

Annexe 12

Analyse de bris de digue du parc du parc du site de l'IGRM - Révision 1

RAPPORT FINAL**Analyse de bris de digue du parc du site de l'IGRM***Projet Horne 5 - Falco Ressources*

Soumettre à:

Hélène Cartier, ing.LL.B, Vice-présidente, Environnement et Développement durable

1001, avenue des Canadiens-de-Montréal

Suite 300

Montréal, Québec

H3B 2S2

Proposé par:

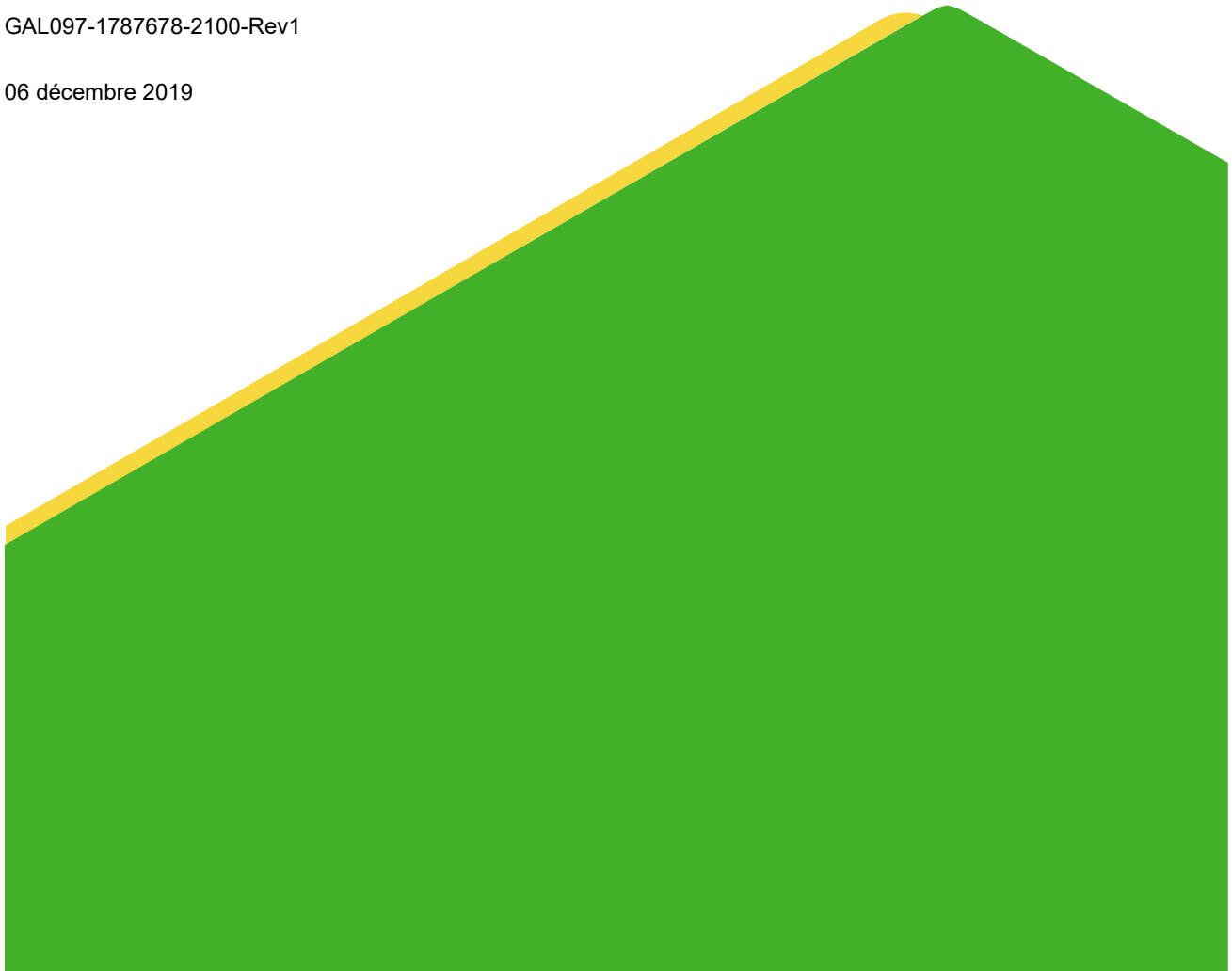
Golder Associés Ltée

7250, rue du Mile End, 3e étage, Montréal (Québec) H2R 3A4, Canada

+1 514 383 0990

GAL097-1787678-2100-Rev1

06 décembre 2019



Liste de distribution

1 copie électronique - Ressources Falco Ltée.

1 copie électronique - Golder Associés Ltée.

Table des matières

1.0	INTRODUCTION	5
2.0	CONTEXTE GÉNÉRAL DE L'ÉTUDE	6
2.1	Historique du site existant Norbec	6
2.2	Conditions actuelles du site Norbec	7
2.3	Développement proposé pour l'IGRM	8
3.0	EMPLACEMENTS DES RUPTURES ETUDIÉES	10
4.0	MÉCANISMES POTENTIELS DE RUPTURE ET SCÉNARIOS DE RUPTURE	11
4.1	Rupture de digue par débordement en crête	11
4.2	Rupture de digue par érosion interne	12
4.3	Mode de rupture sélectionné	13
4.4	Conditions hydrologiques liées à la rupture	13
4.5	SCÉNARIOS DE RUPTURE	13
5.0	CARACTÉRISATION DES RÉSIDUS	13
5.1	Granulométrie des résidus	13
5.2	Propriétés rhéologiques des résidus	14
6.0	VOLUMES SORTANTS DE RÉSIDUS - MODES D'ÉCOULEMENT	16
6.1	Estimation des volumes sortants de résidus	16
6.2	Mode d'écoulement des résidus sortants	21
7.0	MODÉLISATION DE LA PROPAGATION DES RÉSIDUS EN AVAL DES DIGUES	21
7.1	Propriétés rhéologiques des résidus sortants	21
7.2	Paramètres des brèches des ruptures étudiées	21
7.3	Hydrogrammes sortants – Analyse de sensibilité	23
7.4	Hydrogrammes sortants sélectionnés	24
7.5	Modélisation numérique de la propagation des hydrogrammes de rupture en aval des digues RFP-1 et RFP-2	25
7.5.1	Logiciel utilisé	25
7.5.2	Intrants du modèle et hypothèses	25
7.5.2.1	Données topographiques	25
7.5.2.2	Paramètres numériques	26

7.6	Résultats de modélisation et discussion	26
7.6.1	Digue RFP-1 – Scénario 1	27
7.6.2	Digue RFP-2 – Scénario 2	28
8.0	CONCLUSIONS	29
9.0	RECOMMANDATIONS	30
10.0	RÉFÉRENCES	30

TABLEAUX

Tableau 1 :	Sommaire des propriétés des digues à la phase 5	9
Tableau 2 :	Densité spécifique et granulométrie des résidus de la cellule RFP du parc à résidus.	14
Tableau 3 :	Volumes estimés des résidus sortants lors de la rupture pour les scénarios 1 et 4, selon l'approche géométrique.....	18
Tableau 4 :	Intervalle de valeurs des paramètres de brèche pour les deux scénarios étudiés	23
Tableau 5 :	Résultats de l'analyse de sensibilité des paramètres de brèches sur le débit sortant maximal.	24
Tableau 6 :	Paramètres de brèche retenus pour le calcul du débit maximal.	24
Tableau 7 :	Valeurs de rugosité selon le type de surface.	26
Tableau 8 :	Digue RFP-1 – Scénario 1 – Résultats de modélisation	27
Tableau 9 :	Digue RFP-2 – Scénario 2 – Résultats de modélisation	29

FIGURES

Figure 1 :	Localisation du site Norbec dans le bassin versant du Lac Dufault.....	7
Figure 2 :	Configuration actuelle du site Norbec	8
Figure 3 :	Configuration projetée du parc à l'étape 5 (finale) (Golder, 2017a).....	9
Figure 4 :	Chemins d'écoulements possibles à la suite d'un bris de digue du parc au site de Norbec.	11
Figure 5 :	Granulométrie des échantillons 1774165 RFP et 1774165 RCP (PCT pour RCP et PFT pour RFP).	14
Figure 6 :	Viscosité plastique (modèle de Bingham) en fonction du pourcentage solide des résidus (PCT = RCP et PFT = RFP).	15
Figure 7 :	Contrainte du seuil d'écoulement (modèle de Bingham) en fonction du pourcentage solide des résidus (PCT = RCP et PFT = RFP).....	15
Figure 8 :	Contraintes du seuil d'écoulement (Yield Stress) pour différents types de résidus (Boger et al, 2002)	16
Figure 9 :	Profil dans une surface post-rupture	17
Figure 10 :	Vérification des surfaces post-rupture avec la configuration retenue pour les autres phases 1 à 5 du développement de l'IGRM	19
Figure 11 :	Classification du régime d'écoulement selon ACB (2019 – version préliminaire).....	21

Figure 12 : Paramètres géométriques d'une brèche trapézoïdale	22
Figure 13 : Hydrogrammes sortants à la suite de la rupture des digues RFP-1 et RFP-2.....	25
Figure 14: Digue RFP-1 – Scénario 1 – Résultats de modélisation	27
Figure 15: Digue RFP-2 – Scénario 2 – Résultats de modélisation.....	28

ANNEXES

Annexe A : Géométrie des brèches et surfaces de rupture

Annexe B : Résultats de modélisation numérique

1.0 INTRODUCTION

Dans le cadre du développement du projet minier Horne 5 dans la municipalité de Rouyn-Noranda, Québec, Ressources Falco Ltée. (Falco) a mandaté Golder Associés Ltée. (Golder) afin de réaliser une étude de bris de digue pour les structures de rétention du site de l'Installation de Gestion des Résidus Miniers (IGRM) qui sera située au site Norbec. L'étude de bris de digue sera annexée à l'étude d'impact environnemental et social (ÉIES) (WSP, 2017) et répondra à certaines questions liées aux risques potentiels de l'implantation du futur parc à résidus, dans le cadre du processus d'obtention des permis requis. Le parc à résidus existant Norbec représente l'option privilégiée pour l'entreposage des résidus en surface du projet minier Horne 5 (Golder, 2017a).

L'objectif principal de la présente étude de bris de digue consiste à dresser le portrait général des conséquences sur les éléments critiques en aval du site Norbec, comme la route, la Ville de D'Alembert, le lac Dufault ou encore les lacs Waite et Duprat, en cas d'une rupture hypothétique. Ce type d'étude vise principalement à répondre à la question « qu'en est-il si jamais... » un événement de rupture d'une structure en particulier se produisait, afin de permettre une planification adéquate et réaliste de la gestion de risque. Cette étude n'aborde pas la probabilité qu'un tel événement survienne. Cette probabilité est extrêmement faible grâce à l'effort de conception et de suivi de la performance des ouvrages tout au long de leur vie utile. Ainsi, lorsque le terme « rupture » est employé dans le présent rapport, le terme fait référence à une rupture hypothétique, qui serait causée par un événement exceptionnel mais physiquement possible (dont la probabilité est non nulle).

Ce rapport décrit l'approche proposée, les paramètres pour la modélisation numérique ainsi que les résultats de l'analyse. La séquence des éléments abordés dans ce rapport est la suivante :

- Présentation du contexte général de l'étude;
- Sélection des digues où les ruptures hypothétiques se produiront;
- Identification des mécanismes potentiels de rupture;
- Élaboration des scénarios crédibles de rupture des digues;
- Caractérisation des résidus;
- Évaluation des volumes sortants;
- Détermination des hydrogrammes de rupture;
- Modélisation de la propagation des résidus à suite à la rupture des digues.

Les notes suivantes sont importantes et précisent la portée du mandat de Golder :

- La version précédente de l'étude soumise par Golder à Falco en 2018 (démarrée en 2017) se basait sur des hypothèses découlant des meilleures pratiques de l'industrie à ce moment. Les analyses de bris de digue sont des modélisations complexes dont les pratiques ont évolué au cours des deux dernières années. L'évolution est notamment due au besoin grandissant d'entreprendre ce type d'analyses comme réaction aux ruptures récentes de structures de gestion des résidus dans l'industrie minière. L'une des réflexions récentes consiste à proposer une méthodologie d'analyse basée sur l'élaboration de scénarios jugés crédibles, c'est-à-dire physiquement possibles et dont la probabilité est non nulle, et qui considère à leur juste valeur les aspects de gestion des eaux, de gestion des résidus et de géotechnique. En accord avec cette réflexion, Golder a proposé de nouveaux scénarios de rupture qui sont crédibles et qui tiennent compte des meilleures pratiques actuelles de l'industrie en matière de bris de digue.

- Au courant de l'année 2019, Golder a été mandatée par Falco pour mettre à jour le bilan d'eau opérationnel du site de l'IGRM, afin de tenir compte de plusieurs enjeux opérationnels et de qualité de l'eau et des résultats des études de caractérisation qui ont été réalisées en 2018 et 2019. Le raffinement des règles de gestion des eaux du bilan d'eau a engendré une baisse des niveaux de la crue de projet définie par la Directive 019 sur l'industrie minière (MDDELCC, 2012) qui représente un paramètre important de l'étude de bris de digue. Les niveaux de crue de projet découlant de la mise à jour du bilan d'eau font en sorte que les étangs d'eau au moment de la rupture ne sont plus touchés par les surfaces de rupture formées. Cette nouvelle configuration correspond à une rupture sans bassin d'eau, dont plusieurs cas sont reportés dans la littérature. Golder a donc entrepris une revue de littérature pour choisir la configuration de rupture la plus crédible en tenant compte des conditions du parc au moment de la rupture.
- Golder a estimé la zone inondable en cas de rupture de digues ainsi que les profondeurs et les vitesses des résidus qui se propageraient en aval des digues. L'étude des impacts d'une rupture de digues sur la qualité de l'eau des cours d'eau et des lacs en aval du parc à résidus ne fait pas partie du présent mandat, mais fera l'objet d'un mandat séparé.

2.0 CONTEXTE GÉNÉRAL DE L'ÉTUDE

2.1 Historique du site existant Norbec

Le site Norbec est situé dans une vallée, à environ 10 km au nord de Rouyn-Noranda, avec le sommet Duprat (élévation 460 m) comme le point le plus haut du site. Le site Norbec se trouve à l'intersection de deux sous-bassins versants, à savoir la rivière Duprat et le ruisseau Vauze, comme illustré à la figure 1. Les deux cours d'eau sont des tributaires du Lac Dufault.

Les opérations minières au site Norbec ont débuté en 1964, sous le nom de la mine Norbec, détenue par Falconbridge Copper Corporation, « Division Lac Dufault ». L'exploitation consistait alors en une mine souterraine et une usine de traitement de zinc et cuivre. L'exploitation de la mine souterraine a cessé en 1976 mais l'usine de traitement a continué à fonctionner en traitant les minerais des mines Millenbach (1971-1980), Corbet (1979-1986), Ansil (1989-1993) et Donald (1995), avant de fermer en 1995. Depuis 1995, aucune activité minière n'a eu lieu au site Norbec.

Lors des opérations de la mine Norbec, tous les résidus résultant du traitement des minerais ont été confinés dans les parcs à résidus du site Norbec. Au cours des 30 années d'activité, environ 10 millions de tonnes de résidus ont été générées et emmagasinées dans les deux parcs à résidus, c'est-à-dire le parc n° 1 et le parc n° 2 (figure 2). Les résidus ont été déposés en pulpe dans les parcs à résidus, en amont des digues de faible perméabilité.

À la fin des opérations en 1995, le site Norbec, alors propriété d'Inmet Mining Corporation, a subi une série de travaux de réhabilitation, y compris la démolition de tous les bâtiments, l'excavation des chemins et des routes d'accès et le renforcement de certaines digues.

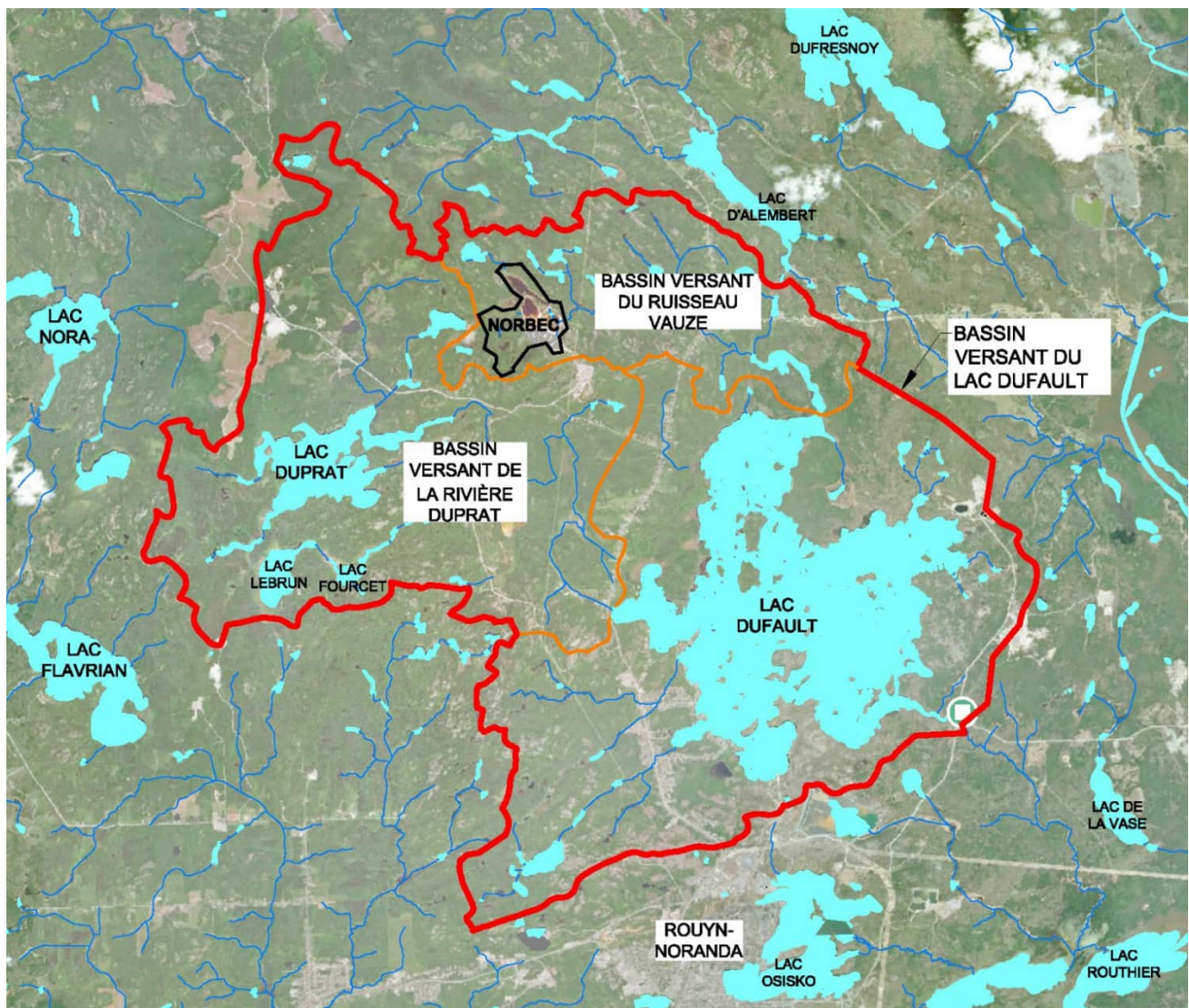


Figure 1 : Localisation du site Norbec dans le bassin versant du Lac Dufault

2.2 Conditions actuelles du site Norbec

La Mine Norbec est actuellement détenue par First Quantum Ltd. La configuration actuelle du site (figure 2) consiste en deux parcs de résidus (surfaces de résidus 1 et 2) et d'une série de bassins d'eau (bassin Duprat, bassin d'oxydation OX-1, bassin d'oxydation OX-2, bassin d'eau rouge « Red Water Pond » et le bassin de polissage). De plus, une autre aire d'entreposage des résidus de l'ancienne Mine Vauze est également présente à proximité du site Norbec à l'est du Lac Waite. Le site comporte également deux usines de traitement des eaux en exploitation, à savoir l'usine de type HDS (*High Density Sludge*) et l'usine conventionnelle de traitement de l'eau de chaux de type LDS (*Low Density Sludge*).

Les derniers travaux de réhabilitation sur le site Norbec remontent à 2016. Les infrastructures restantes sur le site comprennent les stations de pompage du bassin d'eau Duprat, la sous-station électrique, les deux usines de traitement des eaux ainsi que la station de pompage de l'effluent final.

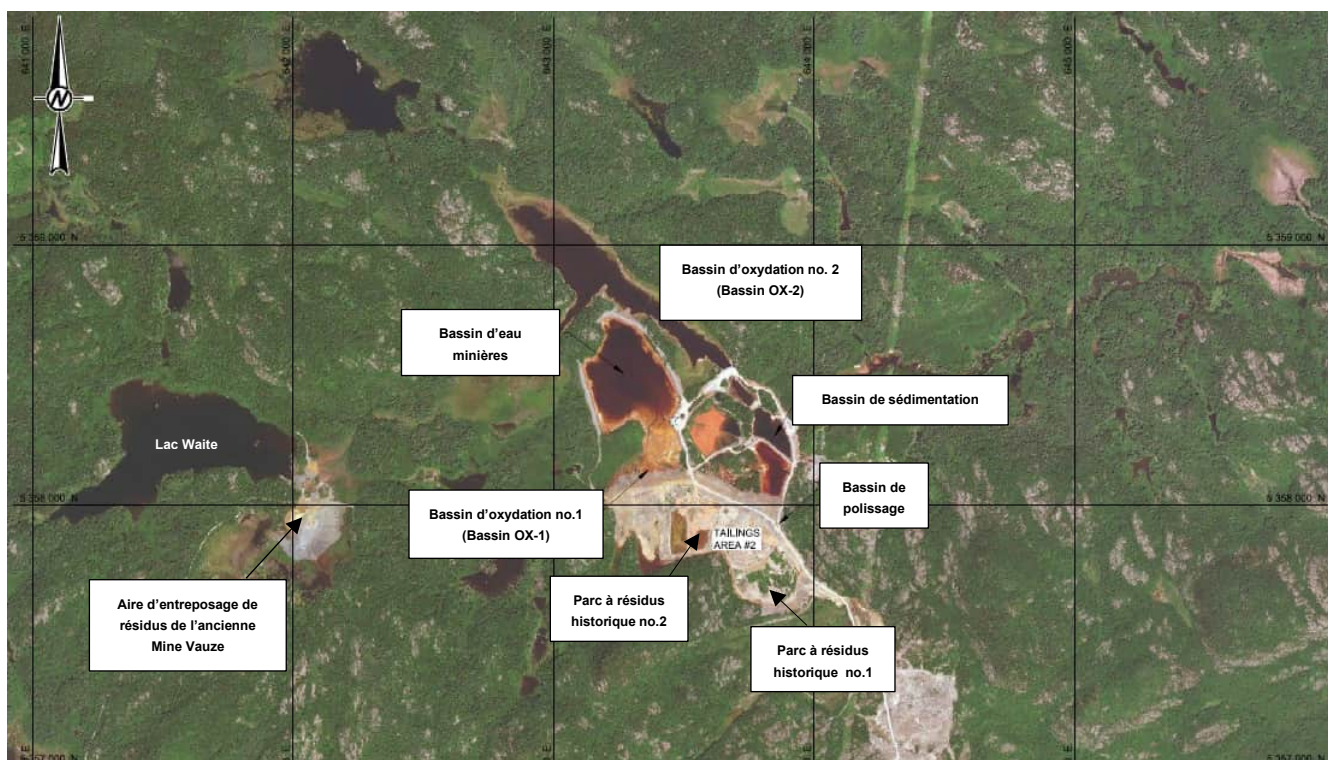


Figure 2 : Configuration actuelle du site Norbec

2.3 Développement proposé pour l'IGRM

Sur la base de l'étude de sélection de site présentée dans Golder (2017a), Falco a choisi le site Norbec pour le développement du futur parc à résidus du projet Horne 5. La figure 3 présente la configuration finale du parc (étape 5) selon la stratégie de déposition développée (Golder, 2017a). La stratégie de gestion des résidus du projet consiste à utiliser les espaces disponibles de la mine Horne 5 au cours de son développement et certaines ouvertures historiques pour l'entreposage des résidus sous terre afin de retarder et limiter le plus possible l'entreposage de résidus en surface. Le parc est composé de deux cellules dans lesquelles il est prévu de déposer des résidus de concentré de pyrite (RCP-au nord) et des résidus de flottation de pyrite (RFP-au sud) ainsi que d'un bassin d'eau (bassin interne) situé entre ces deux cellules. En conditions normales, l'eau en provenance des deux cellules RCP et RFP est dirigée vers le bassin interne par gravité au travers d'une digue perméable (digue interne) pour la cellule RFP et par pompage pour la cellule RCP. En condition de crue extrême, lorsque le bassin interne est rempli, l'eau peut être emmagasinée de façon temporaire et confinée sur la surface des résidus des deux cellules sans toucher aux structures.

Le parc à résidus projeté comprend quatre structures périphériques (RCP-A, RCP-B, RFP-1 et RFP-2) et deux digues internes pour les 10 premières années d'opérations du site des IGRM (étapes 1 à 4). Par la suite, une autre structure de rétention (RFP-3) ainsi que deux digues formant le bassin de polissage final s'ajouteront pour la dernière étape de développement du site des IGRM (étape 5). Le tableau 1 présente le sommaire des propriétés des digues à l'étape 5.

L'étude actuelle se base sur l'étape 5 de développement du parc pour l'analyse des conséquences d'un bris d'une ou de plusieurs digues. Il s'agit d'un choix prudent, car, lors de cette étape, le parc aura atteint ses dimensions finales et retiendra la totalité des résidus produits. Cette configuration conduirait potentiellement aux conséquences les plus défavorables de bris de digue.

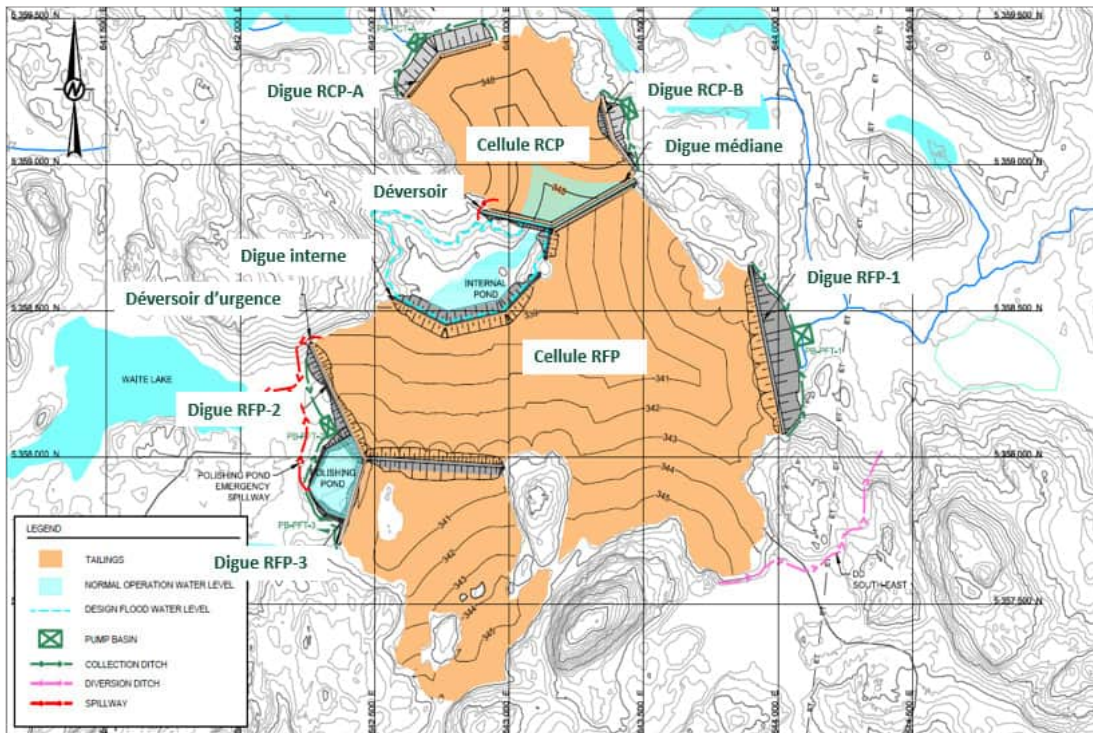


Figure 3 : Configuration projetée du parc à l'étape 5 (finale) (Golder, 2017a)

Tableau 1 : Sommaire des propriétés des digues à l'étape 5 (Golder, 2017a)

Structure	Élévation en crête (m)	Largeur en crête (m)	Pente latérale en amont xH:1V	Pente latérale en aval xH:1V	Hauteur (m)	Élévation du déversoir d'urgence (m)
RCP-A ¹	348,0	12	2	3	20,0 ⁴	-
RCP-B ¹	348,0	12	2	3	17,0 ⁴	341,0
RFP-1 ¹	344,0	12	2	3	32,0 ⁴	-
RFP-2 ¹	344,0	12	2	3	19,0 ⁴	340,5 ⁵
RFP-3 ¹	344,0	12	2	3	19,0 ⁴	-
Digue médiane ²	347,0	12	2	2	21,0 ⁴	335,3
Digue interne ³	342,0	12 (au minimum)	2	2	17,0 ⁴	-

¹ Coupe-type comprenant un matériau granulaire équipé d'un élément de faible perméabilité qui consiste en une géomembrane bitumineuse.

² Coupe-type comprenant une structure en enrochement équipée d'une tranchée sol-bentonite ou d'un système de faible perméabilité équivalent.

³ Coupe-type consistant en des matériaux granulaires perméables avec un système de couches de transition de 2 m d'épaisseur sur la pente amont de la digue interne.

⁴ Hauteur estimée à partir de la topographie au pied aval de la digue (LiDAR 2016).

⁵ Cette valeur représente l'élévation du seuil du déversoir d'urgence à l'étape 5. L'élévation du seuil en opération est de 341,0 m.

3.0 EMPLACEMENTS DES RUPTURES ETUDIÉES

La première étape dans l'élaboration des scénarios de rupture est le choix des emplacements des ruptures à étudier, soit les structures, et les endroits le long de leur empreinte, identifiés et retenus pour simuler la rupture. La localisation influence le mode de rupture (p. ex. si la brèche est proche ou éloignée du bassin d'eau), les volumes des résidus évacués par la brèche et le chemin de propagation de l'onde de rupture en aval des digues. L'approche typique pour une étude de bris de digue est de choisir les emplacements pouvant conduire aux conséquences les plus importantes.

De par leur configuration, les structures de l'IGRM possèdent des longueurs limitées, ce qui restreint les endroits où une rupture pourrait se développer. Les paragraphes suivants présentent les emplacements de ces endroits ainsi que, de manière qualitative, les conséquences de rupture associées à ces emplacements (figure 4) :

- Une rupture de la digue RCP-A pourrait propager des résidus au nord vers le lac Vauze. La topographie naturelle en aval de RCP-A est cependant orientée vers le parc, ce qui limiterait cette propagation de résidus.
- Une rupture de la digue RCP-B ou celle de la digue RFP-1 pourrait propager des résidus à l'est vers le ruisseau Vauze, qui croise la route 101 juste avant la jonction du chemin Chabot au village de d'Alembert. À l'est du croisement avec la route 101, le ruisseau Vauze s'écoule vers le lac Dufault. La digue RFP-1 retient cependant un plus grand volume de résidus que la digue RCP-B.
- Une rupture de la digue RFP-2 ou celle de la digue RFP-3 pourrait propager des résidus vers l'ouest dans le lac Waite. L'exutoire du lac Waite, le ruisseau Waite, s'écoule vers le sud, croise le rang de l'Exploration et se décharge dans le lac Duprat. L'exutoire du lac Duprat, la rivière Duprat, s'écoule vers l'est, croise le chemin des Mines et la route 101 et se décharge dans le lac Dufault. La digue RFP-2 retient un plus grand volume de résidus et sera en service plus longtemps que la digue RFP-3.

La figure 4 ci-dessous illustre l'emplacement des structures et les chemins d'écoulement identifiés.

Sur la base de ces observations, Golder a proposé d'effectuer l'étude de bris de digue pour les digues RFP-1 et RFP-2. Golder estime que la rupture hypothétique de ces deux structures mènerait aux pires conséquences physiques aux récepteurs sensibles, comparativement aux autres digues. Pour des fins de modélisation, les emplacements des brèches sur les digues RFP-1 et RFP-2 ont été sélectionnés aux endroits où la différence d'élévation entre la crête de la structure et le point inférieur de la fondation est la plus grande.

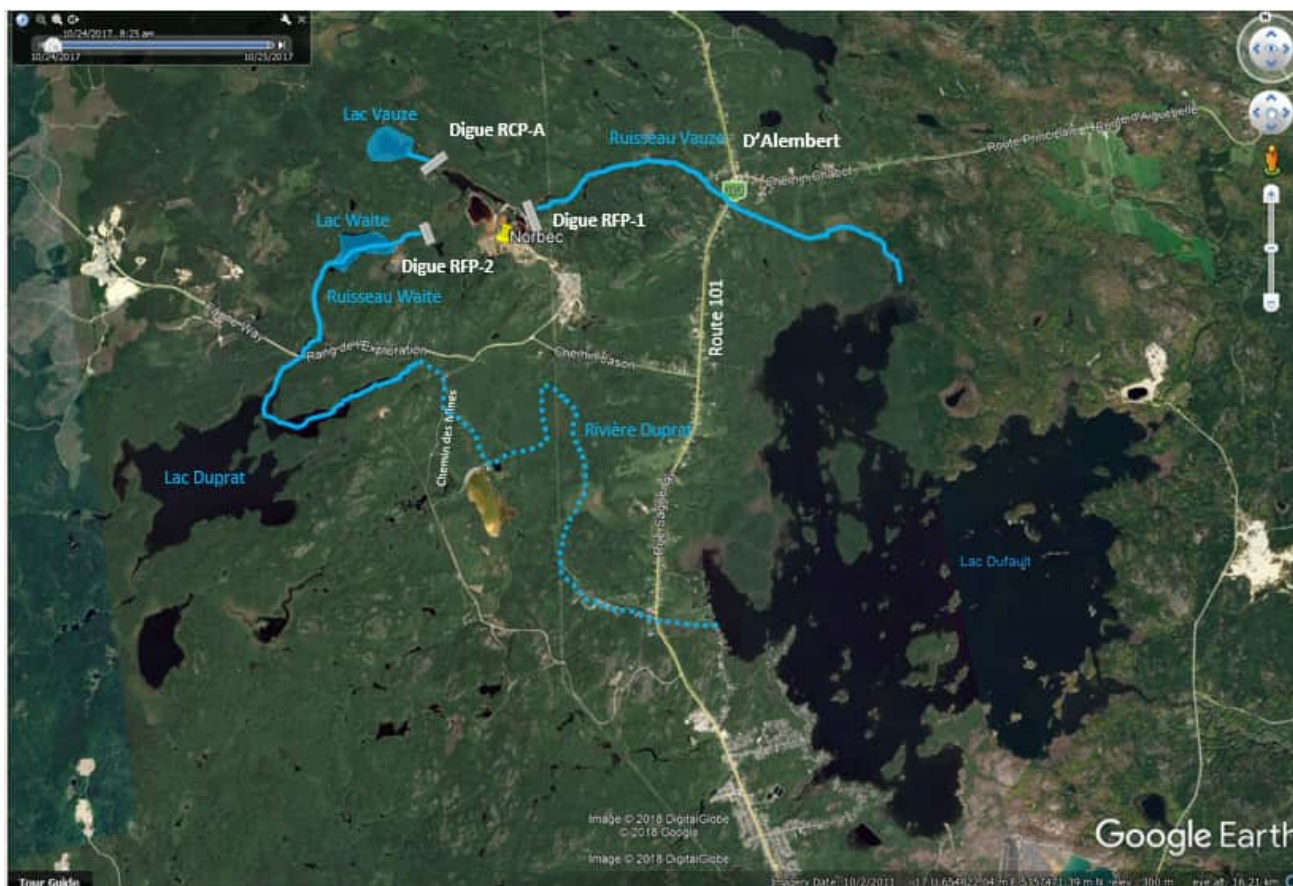


Figure 4 : Chemins d'écoulements possibles à la suite d'un bris de digue du parc au site de Norbec

4.0 MÉCANISMES POTENTIELS DE RUPTURE ET SCÉNARIOS DE RUPTURE

Les cas de rupture de digue répertoriés dans la littérature indiquent plusieurs mécanismes à l'origine de la perte de confinement des résidus. Les principales causes répertoriées sont les séismes, les glissements de terrain, le débordement en crête, l'érosion interne (phénomène de renard) ainsi que les ruptures de pente. Ces mécanismes sont typiquement associés à des conditions météorologiques dites « normales » (*sunny day conditions*), mis à part le débordement en crête qui survient typiquement sous des conditions météorologiques dites « de crue extrême » (*flood-induced conditions*) (ICOLD, 1995).

Cette section décrit le processus de réflexion qui a été suivi pour choisir un mécanisme de rupture à la fois conservateur et crédible pour l'analyse. Une probabilité d'occurrence de rupture suivant ce mécanisme n'y est pas attribuée et il est important de retenir que cette probabilité est extrêmement faible.

4.1 Rupture de digue par débordement en crête

Pour qu'un débordement en crête ait lieu, le niveau d'eau dans le parc à résidus doit monter pendant une crue extrême au-delà de la crête des digues périphériques. L'analyse de Golder montre que ce mécanisme n'est pas crédible pour la cellule RFP selon la configuration et la déposition proposées par Golder (2017a) pour l'étape 5 :

- En situation de crue, le déversoir d'urgence contrôlera l'accumulation de l'eau dans le parc. Un débordement en crête aurait lieu seulement si le déversoir est entièrement obstrué. Le déversoir prévu,

de 6 m de largeur, évacuerait une crue maximale probable avec une revanche minimale de 0,5 m par rapport à la crête de la digue (Golder, 2107a).

- À la fin de l'étape 5, la capacité d'emmagasinement en eau à l'intérieur de la cellule RFP en dessous de la crête minimale des digues est d'environ 2,6 millions de m³. Cela correspond à une lame d'eau de ruissellement d'environ 1,7 m sur la surface de la cellule RFP, ce qui équivaut à environ trois fois le ruissellement d'une année climatique moyenne (environ 640 mm, Golder, 2017a) ou presque cinq fois la hauteur d'une pluie maximale probable (PMP) de 24 heures (360 mm).
- Un scénario de rupture par débordement en crête impliquerait donc une obstruction complète du déversoir d'urgence suivie par des crues extrêmes sur plusieurs années, sans que les opérateurs de la mine n'interviennent. Golder juge que ce scénario n'est pas crédible pour un parc à résidus en exploitation.
- Un débordement peut aussi se produire par la perte de revanche due à une consolidation excessive de la fondation ou à une consolidation des matériaux de la digue. Cependant, dans le cas de l'IGRM, la conception des structures prévoit des matériaux de construction non-sensibles aux tassements et la fondation, si elle exhibe des matériaux cohérents, sera améliorée. De plus, une perte de revanche de plusieurs mètres serait nécessaire afin que l'eau puisse entrer en contact avec les structures, ce qui rend ce mode de rupture peu crédible.

Sur la base des points énumérés plus haut, le mécanisme de débordement en crête n'a pas été retenu pour l'étude de bris de digue.

4.2 Rupture de digue par érosion interne

Le mécanisme d'érosion interne consiste en la migration de particules et la formation de vides dans le corps de la structure, suivi du développement d'une instabilité des ouvrages et leur rupture par le fait même. L'érosion interne peut se produire à différents endroits dans l'ensemble d'une digue et de sa fondation, soit à travers le corps de la digue, à la jonction de la digue et de la fondation, au travers de la fondation ou encore le long d'une structure qui traverse le corps de la digue, telle qu'une conduite.

La conception des digues de rétention a été effectuée conformément aux règles de l'art en respectant des critères filtre pour toutes les transitions entre deux matériaux différents. De plus, Falco prévoit un système opérationnel de suivi du comportement des structures qui comprend des inspections géotechniques régulières. Plusieurs types d'inspection sont prévus, allant des inspections routinières journalières jusqu'aux inspections statutaires annuelles. Il s'ensuit qu'une rupture par érosion interne, érosion qui resterait non observée suffisamment longtemps pour permettre le développement d'une brèche dans la digue, est un événement à probabilité extrêmement faible. Néanmoins, pour les fins de cette étude, Golder estime que la probabilité de cet événement n'est pas strictement nulle (égale à 0) ; le scénario de rupture des digues RFP-1 et RFP-2 par érosion interne est donc jugé crédible dans le contexte précis de cette étude de bris de digue.

La pratique standard pour modéliser un bris de digue se développant par érosion interne est de simuler la rupture en conditions climatiques normales et avec des niveaux d'eau placés aux niveaux maximaux d'opération (ACB, 2014). Pour la présente étude, Golder propose de considérer le niveau d'eau dans le parc au début de la rupture à l'élévation du niveau atteint lors de l'évènement de crue de projet défini par la Directive 019 sur l'industrie minière (MDDELCC, 2012) ; cet évènement, nommé « crue de projet D019 » ou « crue D019 » dans ce rapport, est constitué de la combinaison d'une pluie de récurrence 2 000 ans et d'une durée de 24 heures, et une fonte d'un couvert de neige de récurrence 100 ans sur une période de 30 jours. Il est cependant à noter que le bassin interne est conçu pour contenir la majorité des crues pouvant survenir au parc et qu'en particulier, selon le bilan d'eau du site des IGRM (Golder, 2019b), une crue D019 générerait des débordements relativement limités sur la plage de résidus de la cellule RFP (voir section 6.1).

4.3 Mode de rupture sélectionné

Sur la base des points présentés plus haut, Golder a retenu le mode de rupture par érosion interne, qui se produirait lorsque le niveau d'eau dans la Cellule RFP est à l'élévation maximale atteinte lors d'une crue de projet D019.

4.4 Conditions hydrologiques liées à la rupture

Golder a considéré que, lors de la propagation des résidus en aval de la digue, les cours d'eau et les lacs en aval du parc à résidus sont proches des niveaux d'eau moyens. Bien que les conditions initiales considérées dans le parc au début de la rupture soient les conséquences d'une crue de projet, on considère que la rupture a lieu après la fin de la crue, lorsque le volume de la crue de projet est maximal dans le parc mais que les débits naturels d'eau en aval ont déjà dépassé la période de crue.

Les niveaux d'eau de la topographie utilisée (LIDAR) ont été considérés comme étant représentatifs des niveaux d'eau des cours d'eau en aval.

4.5 SCÉNARIOS DE RUPTURE

En résumé, les deux scénarios développés et modélisés pour l'étude de bris de digue du site de l'IGRM sont les suivants :

- **Scénario 1** : rupture de la digue de la digue RFP-1, causée par un mécanisme d'érosion interne lorsque le niveau de l'eau dans la cellule RFP correspond au niveau maximal atteint lors d'une crue de projet D019.
- **Scénario 2** : rupture de la digue de la digue RFP-2, causée par un mécanisme d'érosion interne lorsque le niveau de l'eau dans la cellule RFP correspond au niveau maximal atteint lors d'une crue de projet D019.

5.0 CARACTÉRISATION DES RÉSIDUS

Cette section aborde les propriétés des résidus, qui sont essentielles pour la modélisation des scénarios de rupture étudiés, ainsi que l'approche proposée pour déterminer les volumes de résidus sortants pour chaque scénario.

5.1 Granulométrie des résidus

La distribution granulométrique des résidus contenus dans les cellules RFP et RCP du parc à résidus est illustrée à la figure 5 (Golder, 2017b). Cette granulométrie a été obtenue avec un tamis mécanique et un analyseur de dimension des particules par diffraction laser Fritsch (selon ASTM D4464). Le tableau 2 documente la distribution des diamètres des particules des résidus RFP et RCP.

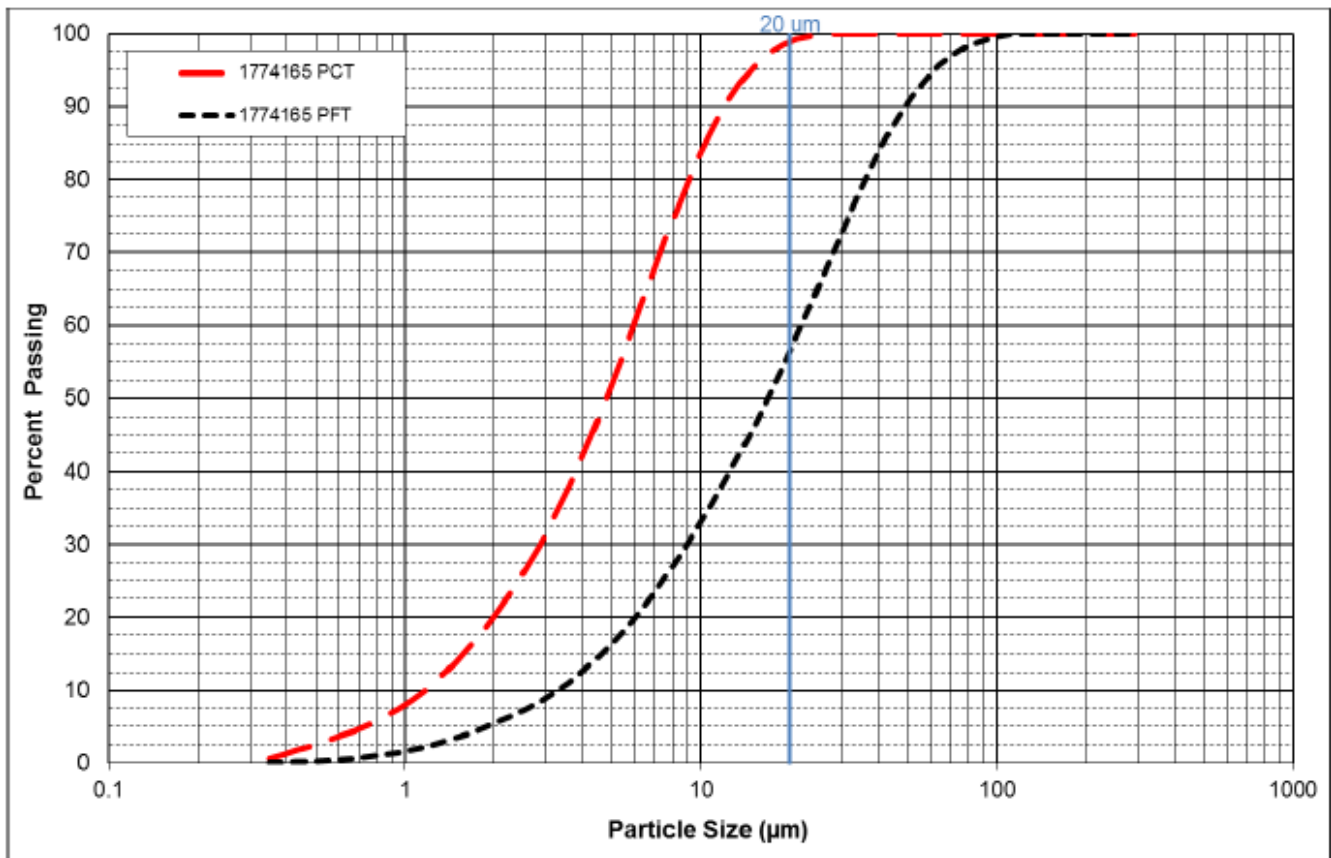


Figure 5 : Granulométrie des échantillons 1774165 RFP et 1774165 RCP (PCT pour RCP et PFT pour RFP)

Tableau 2 : Densité spécifique et granulométrie des résidus de la cellule RFP du parc à résidus

Propriété	Échantillon 1774165 RFP	Échantillon RCP
Densité spécifique	2,76	4,44
D10 (µm)	3	1
D30 (µm)	9	3
D50 (µm)	17	5
D60 (µm)	22	6
D80 (µm)	36	9

5.2 Propriétés rhéologiques des résidus

Les propriétés rhéologiques des résidus caractérisent leur potentiel d'écoulement, qui détermine l'ampleur des conséquences engendrées par la rupture. Cette section décrit les propriétés rhéologiques (viscosité et contrainte du seuil d'écoulement) des résidus, déterminées à partir des essais en laboratoire.

Des essais rhéologiques ont été effectués sur des échantillons de résidus (RCP, RFP et mélange de RCP et RFP) (Golder, 2017b). Les figures 6 et 7 illustrent les propriétés rhéologiques obtenues lors des essais, soit la viscosité et la contrainte du seuil d'écoulement pour différents pourcentages solides massiques. La viscosité plastique et le seuil d'écoulement des résidus augmentent avec l'augmentation du pourcentage solide des

résidus. Ainsi, pour les résidus RFP (100 % RFP, ligne rouge sur les figures), les essais indiquent une viscosité plastique obtenue avec le modèle de Bingham entre 0 et 1,35 Pa S avec un pourcentage solide (en poids) allant de 55 % à 72 %. Les valeurs des contraintes du seuil d'écoulement (*Yield Stress*) varient de 0 et 340 Pa pour un pourcentage solide (en poids) allant de 55 % à 72 %.

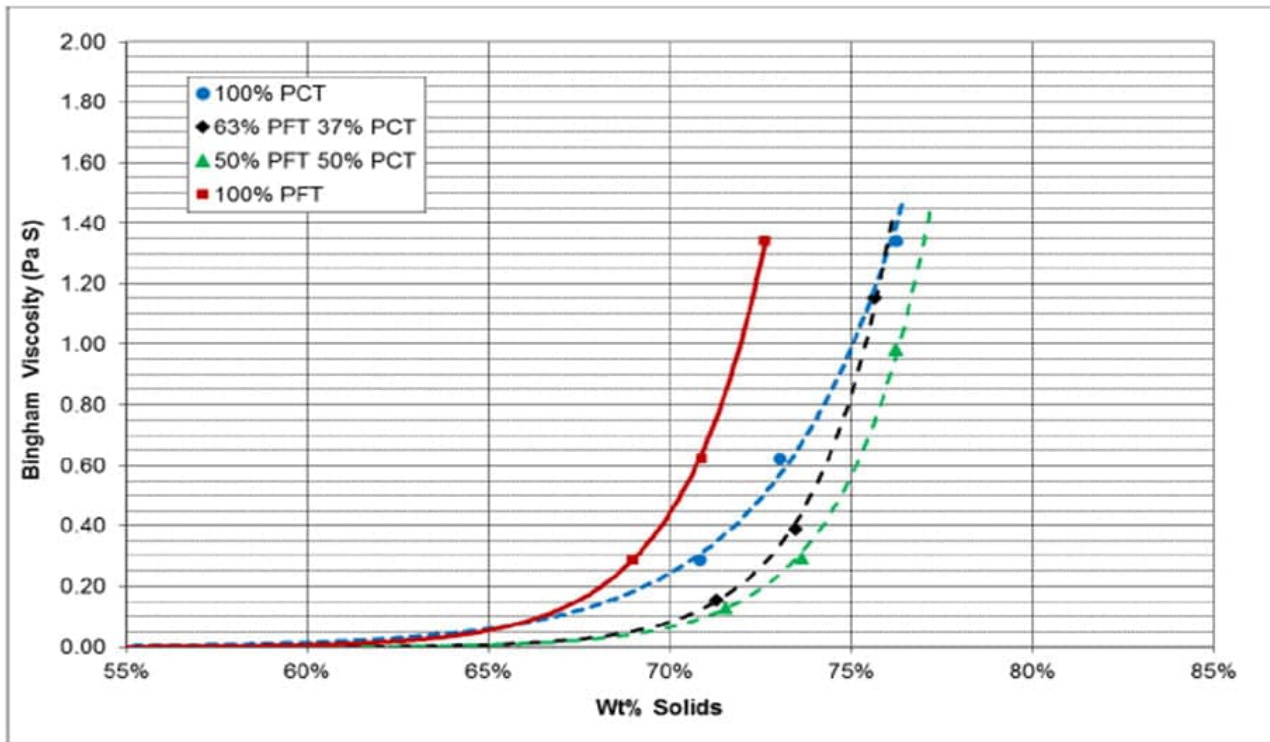


Figure 6 : Viscosité plastique (modèle de Bingham) en fonction du pourcentage solide des résidus (PCT = RCP et PFT = RFP)

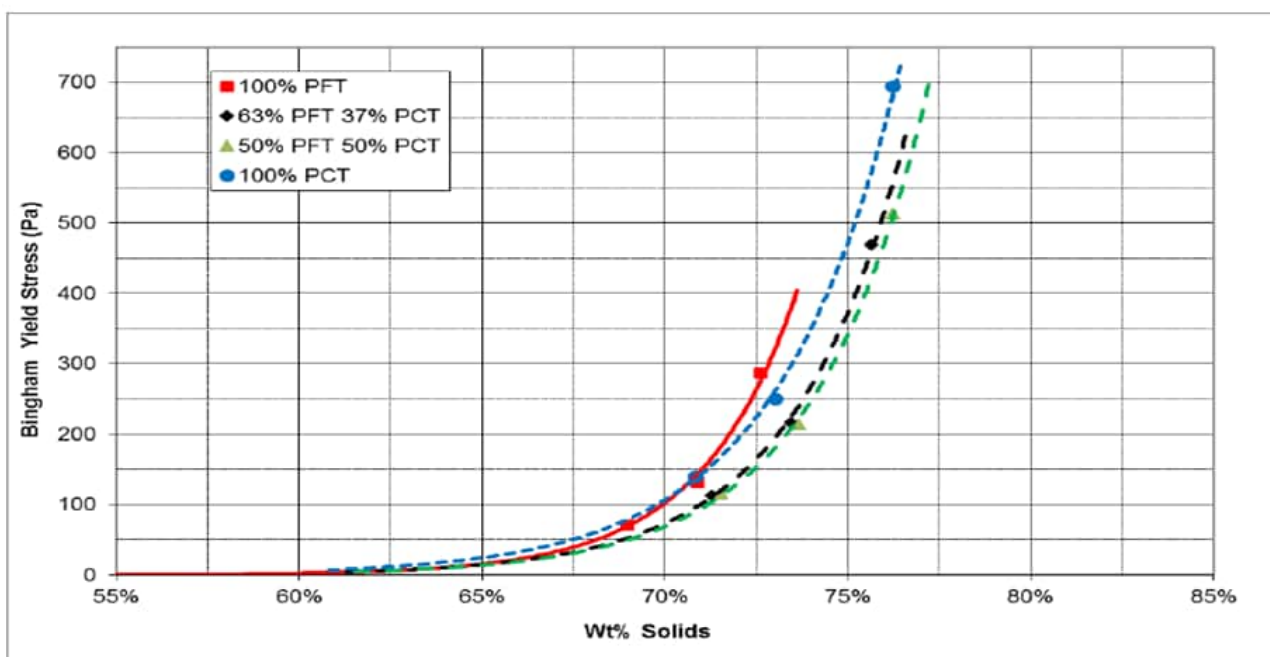


Figure 7 : Contrainte du seuil d'écoulement (modèle de Bingham) en fonction du pourcentage solide des résidus (PCT = RCP et PFT = RFP)

La figure 8 présente les courbes des contraintes du seuil de l'écoulement pour différents types de résidus selon une revue de littérature (Boger et al. 2002). Les résidus d'or sont représentés par la courbe 2 (*Gold Tailings*). Le seuil d'écoulement des résidus RFP semble se comporter de manière semblable à celui des résidus d'or publié dans la littérature.

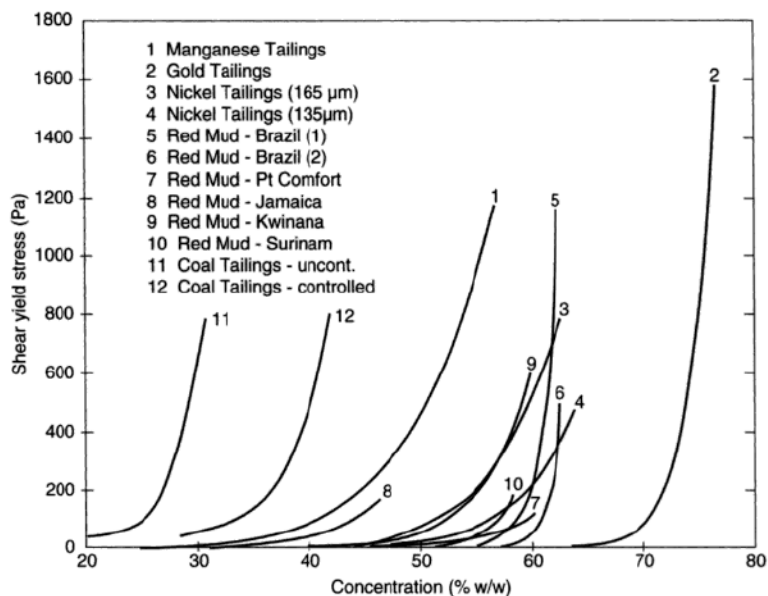


Figure 8 : Contraintes du seuil d'écoulement (*Yield Stress*) pour différents types de résidus (Boger et al, 2002)

6.0 VOLUMES SORTANTS DE RÉSIDUS - MODES D'ÉCOULEMENT

Plusieurs mécanismes peuvent influencer la mobilisation des résidus lors d'une rupture de digue, dont :

- La liquéfaction statique et dynamique des résidus.
- L'érosion de la surface des résidus due au cisaillement généré à la surface des résidus en raison de la vitesse de sortie des résidus du parc à résidus.

L'estimation du volume de résidus sortants à la suite d'une rupture comporte une grande incertitude liée à la variation des propriétés des résidus, à la fois verticalement et latéralement, ainsi qu'à la variation spatiale de la vitesse de l'écoulement et à la variation des propriétés de l'écoulement avec le temps.

6.1 Estimation des volumes sortants de résidus

En reconnaissant les incertitudes et les limitations encourues pour déterminer le volume de résidus sortants par la brèche de rupture dans la digue, Golder propose d'estimer une géométrie crédible de la surface des résidus après la rupture de la digue et après leur évacuation du parc. La différence entre la surface initiale, avant rupture, et la surface après la rupture indiquera le volume de résidus sortants.

Une fois que la brèche commence à se former dans la digue, la mobilisation des résidus aurait lieu principalement dans la direction de la brèche, soit dans la direction perpendiculaire à l'axe de la digue. De plus, il est supposé que la brèche se propagera jusqu'à l'atteinte de la fondation. La figure 9, extraite de la figure 2 de l'annexe C, illustre la surface post-rupture générée le long de l'axe perpendiculaire à la digue. La ligne rose représente la surface des résidus déposés dans la cellule RFP avant la rupture et la ligne verte représente la surface des résidus liquéfiés après la rupture. Le volume sortant lors de la rupture est la différence entre les surfaces symbolisées par ces deux lignes.

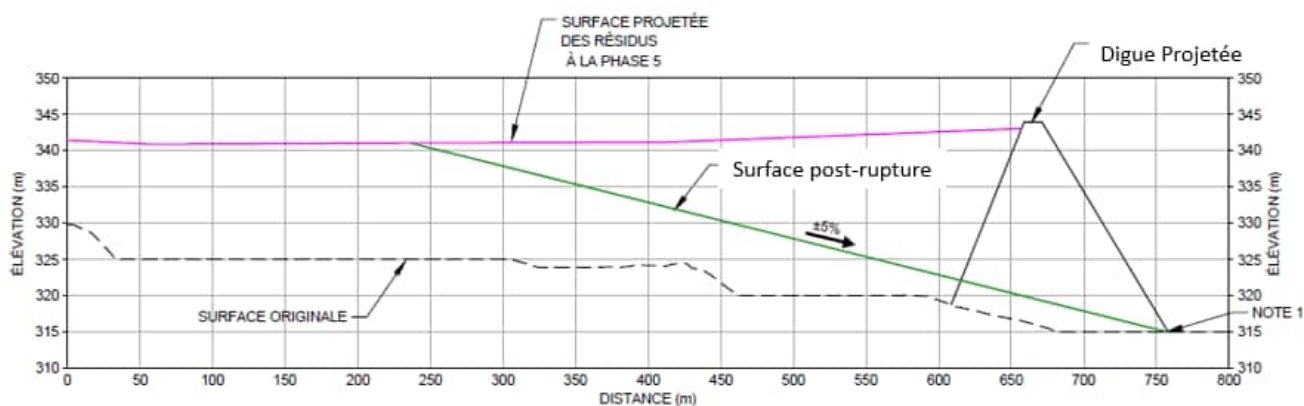


Figure 9: Profil dans une surface post-rupture

La pente de la surface post-rupture dépend notamment des caractéristiques des résidus entreposés dans le parc et de la présence ou non d'un étang d'eau au-dessus des résidus au moment où la rupture se produit. De manière générale, la présence de l'eau conduit à une pente plus faible de la surface post-rupture.

Golder a développé une surface post-rupture selon des pentes crédibles pour des cas sans étang d'eau sur le parc et, ensuite, a confirmé que cette surface n'intercepte pas le bassin d'eau dans le parc à résidus Norbec. Golder a réalisé une revue de littérature pour documenter des valeurs crédibles correspondant à des angles de surface post-rupture sans présence d'étang d'eau. Les cas de rupture historique des digues cités dans la littérature (Blight et Fourie, 2003) montrent des angles de surface post-rupture variant de 2° à 10°. L'intervalle varie de 3,5° à 10° en l'absence d'étang d'eau dans le parc proche de la digue lors de la rupture.

Pour générer la surface des résidus après la rupture hypothétique de la digue, une pente post-rupture de 5 % (2,9°) a été utilisée dans la direction perpendiculaire à l'axe de la digue, en partant du pied de la digue et en remontant jusqu'à la surface des résidus. La même pente a été utilisée pour les deux côtés transversaux. La valeur choisie de la pente est jugée conservatrice puisqu'il s'agit d'une valeur du spectre inférieur des valeurs répertoriées dans la littérature. La pente post-rupture peut être comparée à l'angle de frottement interne des résidus liquéfiés, ou à un rapport de résistance au cisaillement non drainé liquéfié s_r / σ'_v de 0,05.

L'hypothèse d'une pente post-rupture de 5 % (2,9°) se justifie par le fait que l'étang d'eau n'atteint pas les surfaces de rupture formées. Étant donné son importance, Golder a vérifié que cette hypothèse est aussi valable dans les autres étapes de développement du site de l'IGRM, soit lors des étapes 1 à 4 du développement du parc à résidus, et ce afin de confirmer que l'étape 5 demeure l'étape la plus défavorable en termes de conséquences. La figure 10 illustre la configuration des surfaces post-rupture formées avec un angle post-rupture de 5 % (2,9°) lorsque le niveau d'eau dans le parc correspond à la crue de projet D019 résultant du bilan de la mise à jour du bilan d'eau (Golder, 2019b). Dans tous les cas, les surfaces post-rupture restent loin de la surface du bassin d'eau.

Sur la base des hypothèses énoncées et des paramètres de brèche présentés à la section 7.2, les volumes estimés de résidus pouvant sortir lors de la rupture des digues RFP-1 et RFP-2 sont présentés au tableau 3. Les figures 1 et 2 à l'annexe B illustrent la géométrie de la brèche pour les deux digues considérées.

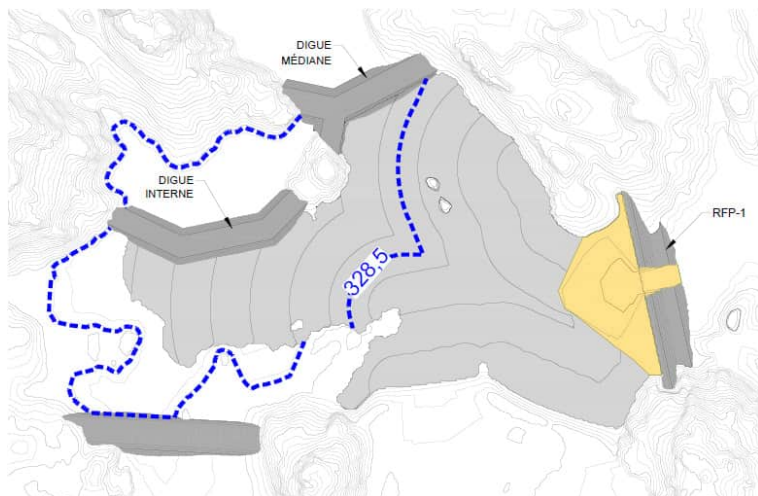
Tableau 3 : Volumes estimés des résidus sortants lors de la rupture pour les scénarios 1 et 2, selon l'approche géométrique

Paramètre	Digue RFP-1	Digue RFP-2
	Scénario 1	Scénario 2
Volume total de résidus ¹ (M m ³)	16	11
Volume estimé de résidus sortants ² (M m ³)	1,1	0,14

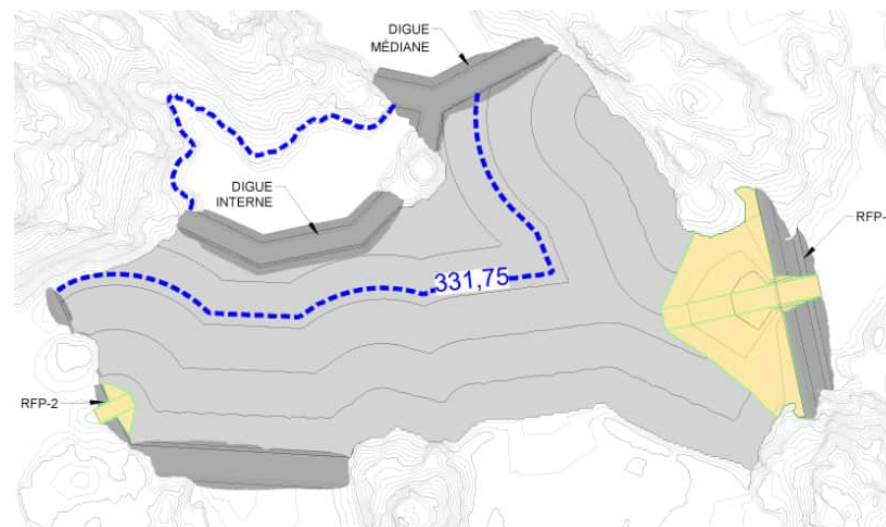
¹ Volume total de résidus dans la cellule RFP à l'étape 5. Ce volume n'inclut pas les résidus entreposés dans la cellule RCP et dans l'ancien bassin de polissage des étapes 1 à 4. Les résidus dans l'ancien bassin de polissage se trouvent sous l'élévation du terrain en aval des digues.

² Inclut le volume de matériau de la digue entraîné dans la rupture

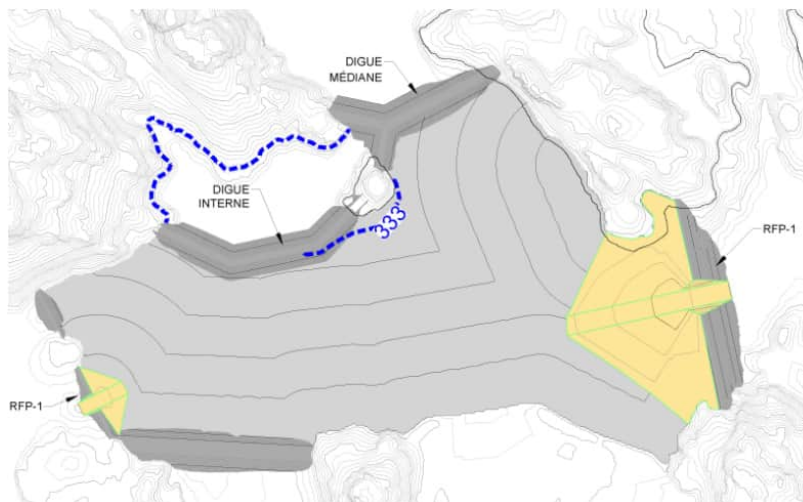
Étape 1 – Niveau crue D019 = 328,5 m



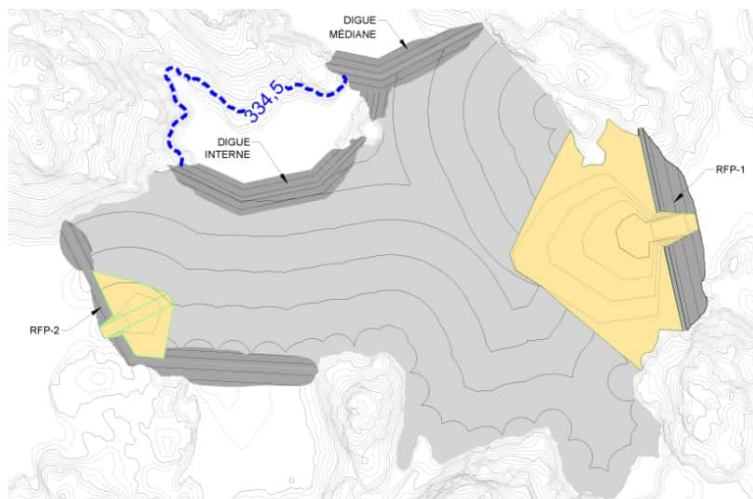
Étape 2 – Niveau crue D019 = 331,75 m



Étape 3 – Niveau crue D019 = 333,0 m



Étape 4 – Niveau crue D019 = 334,5 m



Étape 5 – Niveau crue D019 = 337,5 m

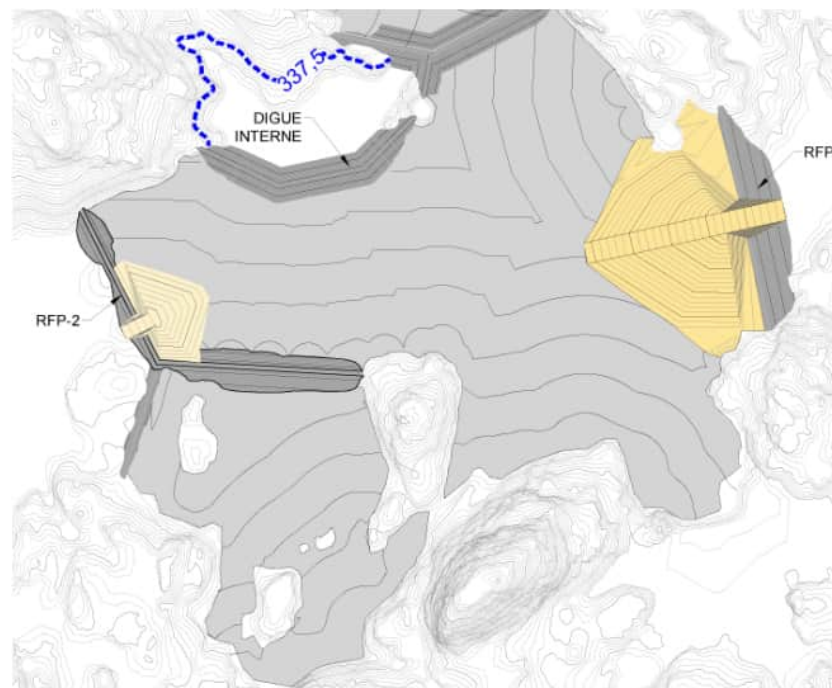


Figure 10: Vérification des surfaces post-rupture avec la configuration retenue pour les autres étapes 1 à 5 du développement de l'IGRM

Note : Les lignes pointillées bleues illustrées sur la figure 10 représentent le niveau maximal atteint lors de la crue de projet définie par la Directive 019 sur l'industrie minière (MDDELCC, 2012) pour chaque étape de développement du projet Horne 5 (Golder, 2019b).

6.2 Mode d'écoulement des résidus sortants

Les résidus RFP seront déposés à un pourcentage solide initial (par poids) de 62 % et il est attendu qu'ils atteignent 75 % après consolidation (Golder, 2017b). À ces pourcentages, les résidus se situent dans une zone de transition entre un écoulement en pulpe (*mud flow*) et un écoulement qui s'apparente à un glissement de terrain (*Landslide*), comme montré sur la figure 11. Golder a choisi de ne retenir que le mode d'écoulement en boue, car ce dernier mène à des conséquences plus importantes.

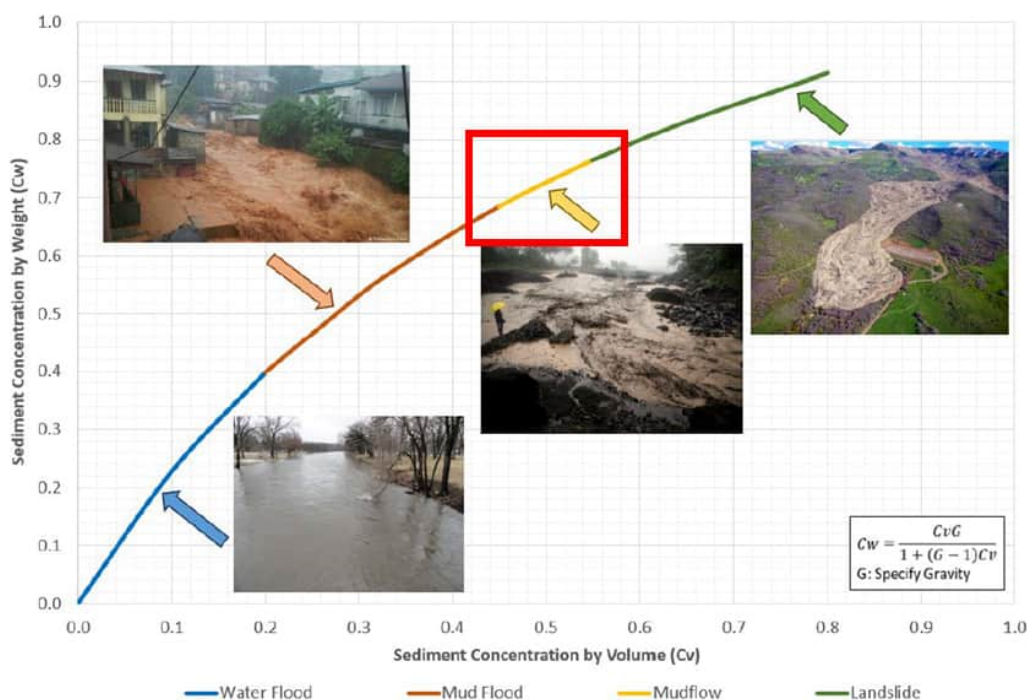


Figure 11 : Classification du régime d'écoulement selon ACB (2019 – version préliminaire)

7.0 MODÉLISATION DE LA PROPAGATION DES RÉSIDUS EN AVAL DES DIGUES

7.1 Propriétés rhéologiques des résidus sortants

Les propriétés des résidus utilisées comme intrants à la modélisation de la propagation dans le modèle numérique sont les suivantes, et ce pour les deux scénarios étudiés :

- Masse volumique : 1,89 t/m³
- Viscosité dynamique : 1,3 PaS
- Contrainte du seuil d'écoulement : 337 Pa

La modélisation de chaque scénario tient compte de l'hypothèse que les résidus sortants constituent un mélange uniforme et homogène qui possède les propriétés décrites ci-dessus.

7.2 Paramètres des brèches des ruptures étudiées

Les paramètres de brèche sont spécifiques à chaque scénario de rupture étudié et dépendent notamment de la géométrie et de la méthode de construction de la digue et du parc à résidus, le volume d'eau libre et le

volume de résidus retenus par les digues ainsi que le mécanisme de rupture considéré. Les paramètres de brèche influencent grandement le débit maximum du fluide sortant lors de la rupture.

Les paramètres de brèche déterminés, illustrés à la figure 12, sont les suivants :

- La géométrie de la brèche (largeur à la base, hauteur et pentes latérales);
- Le temps de formation de la brèche (la durée entre le début de la formation jusqu'au point où la brèche atteint sa dimension maximale);
- Dans le cas d'une rupture par érosion interne, l'élévation de formation de la brèche (l'élévation où la brèche commence à se former).

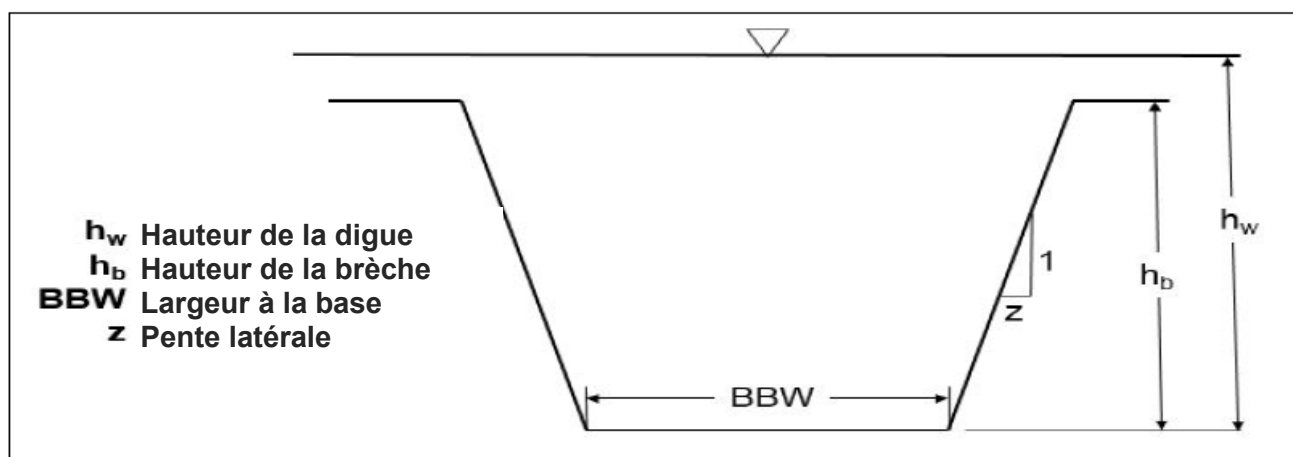


Figure 12 : Paramètres géométriques d'une brèche trapézoïdale

Golder a déterminé les paramètres de brèche à partir d'équations empiriques publiées dans la littérature, notamment par le *U.S. Dam Safety Office* (DSO, 1998). Ces équations sont basées pour la plupart sur des données extraites des ruptures de digue historiques. Les différentes équations disponibles fournissent un intervalle de valeurs parfois très variables, ce qui indique le niveau d'incertitude dans la détermination de ces paramètres. L'approche adoptée consiste à :

- Définir un intervalle de valeurs crédibles en se servant des équations empiriques;
- Choisir les paramètres à utiliser dans les simulations en préparant une analyse de sensibilité de l'hydrogramme sortant (c'est-à-dire la courbe montrant la variation dans le temps du débit) par rapport à chaque paramètre, et ce pour retenir une combinaison de paramètres qui soit conservatrice par rapport au débit sortant.

Les intervalles de valeurs trouvés pour chaque paramètre ainsi que les valeurs statistiques utilisées pour l'analyse de sensibilité sont résumés au tableau 4. L'analyse de sensibilité sur ces valeurs et les valeurs finales retenues pour les simulations sont présentées à la section suivante.

Tableau 4 : Intervalle de valeurs des paramètres de brèche pour les deux scénarios étudiés

Paramètres de la brèche	Scénario 1 Digue RFP-1	Scénario 2 Digue RFP-2
Hauteur (m)	32	19
Largeur à la base (m)		
Intervalle de valeurs	3 à 97	1 à 57
Valeur moyenne	52	31
Valeur médiane	54	35
Écart-type	47	28
Temps de formation de la brèche (h)		
Intervalle de valeurs	0,2 à 1,1	0,1 à 0,7
Valeur moyenne	0,5	0,4
Valeur médiane	0,5	0,3
Écart-type	0,3	0,3
Pente latérale (xH:1V)	1,0	1,0
Élévation de formation de la brèche¹ (m)	311,7 à 333,2	325,0 à 337,7

¹ L'élévation de formation de la brèche est comprise entre l'élévation du pied de la digue (fondation) au 2/3 de la hauteur de la digue.

7.3 Hydrogrammes sortants – analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité a été réalisée sur les hydrogrammes sortants de la cellule RFP pendant la rupture (hydrogrammes sortants), en utilisant l'intervalle des valeurs des paramètres de brèche déterminés à la section 7.2. Cette analyse de sensibilité a été réalisée avec le logiciel HEC-HMS (USACE, 2016a), dans lequel le débit à travers la brèche est modélisé d'abord comme un écoulement à travers un orifice, et ensuite à travers un seuil épais, sans tenir compte de la viscosité du fluide.

L'analyse de sensibilité des hydrogrammes sortants par rapport aux paramètres de brèche a été effectuée à l'aide d'une approche de type Monte Carlo, en simulant 50 combinaisons de paramètres. L'ensemble des hydrogrammes résultants a ensuite été analysé afin d'évaluer un intervalle crédible pour le débit maximal sortant, et ce en évaluant des valeurs statistiques comme la moyenne, la moyenne plus l'écart-type et le maximum. L'hydrogramme sortant de référence, qui est sélectionné pour l'étude de rupture de digue, est celui correspondant approximativement à un débit maximum égal à la moyenne plus un écart-type des valeurs similaires générées par l'analyse de Monte Carlo.

Le tableau 5 présente les résultats de l'analyse de sensibilité. La dernière ligne du tableau (débit de rupture moyen plus un écart-type) correspond aux débits de pointe sélectionnés.

Tableau 5 : Résultats de l'analyse de sensibilité des paramètres de brèches sur le débit sortant maximal

Débit maximal de l'hydrogramme de rupture	Scénario 1 Digue RFP-1	Scénario 2 Digue RFP-2
Valeur minimale (m ³ /s)	700	60
Valeur moyenne (m ³ /s)	1 700	300
Valeur maximale (m ³ /s)	6 500	1 310
Valeur sélectionnée \approx valeur moyenne plus un écart-type (m³/s)	2 816	699

7.4 Hydrogrammes sortants sélectionnés

Le tableau 6 présente les paramètres de brèche sélectionnés pour obtenir les hydrogrammes de rupture.

Tableau 6 : Paramètres de brèche retenus pour le calcul du débit maximal

Paramètres de la brèche	Scénario 1 Digue RFP-1	Scénario 2 Digue RFP-2
Largeur à la base (m)	54	35
Pente latérale (xH:1V)	1,0	1,0
Temps de formation de la brèche (h)	0,5	0,3
Élévation de formation de la brèche (m)	322,5	331,3

Les hydrogrammes de rupture obtenus avec les paramètres du tableau 6 sont présentés à la figure 14. Ces hydrogrammes servent d'intrant dans le modèle numérique pour la simulation de chaque scénario.

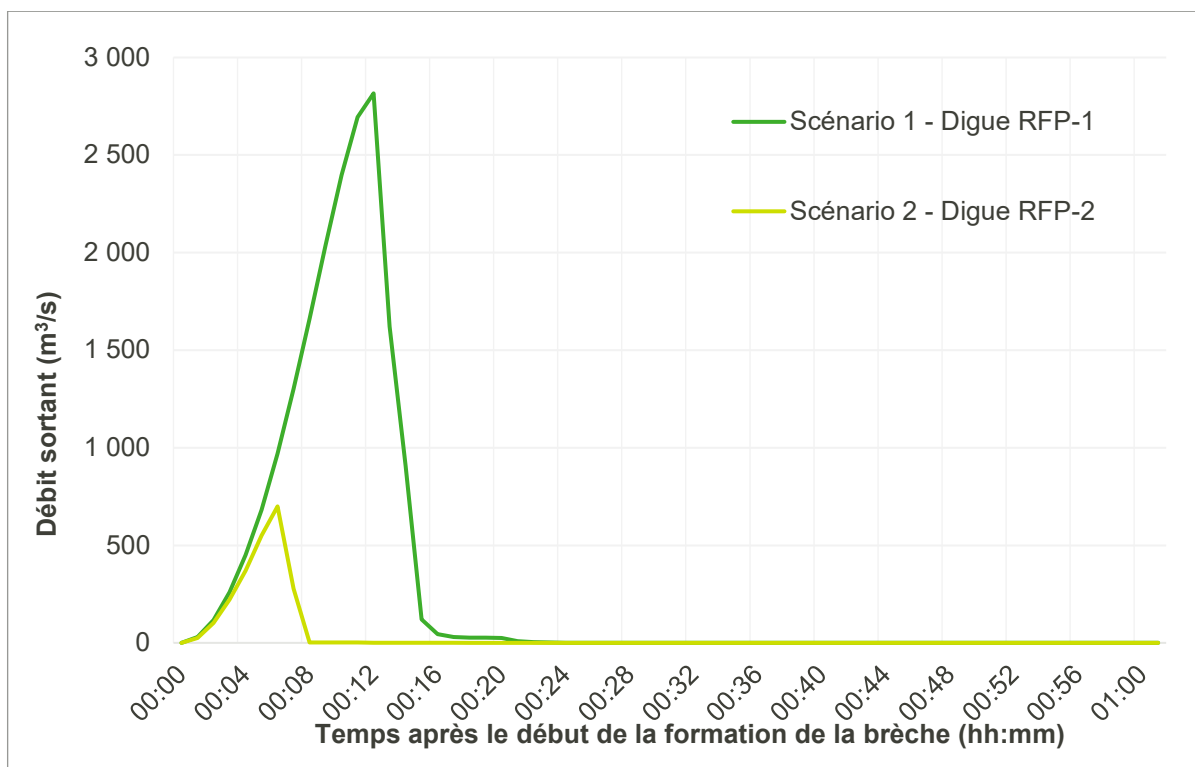


Figure 13 : Hydrogrammes sortants à la suite de la rupture des digues RFP-1 et RFP-2

7.5 Modélisation numérique de la propagation des hydrogrammes de rupture en aval des digues RFP-1 et RFP-2

7.5.1 Logiciel utilisé

Les simulations de la propagation des hydrogrammes de rupture et des écoulements des résidus ont été effectuées à l'aide du logiciel FLOW-3D (le modèle), développé par Flow Science Inc. FLOW-3D est un logiciel de mécanique des fluides tridimensionnel qui utilise un maillage cartésien pour discrétiser un domaine en utilisant la méthode des volumes finis. Si les profondeurs d'eau et les vitesses verticales sont limitées par rapport aux distances et vitesses horizontales, comme c'est souvent le cas pour les écoulements non newtoniens résultants d'un bris de digue, la résolution des équations d'écoulement (les équations Navier-Stokes) en 3D n'est pas requise. FLOW-3D permet dans ce cas de figure d'effectuer la simulation en 2D en « *shallow water mesh* », ce qui représente une économie importante en termes de temps de calcul.

7.5.2 Intrants du modèle et hypothèses

7.5.2.1 Données topographiques

La qualité et la précision des résultats d'une analyse de bris de digue dépendent de la qualité de la topographie utilisée. Pour l'analyse de Falco, des données LiDAR fournies par le gouvernement du Québec (Ministère des forêts, de la faune et des parcs¹ - MFFP, 2019) ont été utilisées. La résolution spatiale du Lidar est de 1 m.

Les données LiDAR de (MFFP, 2019) ont été comparées aux données LiDAR fournies par Falco en 2017. Les deux sources présentaient des différences négligeables, cependant les données LiDAR du ministère

¹ MELCC : ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, anciennement connu sous les appellations ministère du Développement durable de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC); ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP); ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP); ministère de l'Environnement (MENV); ou ministère de l'Environnement et de la Faune (MEF).

couvraient un domaine plus large. Les digues RFP-1 et RFP-2 projetées ont été mises à jour avec les données LiDAR pour représenter au mieux les conditions au moment de la rupture. Les données LiDAR utilisées couvrent tout le domaine en aval des digues RFP-1 et RFP-2.

7.5.2.2 Paramètres numériques

Les données topographiques (LiDAR) ont été converties en une surface qui a été subdivisée (« discrétisée ») en un certain nombre de cellules, appelées « volumes finis ». L'étendue du domaine spatial modélisé et le nombre de cellules varient selon le scénario modélisé et l'étendue de l'onde de rupture attendue pour chaque scénario. L'ensemble de ces cellules constitue le maillage, et les limites du domaine spatial étudié représentent le « domaine numérique ». La précision des résultats dépend à la fois du nombre de cellules modélisées, de leur taille et de la précision des données topographiques utilisées.

Une durée de simulation suffisante a été choisie pour chaque scénario, de façon à modéliser le fluide jusqu'à ce qu'il s'arrête (énergie cinétique nulle).

La taille de cellules utilisée pour la modélisation du domaine étudié a été fixée à 2 m pour les deux scénarios selon la précision et la résolution visée.

Une rugosité variable a été appliquée sur l'ensemble du domaine à l'étude afin de déterminer les paramètres hydrauliques d'écoulement. La valeur de la rugosité appliquée dépend du type de surface considéré. Les valeurs de rugosité sont entrées en rugosité de Nikuradse selon un sable équivalent « *Nikuradse's sand-equivalent roughness* ». Le tableau 7 présente les valeurs de rugosité de Nikuradse pour chaque type de surface, et les coefficients de Manning équivalents pour fins de comparaison.

Tableau 7 : Valeurs de rugosité selon le type de surface

Type de surface	Coefficient de rugosité de Manning	Rugosité de Nikuradse (équivalent en sable) (m)
Cours d'eau et lacs	0,035	0,16
Surfaces boisées et végétalisées	0,120	263,5

Les hydrogrammes de rupture présentés à la figure 14 ont été entrés dans le modèle FLOW-3D.

Afin de suivre l'évolution temporelle de l'onde de rupture à des points précis du domaine à l'étude, points qui représentent un intérêt particulier à notre étude, des points appelés « *history probes* » ont été rajoutés. Ces points permettent donc de répertorier le temps d'arrivée de l'onde de rupture à des endroits précis. Des surfaces appelées « surface de flux » ont aussi été rajoutées à le long du chemin d'écoulement afin de suivre l'évolution des débits à travers le temps.

7.6 Résultats de modélisation et discussion

Les figures illustrant les zones inondables par des résidus en cas de rupture hypothétique des digues RFP-1 et RFP-2, modélisées respectivement dans les scénarios 1 et 2, sont présentées à l'annexe D et aux figures 14 et 15 dans le texte. Les informations suivantes sont incluses dans les figures :

- Les profondeurs maximales d'inondation de résidus au-dessus de l'élévation du terrain naturel. On note que les profondeurs maximales présentées ne surviennent pas en même temps à chaque endroit, mais arrivent à différents moments de la rupture.
- Les points d'intérêt avec un tableau indiquant le temps d'arrivée de l'onde de rupture, la profondeur maximale estimée à ces points et à quel instant elle survient ainsi que sa vitesse maximale.

7.6.1 Digue RFP-1 – Scénario 1

Le scénario 1 modélise la rupture de la digue RFP-1 en considérant un volume sortant de résidus de 1,1 M m³. Les résidus ont une teneur en solides (par masse) d'environ 75 %.

Le tableau 8 indique le temps d'arrivée de l'onde de rupture, la profondeur maximale et la vitesse maximale d'écoulement aux points d'intérêt ainsi que le débit maximal atteint aux sections.

Les points saillants des résultats de la modélisation de la rupture de la digue RFP-1 sont les suivants :

- La zone inondable résultante couvre une zone d'environ 0,37 km².
- Les résidus s'écoulent le long du ruisseau Vauze mais ne se rendent pas jusqu'aux endroits jugés les plus critiques, soient la Ville de D'Alembert, la route 101 et le Lac Dufault. En effet, les résidus s'immobilisent à environ 1,2 km en aval de la digue RFP-1, soit 1,6 km en amont de la ville de d'Alembert (croisement de la route 101 et du ruisseau Vauze), après environ 5 heures (vitesses d'écoulement inférieures à 0,05 m/s).
- L'hydrogramme de rupture est fortement atténué le long des 1,2 km parcourus : le débit de rupture maximal est atténué de 61 % sur une distance de 400 m (section 2), de 97 % à une distance de 740 m (section 3) et à environ 100 % lorsqu'il atteint 1 km. Cette atténuation rapide s'explique notamment par les propriétés rhéologiques des résidus et par la topographie relativement plate.

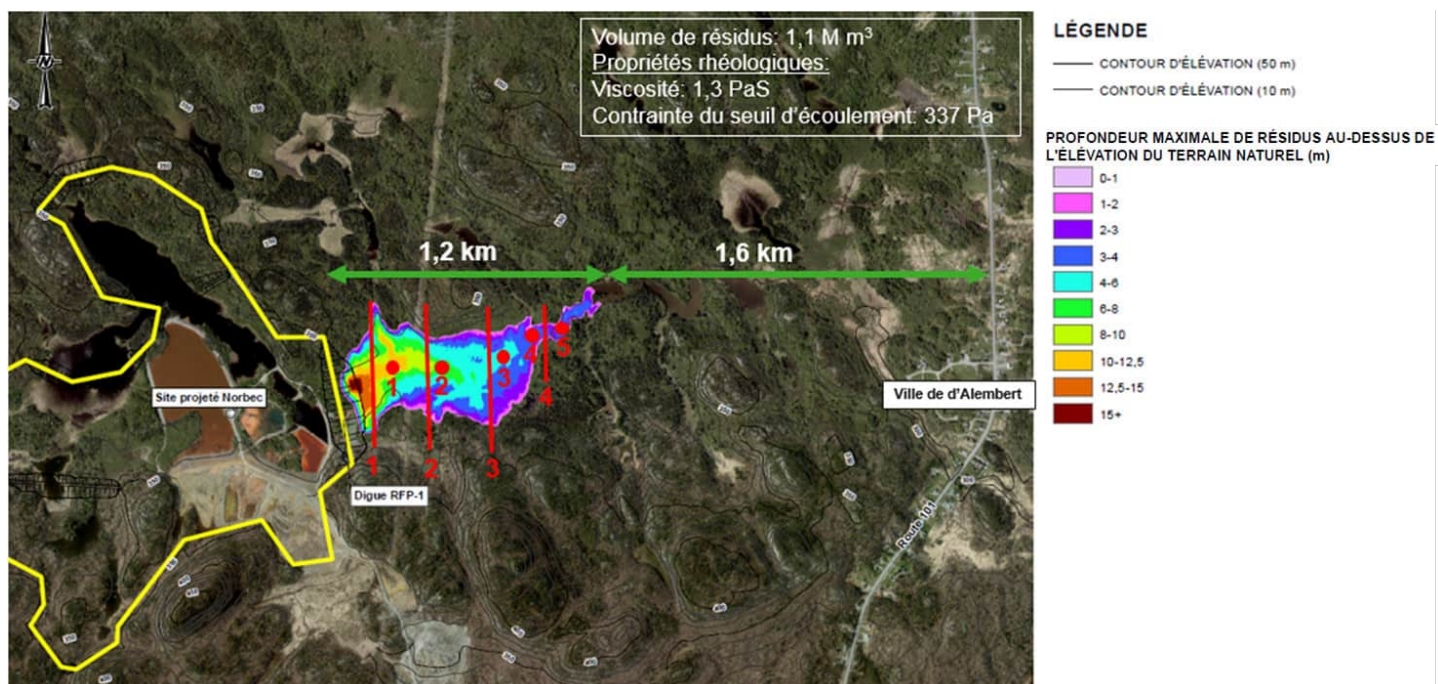


Figure 14: Digue RFP-1 – Scénario 1 – Résultats de modélisation

Tableau 8: Digue RFP-1 – Scénario 1 – Résultats de modélisation

Point d'intérêt	Temps d'arrivée de l'onde de rupture (min)	Profondeur maximale des résidus (m)	Vitesse maximale (m/s)	Section (Figure 14)	Débit maximal (m ³ /s)
Débit à la rupture	-	-	-	-	2 816
1	5	11,8	2,5	1	2 800
2	11	8,0	1,3	2	1 100

Point d'intérêt	Temps d'arrivée de l'onde de rupture (min)	Profondeur maximale des résidus (m)	Vitesse maximale (m/s)	Section (Figure 14)	Débit maximal (m ³ /s)
3	19	4,9	0,5	3	80
4	64	3,2	0,1	4	3
5	222	3,8	0,3		

7.6.2 Digue RFP-2 – Scénario 2

Le scénario 2 modélise la rupture de la digue RFP-2 en considérant un volume sortant de résidus de 0,14 M m³. Les résidus ont une teneur en solides (par masse) d'environ 75 %.

Le tableau 9 indique le temps d'arrivée de l'onde de rupture, la profondeur maximale et la vitesse maximale d'écoulement aux points d'intérêt ainsi que le débit maximal atteint aux sections.

Les points saillants des résultats de la modélisation de la rupture de la digue RFP-2 sont les suivants :

- La zone inondable résultante couvre une zone d'environ 0,055 km².
- Le scénario 2 montre que les résidus s'écoulent à environ 350 m en aval de la digue et s'immobilisent à cet endroit après environ 1 heure (vitesses d'écoulement inférieures à 0,05 m/s).
- L'hydrogramme de rupture est fortement atténué le long des 1,2 km parcourus : le débit de rupture maximal est atténué de 35 % sur une distance de 140 m (section 2), de 70 % à une distance de 210 m (section 4) et de 100 % lorsqu'il atteint 350 m. Cette atténuation rapide s'explique notamment par les propriétés rhéologiques des résidus et par la topographie relativement plate.

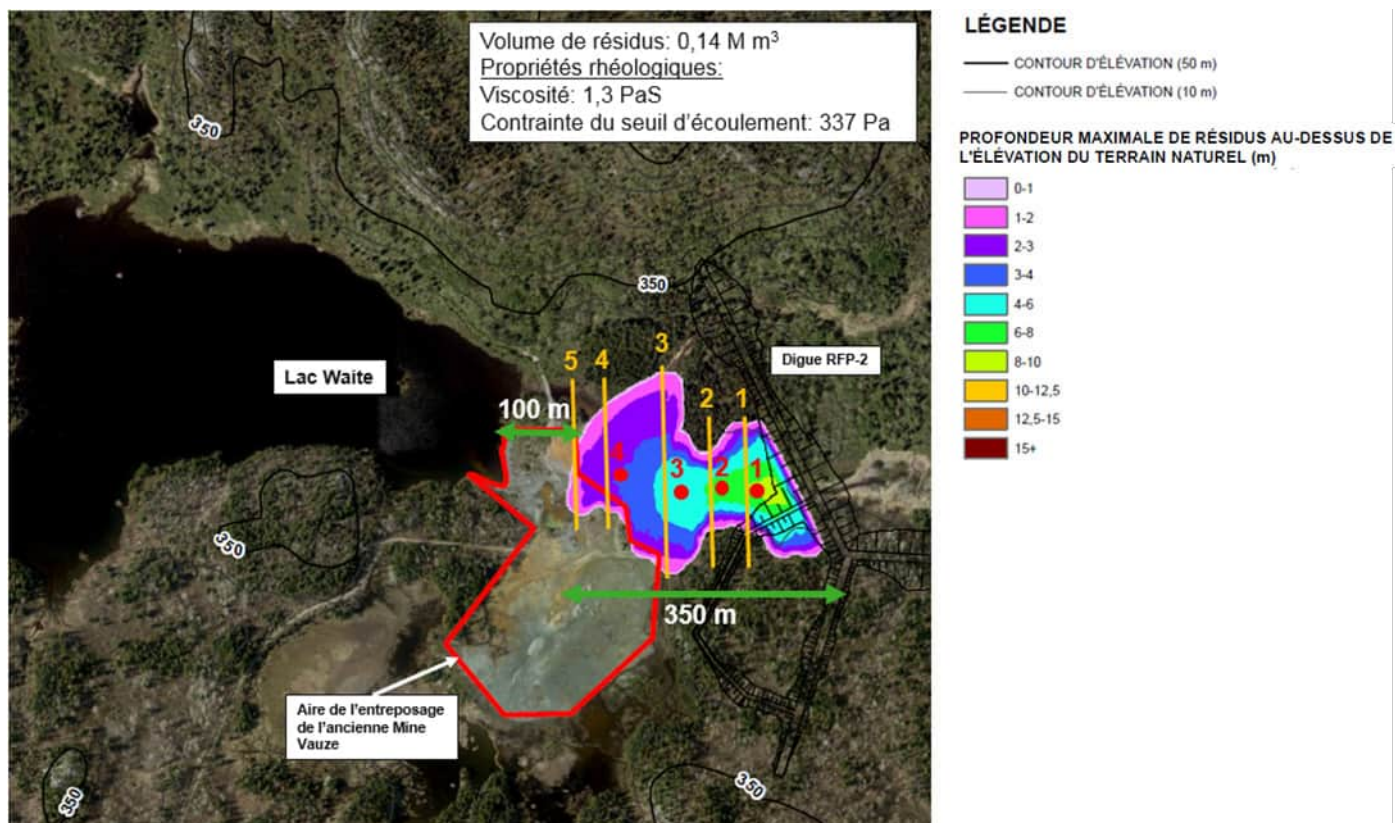


Figure 15: Digue RFP-2 – Scénario 2 – Résultats de modélisation

Tableau 9: Digue RFP-2 – Scénario 2 – Résultats de modélisation

Point d'intérêt	Temps d'arrivée de l'onde de rupture (min)	Profondeur maximale des résidus (m)	Vitesse maximale (m/s)	Section (figure 15)	Débit maximal (m ³ /s)
Débit à la rupture	-	-	-	-	699
1	1	8,5	1,3	1	580
2	4	6,0	1,8	2	457
3	6	4,6	1,1	3	213
4	9	2,8	0,2	4	7
				5	1

8.0 CONCLUSIONS

Ce rapport documente une étude de bris de digue pour le site de l'IGRM du projet Horne 5, situé au site Norbec. L'étude a comme objectif de quantifier et qualifier les conséquences d'une rupture hypothétique de digue en mettant l'accent sur les éléments critiques en aval du site Norbec, comme la route, la Ville de D'Alembert, le lac Dufault ou encore les lacs Waite et Duprat.

L'objectif principal de la présente étude de bris de digue consiste à dresser le portrait général des conséquences en cas d'une rupture hypothétique. Ce type d'étude vise principalement à répondre à la question « qu'en est-il si jamais » un événement de rupture d'une structure en particulier se produisait, afin de permettre une planification adéquate et réaliste de la gestion du risque. Cette étude n'aborde pas la probabilité qu'un tel événement survienne. Cette probabilité est extrêmement faible grâce à l'effort de conception et de suivi de la performance des ouvrages tout au long de leur vie utile. Ainsi, lorsque le terme « rupture » est employé dans le présent rapport, il fait référence à une rupture hypothétique qui serait causée par un événement exceptionnel mais physiquement possible (dont la probabilité est non nulle).

L'étude s'est concentrée sur la rupture hypothétique des digues RFP-1 et RFP-2, jugée pour avoir les conséquences les plus importantes. Les scénarios de rupture consistent en une rupture par érosion interne qui serait simultanée à un niveau d'eau maximal lors de la crue de projet définie par la Directive 019. La configuration du parc à résidus lors de la rupture correspond à celle à la fin de l'étape 5 du projet Horne 5, quand les dimensions des digues et les volumes de résidus dans le parc sont à leur maximum.

Selon les résultats de modélisation numérique, les éléments critiques situés en aval des digues RFP-1 et RFP-2, y compris la ville de D'Alembert, ne seraient pas touchés. De plus, aucune résidence, ni aucun autre élément critique, ne se situe dans les zones inondables engendrées par les deux ruptures hypothétiques.

Les lacs situés en aval des digues étudiées, soit le lac Dufault pour RFP-1 et le lac Waite pour RFP-2 ne sont pas atteints par l'hydrogramme de rupture. L'hydrogramme de rupture de RFP-2 s'immobilise à environ 100 m de l'entrée du Lac Waite. En raison de cette distance proche, Falco devra prendre les mesures nécessaires dans le plan d'intervention d'urgence pour limiter le risque de transport de résidus, en cas de bris, vers le Lac Waite; risque qui serait causé, par exemple, par des précipitations importantes les jours suivant la rupture.

La présente étude fournit les éléments pour permettre une planification adéquate et approfondie des mesures d'urgence et de communication. La planification devra aussi tenir compte des enjeux liés à la qualité de l'eau des lacs Dufault, Duprat et Waite, qui est abordée dans un document séparé (Golder, 2019a).

9.0 RECOMMANDATIONS

La présente étude a simulé les conséquences d'un bris de digue pour la configuration finale du parc à résidus du projet Horne 5, constituant la configuration la plus critique en termes de conséquences.

Cette étude tient compte de la configuration des digues du parc, de la déposition des résidus et des propriétés des résidus selon la planification actuelle (Golder, 2017a), ainsi que du bilan d'eau actualisé (Golder, 2019b). La modification de ces éléments pourrait entraîner des changements aux conséquences de l'étude de bris de digue. Le cas échéant, Golder recommande d'actualiser l'étude lors des prochaines phases du projet.

10.0 RÉFÉRENCES

- ACB, 2019. Technical Bulletin: *Tailings Dam Breach Analyses*. Draft Document. February 2019.
- ACB, 2014. Technical Bulletin: *Hydrotechnical Considerations for Dam Safety Review*.
- Blight, G. E. and Fourie, A. B. (2003), *A review of catastrophic flow failures of deposits of mine waste and municipal refuse*, IN: Introductory report of the International Workshop on Occurrence and mechanisms of flows in natural slopes and earthfills, IWFLAWS2003, Sorrento, Italy, 14-16 – May 2003.
- Boger, D., P.J. Scales, F. Scales. F. Sotra, 2002. *Rheological Concepts*. In: Jewell, R.J., Fournie, A.B., and Lord, E.R. eds. *Paste and Thickened Tailings – a Guide*. 1-8. The Australian Centre for Geomechanics. The University of Western Australia, Nedlands, Western Australia.
- Bradley J.B., McCutcheon S.C, 1986, *The effects of high sediment concentration on transport processes and flow phenomena*. In: International Symposium on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention, Tsukuba, Japan, 3-5 September, 219-225.
- Golder Associés, 2019a. Rapport technique : *Étude de l'impact d'une rupture de digue sur la qualité de l'eau, en support à l'étude de faisabilité et l'étude d'impact*. Falco Resources Ltd, Rouyn-Noranda, Québec. Réf. GAL135- 19122243-RevA. Novembre 2019.
- Golder Associés, 2019b. Rapport technique : *Rapport du bilan d'eau de la mine Horne 5 en support à l'étude de faisabilité et l'étude d'impact*. Falco Resources Ltd, Rouyn-Noranda, Québec. Réf. GAL113- 19122243-RevA. Décembre 2019.
- Golder Associés, 2017a. Technical report: *Surface Tailings Management Facility Design Report*. Horne-5 Mine Project. Falco Resources Ltd, Rouyn-Noranda, Québec. Ref. 028-1774165-3100-4000-Rev0. November 2017.
- Golder Associés, 2017b. Technical report: *Underground Distribution Systems*. HORNE-5 Mine Project, Feasibility Study. Falco Resources Ltd, Rouyn-Noranda, Québec. Ref. GAL050-1774165. November 2017.
- Hutchinson, J.N. 1988. General report: *Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in Relation to Geology and Hydrogeology*, in Bonnard, C., ed. *Landslides, Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides*, Lausanne, Switzerland: Rotterdam, The Netherlands, A.A. Balkema, V., 3-35.


- ICOLD, 1995. *Dam failure statistical analysis*. International Commission of Large Dams (ICOLD), Bulletin 99.
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs – MFFP (2019), *Données Québec, Lidar Produits dérivés*, <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/produits-derives-de-base-du-lidar>
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs – *Directive 019 sur l'industrie minière, mars 2012* - MDDELCC, 2012
http://www.environnement.gouv.qc.ca/milieu_ind/directive019/directive019.pdf
- Ritchey, C., John. 2001. *Embankment Dam Failure Analysis State Assessment Criteria, Issues and Experience Northeastern United States*. State of New Jersey Department of Environmental Protection Dam Safety Section. Presented in the Federal Emergency management Agency (FEMA) Workshop, June 26-28, 2001 Oklahoma City, OK.
- USACE, 2016a. *Hydrologic Modelling System HEC-HMS – User's Manual Version 4.2*. US Army Corps of Engineers. August 2016.
- USACE, 2016b. *HEC-RAS River Analysis System – User's Manual Version 5.0*. US Army Corps of Engineers. February 2016.
- WSP, 2017. *Étude d'impact sur l'environnement. Projet Horne 5, Rouyn-Noranda, Québec*. Dossier : 3211-16-018.

Page Signatures

Golder Associés Ltée



Hayet Chaouche, ing.jr
Ingénieure junior ressources en eau



Vlad Rojanschi, Dr.-Ing., ing
Associé, ingénieur ressources en eau



Yves Boulianne., ing
Associé, ingénieur senior en géotechnique

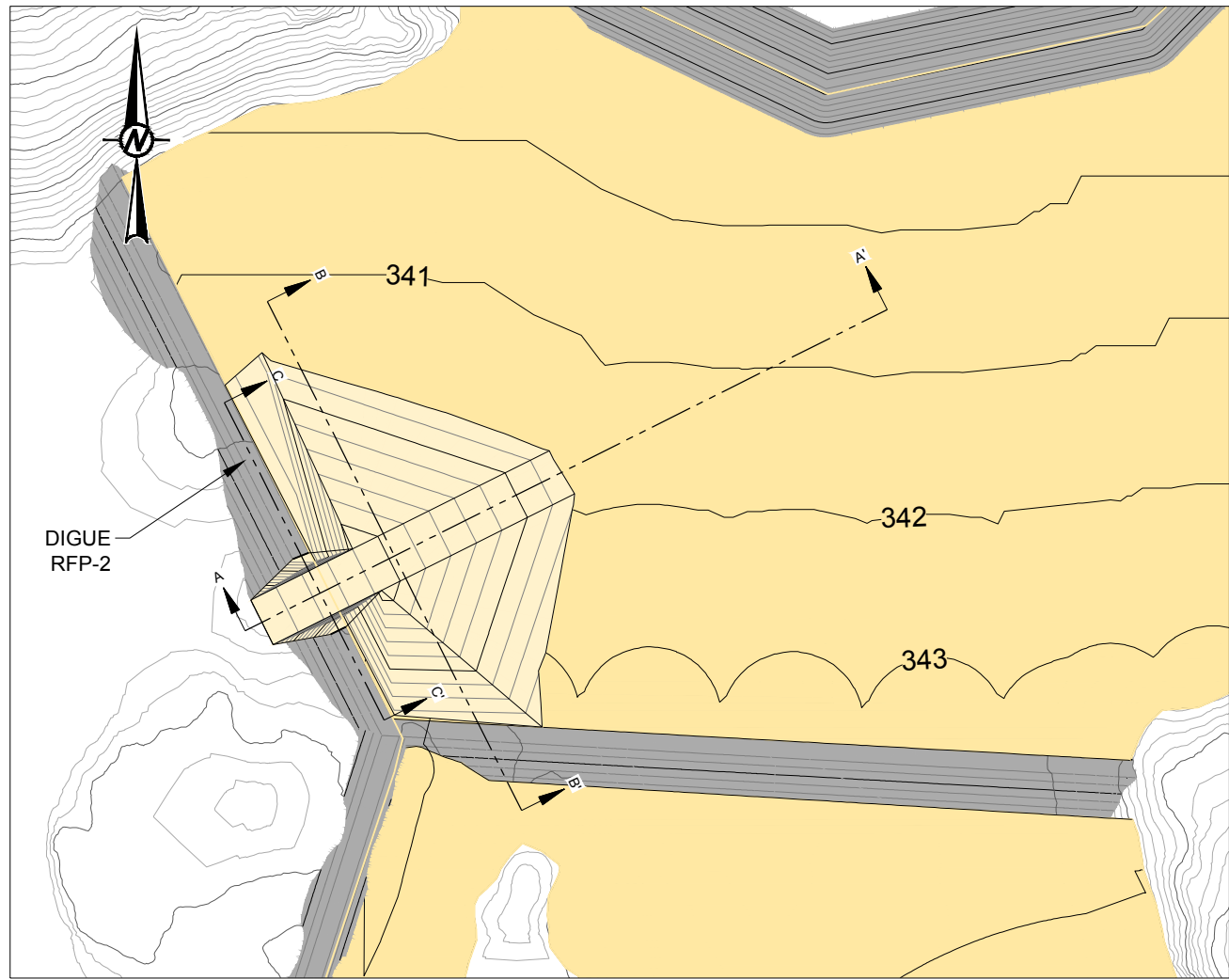
HC/VR/YB/cd

Golder et le concept G sur son logo sont des marques de commerce de Golder Associates Corporation

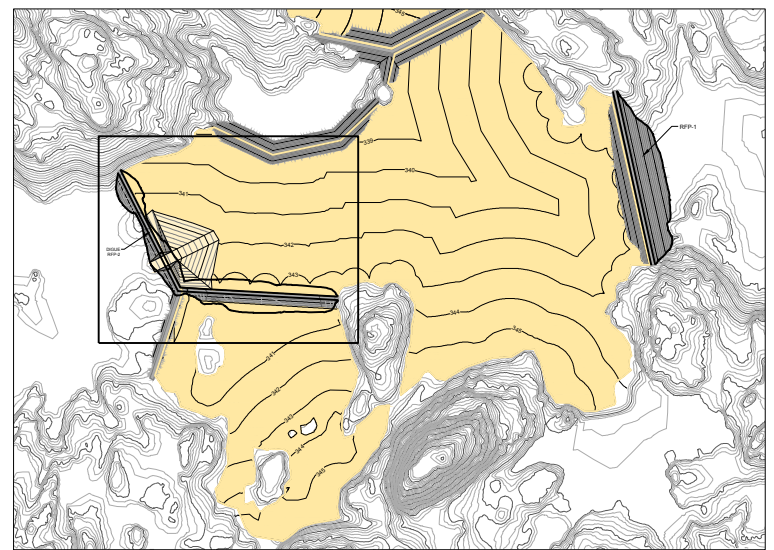
ANNEXE A

**Géométrie des brèches
et surfaces de rupture**

Chemin:\ygalco\res\projets\1725999\19004\19004_07.dwg | Nom du fichier: 19125999-19004-07.dwg | Dernière édition par: gravel | Date: 2019-11-28 | Heures: 11:04:09 | Imprimé par: gravel | Date: 2019-12-04 | Heures: 3:37:51



VUE EN PLAN
ÉCHELLE 1:5 000

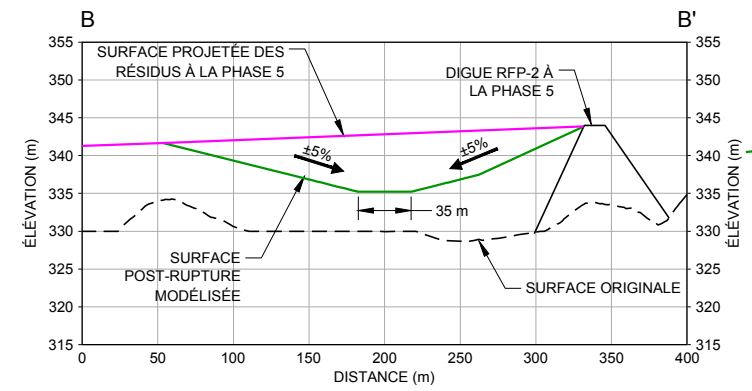


VUE GÉNÉRALE
ÉCHELLE 1:25 000

NOTE

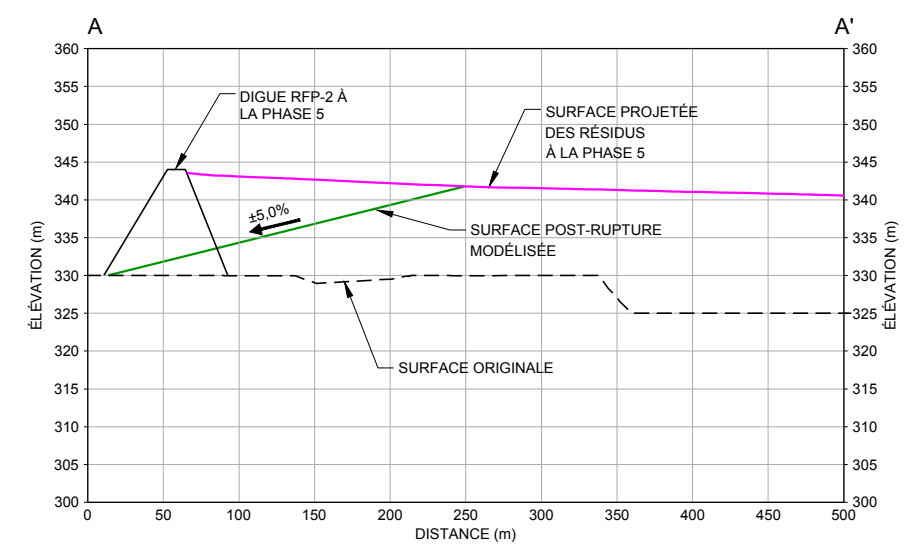
1. LE PIED AVAL DE LA DIGUE SE SITUE À 325 m AU POINT LE PLUS BAS, CE QUI CORRESPOND À UNE HAUTEUR MAXIMALE DE DIGUE DE 19 m ENVIRON. AFIN DE MAXIMISER LE VOLUME DE RÉSIDUS SORTANT, LA BRÈCHE A ÉTÉ SITUÉE AU CENTRE DE LA DIGUE (OÙ L'ÉLEVATION DU PIED DE LA DIGUE EST DE 315 m).

RÉFÉRENCE
TOPOGRAPHIE LIDAR FOURNIE PAR LE CLIENT (2016).



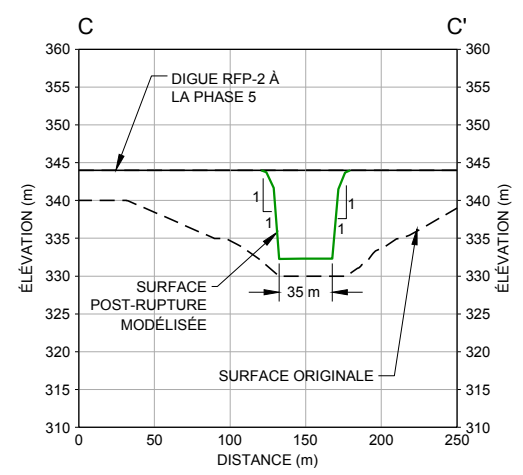
ÉCHELLE HORIZONTALE 1:5 000
ÉCHELLE VERTICALE 1:1 000

B SECTION B-B'



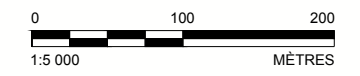
ÉCHELLE HORIZONTALE 1:5 000
ÉCHELLE VERTICALE 1:1 000

A SECTION A-A'



ÉCHELLE HORIZONTALE 1:5 000
ÉCHELLE VERTICALE 1:1 000

C SECTION C-C'



CONFIDENTIEL

CLIENT: **FALCO RESOURCES**

CONSULTANT: **GOLDER**

AAAA-MM-JJ	2019-12-04
DESSINÉ	R. Gravel
PROJETÉ	H. Chaouche
RÉVISÉ	H. Chaouche
APPROUVÉ	V. Rojanschi

PROJET: ANALYSE DE BRIS DE DIGUE
SITE NORBEC, HORNE-5

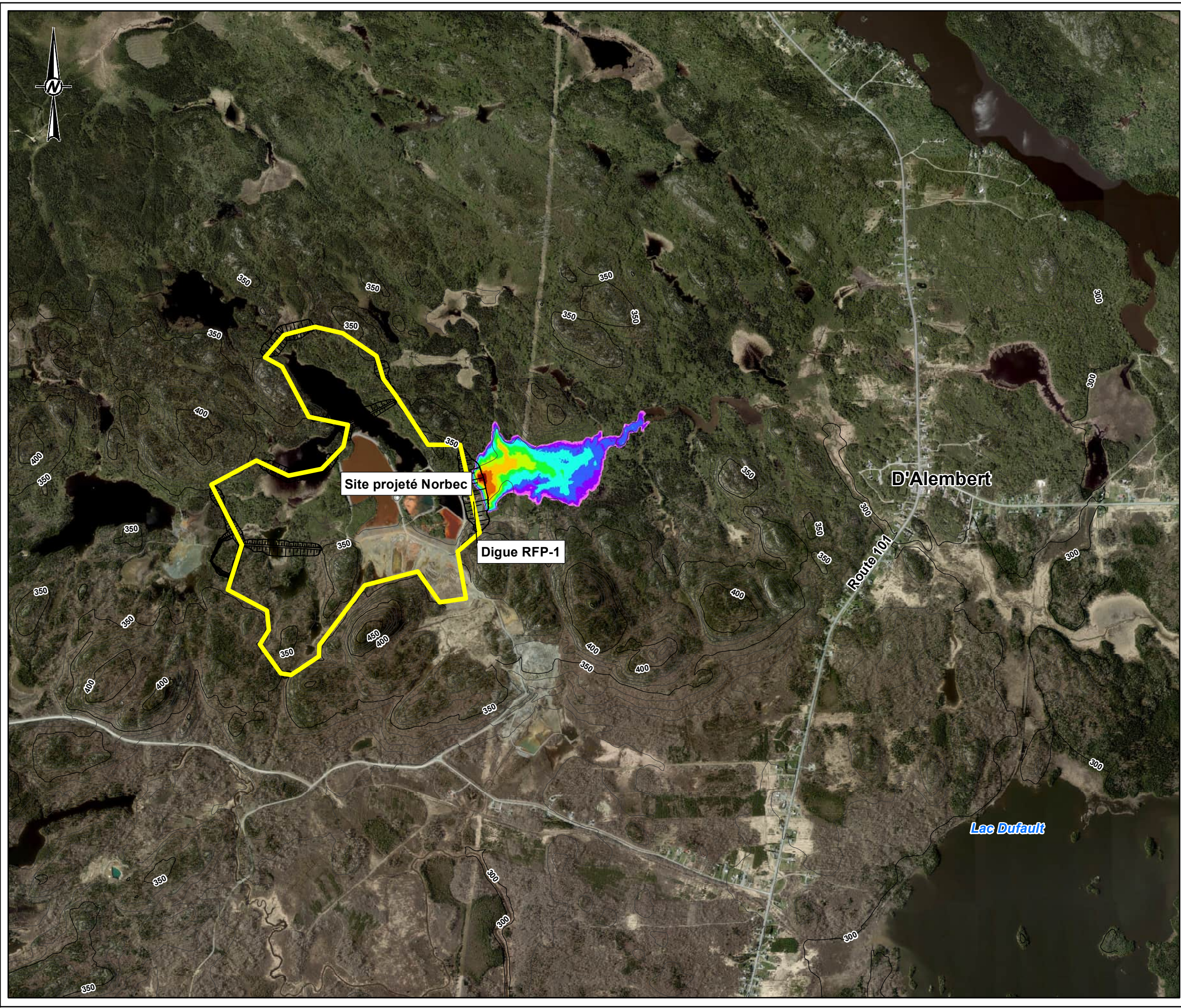
TITRE: GÉOMÉTRIE DE LA BRÈCHE ET SURFACE POST-RUPTURE - DIGUE RFP-2 APPROCHE GÉOMÉTRIQUE

N° PROJET	PHASE	RÉV.	FIGURE
1787678	2100	1	2

SI LA MESURE NE CORRESPOND PAS À L'ÉCHELLE, LA TAILLE DE LA FEUILLE A ÉTÉ MODIFIÉE. ANS B

ANNEXE B

**Résultats de modélisation
numérique**



LÉGENDE

- CONTOUR D'ÉLÉVATION (50 m)
- CONTOUR D'ÉLÉVATION (10 m)

PROFONDEUR MAXIMALE DE RÉSIDUS AU-DESSUS DE L'ÉLÉVATION DU TERRAIN NATUREL (m)

- 0-1
- 1-2
- 2-3
- 3-4
- 4-6
- 6-8
- 8-10
- 10-12,5
- 12,5-15
- 15+

CONFIDENTIEL



NOTES

1. LA PLAINE INONDABLE RÉSULTANTE DE LA RUPTURE DE LA DIGUE A ÉTÉ DÉTERMINÉE AVEC LE LOGICIEL DE MODÉLISATION FLOW-3D.
2. LES DONNÉES TOPOGRAPHIQUES UTILISÉES CONSISTENT EN LES DONNÉES LIDAR 2016 ET LA CARTOGRAPHIE 1 :20 000 DU MERN.

RÉFÉRENCE

SOURCE: IMAGERIE © BING.
 SYSTÈME DE COORDONNÉES: NAD 1983 UTM ZONE 17N.

CLIENT



PROJET

ANALYSE DE BRIS DE DIGUES, SITE NORBEC, HORNE-5

TITRE

**SCÉNARIO 1
 RUPTURE DE LA DIGUE RFP-1 - RÉSULTATS DE SIMULATION NUMÉRIQUE**

CONSULTANT



AAAA-MM-JJ	2019-12-04
PROJETÉ	H. CHAOUCHE
SIG	R. GRAVEL
VÉRIFIÉ	H. CHAOUCHE
APPROUVÉ	V. ROJANSCHI

PROJET
1787678

PHASE
2100

Rev.
1

FIGURE
1

V:\SIBKO\GR\FALCO\SIBKO\Dam_Breach_Analyse\Figure_1_Scenario1.mxd

