le principe d'onde secondaire de Huygens. Lorsque l'angle d'incidence i des ondes incidentes atteint une certaine valeur critique (nommée i_c) et d'après les lois de réfraction de Snell-Descartes, l'onde se propage le long de l'interface entre les deux milieux (Figure 2 2). On notera que la vitesse dans le milieu 1, V_1 doit être inférieure à la vitesse dans le milieu 2, V_2 .

Cette propagation de l'onde incidente sur cette interface se comporte en source secondaire qui émet de nouveau un signal.

Les géophones détectent les arrivées des ondes qui sont enregistrées sur un sismographe. Le temps de ces arrivées pourra être analysé pour en déduire les variations latérales et verticales de la vitesse de propagation des ondes sismiques (ondes de compression – P).

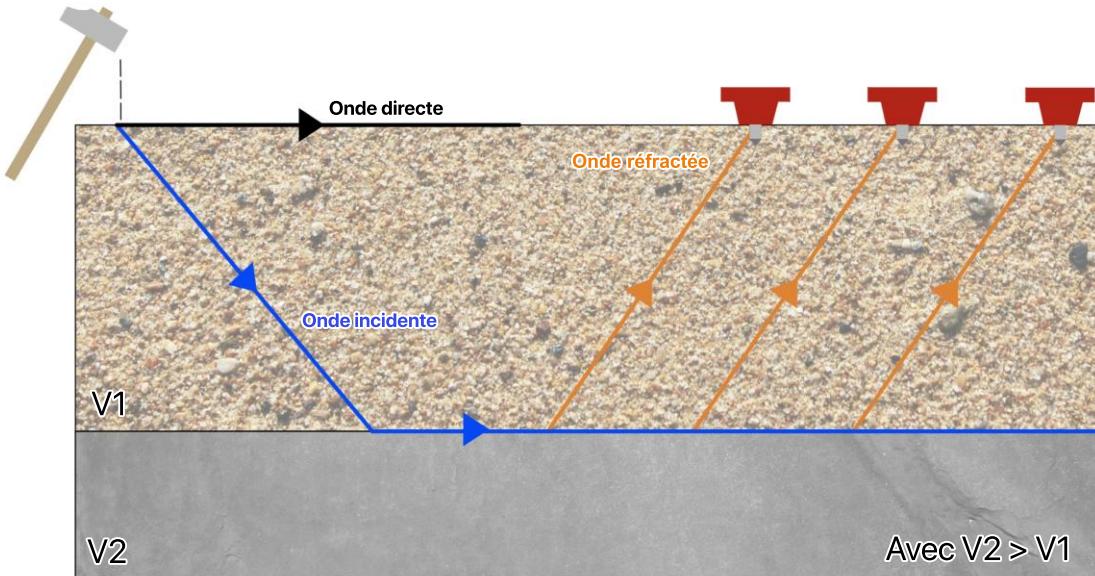


Figure 2 Schéma présentant le principe de sismique réfraction

Annexe G Livrables numériques

 geostack