

RAPPORT D'ENQUÊTE

VERSION DÉPERSONNALISÉE

**Accident mortel survenu à un travailleur
de l'entreprise EBC inc., le 9 décembre 2016, au chantier
de l'aménagement du complexe hydroélectrique de la
Romaine situé au nord de Havre-Saint-Pierre**

Direction régionale de la Côte-Nord

Inspecteurs :

_____ **Stéphan Lalancette**

_____ **Serge Vibert, ing.**

Date du rapport : 27 novembre 2017

Rapport distribué à :

- Monsieur Mathieu Bolullo, ing., directeur de projet, Hydro-Québec
- Monsieur [A], [...], EBC inc.
- M^e Bernard Lefrançois, coroner
- D^r Stéphane Trépanier, directeur de santé publique, CISSS Côte-Nord
- Centrale des syndicats démocratiques (CSD – Construction)
- Conseil provincial du Québec des métiers de la construction International (CPQMCI)
- Confédération des syndicats nationaux (CSN – Construction)
- Fédération des travailleurs et des travailleuses du Québec (FTQ – Construction)
- Syndicat québécois de la construction (SQC)

TABLE DES MATIÈRES

1	<u>RÉSUMÉ DU RAPPORT</u>	1
2	<u>ORGANISATION DU TRAVAIL</u>	3
2.1	STRUCTURE GÉNÉRALE DU CHANTIER	3
2.1.1	MAÎTRE D'ŒUVRE – HYDRO-QUÉBEC	3
2.1.2	EMPLOYEUR-CONTRACTANT – EBC INC.	4
2.2	ORGANISATION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ DU TRAVAIL	5
2.2.1	MÉCANISMES DE PARTICIPATION	5
2.2.2	GESTION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ	6
3	<u>DESCRIPTION DU TRAVAIL</u>	8
3.1	DESCRIPTION DU LIEU DE TRAVAIL	8
3.2	DESCRIPTION DU TRAVAIL À EFFECTUER	9
4	<u>ACCIDENT: FAITS ET ANALYSE</u>	10
4.1	CHRONOLOGIE DE L'ACCIDENT	10
4.2	CONSTATATIONS ET INFORMATIONS RECUEILLIES	10
4.2.1	LE TRAVAILLEUR ACCIDENTÉ	10
4.2.2	RÉALISATION DES TRAVAUX	10
4.2.3	L'EFFONDREMENT	15
4.2.4	INFORMATIONS RECUEILLIES DU RAPPORT D'EXPERTISE DE SRK CONSULTING (CANADA) (ANNEXE D)	19
4.2.5	INFORMATIONS TIRÉES DES EXTRAITS DE RECHERCHES LITTÉRAIRES (ANNEXE C)	20
4.2.6	ÉTUDES GÉOTECHNIQUES D'HYDRO-QUÉBEC	21
4.3	ÉNONCÉS ET ANALYSE DES CAUSES	26
4.3.1	UN VOLUME DE ROCHE INSTABLE S'EFFONDRE ET ÉCRASE UN TRAVAILLEUR DANS SA PELLE HYDRAULIQUE.	26
4.3.2	LES ÉTUDES GÉOTECHNIQUES ET LES MOYENS DE CONTRÔLE DU DANGER D'EFFONDREMENT SONT INSUFFISANTS ET MÈNENT À LA CHUTE D'UN VOLUME DE ROCHE NON IDENTIFIÉ	27
5	<u>CONCLUSION</u>	31
5.1	CAUSES DE L'ACCIDENT	31
5.2	AUTRES DOCUMENTS ÉMIS LORS DE L'ENQUÊTE	31
5.3	SUIVI À L'ENQUÊTE	32

ANNEXES

ANNEXE A :	Accidenté	33
ANNEXE B :	Plan et photos	34
ANNEXE C :	Extraits de recherches littéraires	39
ANNEXE D :	Liste des personnes et des témoins rencontrés	47
ANNEXE E :	Rapport d'expertise	48
ANNEXE F :	Extrait du programme de prévention du maître d'oeuvre	64
	Projet de la Romaine	
ANNEXE G :	Références bibliographiques	69

DÉFINITIONS

Les définitions suivantes s'appliquent dans ce rapport :

Boulon d'ancrage — ancrage précontraint constitué d'une tête d'ancrage, d'une longueur libre de tirant et d'une longueur d'ancrage fixe, scellé par injection.

Boulons de type A — boulon d'ancrage mécanique de 25 mm de diamètre.

Boulons de type C — boulon d'ancrage mécanique de 35 mm de diamètre.

Boulonnage — méthode de soutènement par la mise en place de boulons d'ancrage dans le roc.

Boulonnage planifié — boulons requis par le devis et les dessins contractuels aux endroits préalablement spécifiés. Ce type de boulonnage comprend un patron de forage préétabli.

Boulonnage « si requis » — boulons implantés par l'équipe de géologie d'Hydro-Québec en fonction des joints et des structures géologiques observés immédiatement après leur inspection des parois après excavation. Ce type de boulonnage ne suit aucun patron de forage préétabli.

Cible d'arpentage — technique de surveillance pour détecter de possibles mouvements d'une paroi rocheuse par l'arpentage régulier d'un même point.

Dyke — Masse tabulaire de roches remplissant une fissure.

Employeur-contractant — entreprise ayant un contrat direct avec Hydro-Québec.

Équipe de géologie — équipe de travail composée de géologues, d'ingénieurs géologues et d'un ingénieur minier.

Facteur de sécurité — rapport entre la résistance à la rupture et la sollicitation réelle.

Faïlle — fracture le long de laquelle il y a eu mouvement relatif observable.

Force de cisaillement — force appliquée de manière parallèle ou tangentielle à la surface de la roche.

Géocaméra — relevé d'arpentage s'effectuant au moyen de caméras insérées dans les trous de forage, et ce, afin d'y répertorier les structures du roc sous-jacent.

Joint — fracture dans le roc le long de laquelle il n'y a pas de mouvement relatif observable.

Joint de glissement — glissement de sol couche sur couche dont la géométrie est déterminée par les discontinuités du milieu.

Marinage — phase d'excavation du roc pendant laquelle on évacue les déblais résultant d'un sautage.

SECTION 1

1 RÉSUMÉ DU RAPPORT

DESCRIPTION DE L'ACCIDENT

Dans la soirée du 9 décembre 2016, des travaux d'excavation sont en cours dans le canal d'amenée de la dérivation provisoire Romaine-4. Un opérateur, aux commandes de sa pelle hydraulique, y effectue le chargement de roc dynamité dans des camions. Vers 22 h 50, une roche, du bas de la paroi rocheuse haute de 48 m, tombe sur le site de chargement. Lorsque l'opérateur l'observe et s'en approche aux commandes de sa pelle, une partie de la paroi rocheuse s'effondre, telle une avalanche, et l'ensevelit.

CONSÉQUENCE

Le travailleur décède.

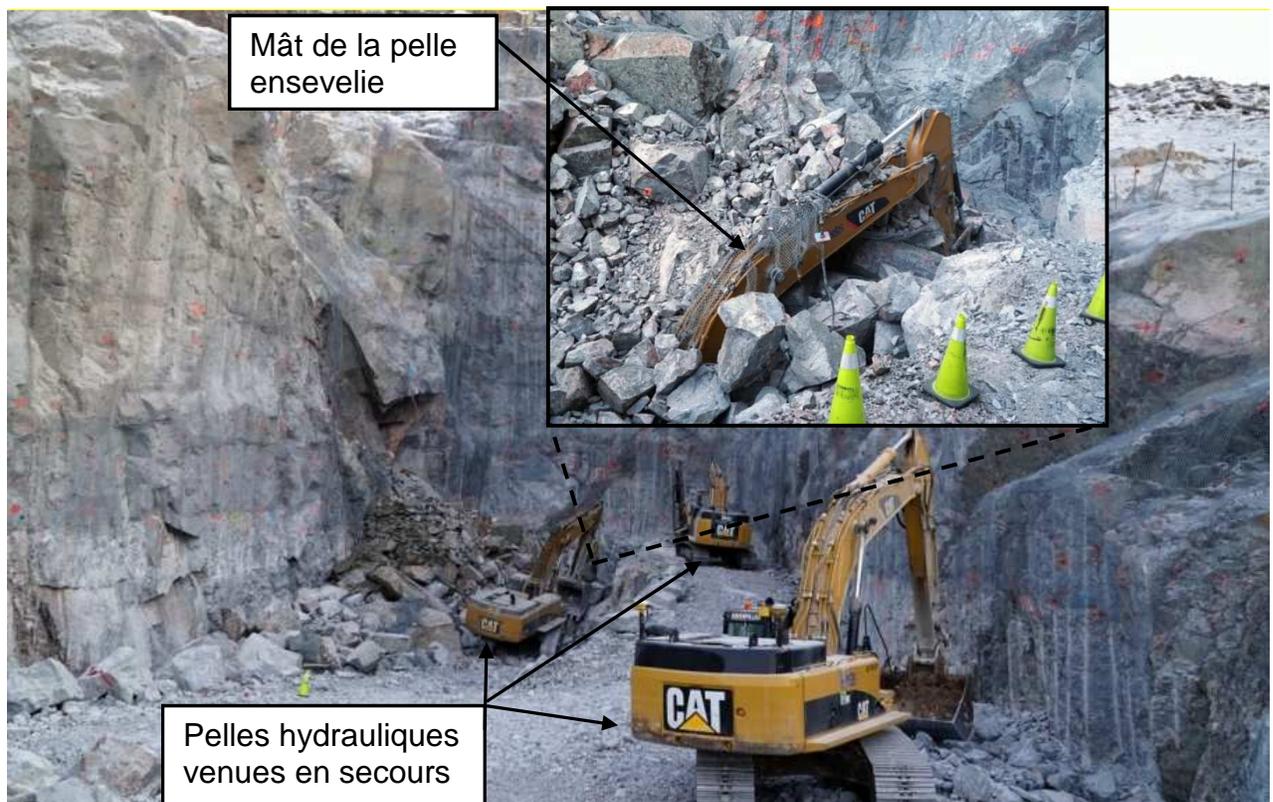


Photo 1 - Lieu de l'accident

ABRÉGÉ DES CAUSES

L'enquête a permis de retenir les causes suivantes :

- Un volume de roches instables s'effondre et écrase un travailleur dans sa pelle hydraulique.
- Les études géotechniques et les moyens de contrôle du danger d'effondrement sont insuffisants et mènent à la chute d'un volume de roches non identifié.

MESURES CORRECTIVES

- Une décision rendue le 10 décembre 2016, consignée dans le rapport RAP1124962, ordonne la fermeture du lieu de travail situé dans l'excavation du canal d'amenée de la dérivation provisoire Romaine-4. Le maître d'œuvre et l'employeur se sont conformés à cette ordonnance.
- Du 13 décembre au 22 décembre 2016, des travaux de sécurisation du site ont été effectués pour permettre la récupération du corps de l'opérateur. Le tout est consigné dans les rapports RAP1123535 et RAP1123538.
- Le 10 février 2017, un accès partiel est accepté dans l'excavation du canal d'amenée de la dérivation provisoire suite au dépôt d'une méthode de travail. Les travaux autorisés consistent à la construction d'une rampe sur le côté gauche de l'excavation et des travaux sur le haut du mur gauche au-dessus du niveau de la rampe. Le reste de l'excavation demeure interdite d'accès. Le tout est consigné dans le rapport RAP1123539.
- Le 13 mars 2017, suite à la réception du rapport d'expertise de l'ingénieur Denis Thibodeau de l'entreprise SRK Consulting (Canada) inc., les conditions de reprise des travaux sont signifiées au maître d'œuvre et consignées dans le rapport RAP1123540.
- Le 30 mars 2017, une rencontre a lieu entre la CNESST, des représentants d'Hydro-Québec, des représentants des travailleurs et M. Thibodeau pour faire une mise au point des conditions de reprise des travaux et présenter les recommandations du rapport d'expertise pour les travaux souterrains de la galerie de la dérivation à venir. Il est précisé qu'un facteur de sécurité minimal de 1,5 doit être utilisé à la place de celui de 1,3 étant donné que la dérivation ne peut être considérée comme un ouvrage temporaire, mais plutôt permanent, avec ses travaux répartis sur une période de trois ans. Le tout est consigné au rapport d'intervention RAP1176062.
- Le 23 mai 2017, il est demandé à Hydro-Québec de s'assurer que ce genre de travaux se déroulent de façon sécuritaire sur l'ensemble du chantier, et d'apporter des modifications au programme de prévention du maître d'œuvre à l'article 5.7 et aux annexes 19 et 20 qui traitent de l'excavation du roc. Le tout est consigné dans le rapport d'intervention RAP1182372.

Une décision rendue le 29 juin 2017, consignée dans le rapport RAP1187922, autorise la reprise des travaux du canal d'amenée de la dérivation provisoire Romaine-4.

Le présent résumé n'a pas de valeur légale et ne tient lieu ni de rapport d'enquête, ni d'avis de correction ou de toute autre décision de l'inspecteur. Il constitue un aide-mémoire identifiant les éléments d'une situation dangereuse et les mesures correctives à apporter pour éviter la répétition de l'accident. Il peut également servir d'outil de diffusion dans votre milieu de travail.

SECTION 2

2 ORGANISATION DU TRAVAIL

2.1 STRUCTURE GÉNÉRALE DU CHANTIER

2.1.1 Maître d'œuvre – Hydro-Québec

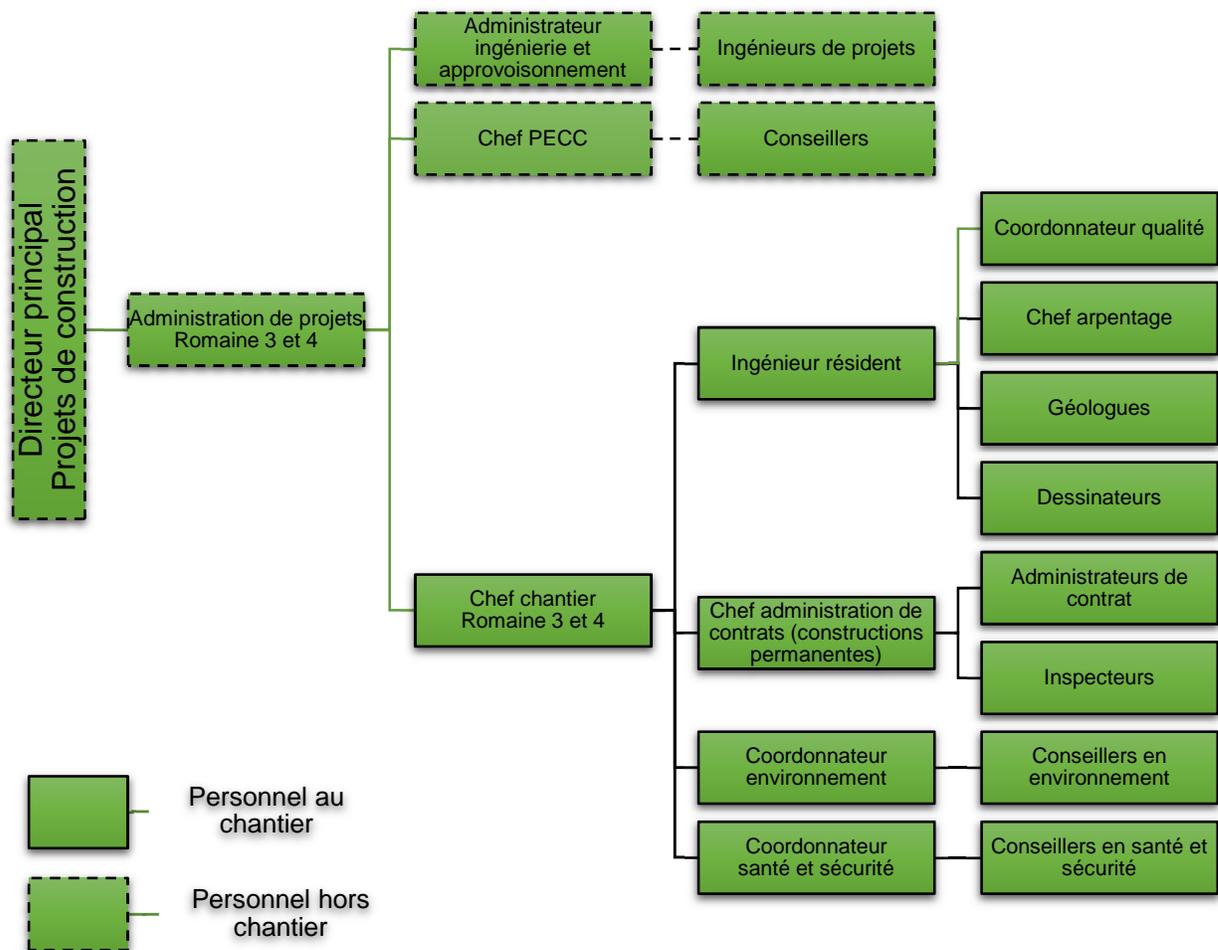
Hydro-Québec est le maître d'œuvre sur le chantier de construction de l'aménagement d'un complexe hydroélectrique de 1 550 MW, comprenant notamment quatre centrales et quatre barrages, sur la rivière Romaine, au nord de Havre-Saint-Pierre. Le coût des travaux est estimé à 6,5 milliards de dollars. La construction du complexe doit se terminer vers 2020. En 2016, il y a environ 1 800 travailleurs sur le chantier à la pointe des travaux.

Hydro-Québec confie à plusieurs entrepreneurs la construction des ouvrages requis (Annexe B – Plans B1 et B2).

Hydro-Québec est responsable de la production des plans et devis pour les différentes étapes du chantier, et s'assure que les employeurs-contractants les respectent. Une équipe d'inspecteurs du maître d'œuvre est affectée à la conformité des travaux.

Hydro-Québec s'assure, par ses équipes de géologie et de santé et sécurité, que les lieux de travail soient sécuritaires.

Toutes ses équipes relèvent du chef chantier.



**Organigramme d'Hydro-Québec
simplifié pour les besoins de l'enquête**

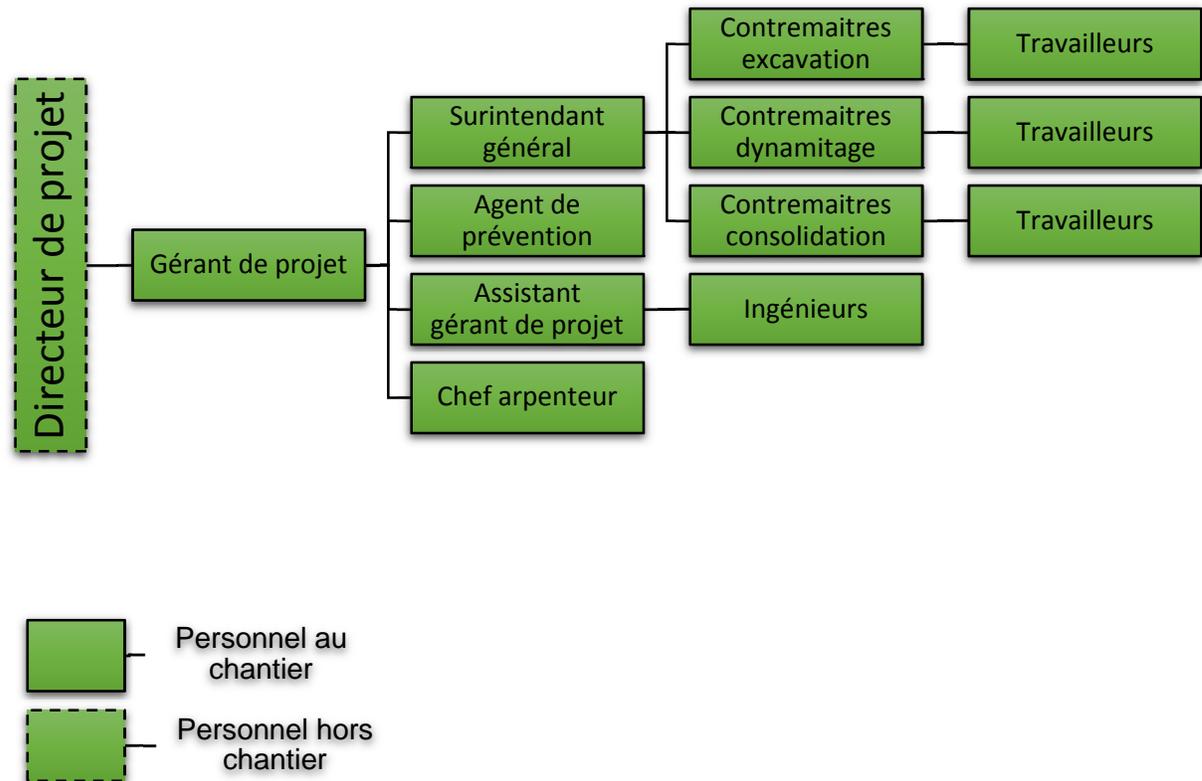
2.1.2 Employeur-contractant – EBC inc.

EBC inc., une entreprise de L'Ancienne-Lorette, est spécialisée dans la construction de bâtiments et d'ouvrages de génie civil.

Cette entreprise est responsable de l'excavation et du bétonnage de la dérivation provisoire à la Romaine-4 en vertu du contrat R4-06-01. Celui-ci se déroulera de septembre 2016 à juin 2017 et une pointe de 50 travailleurs seront à l'œuvre pour ses travaux.

Une gérante de projet, une conseillère en prévention et un surintendant général sont sur le chantier et s'occupent de gérer, notamment, les volets production et santé et sécurité.

Le personnel d'EBC suit les directives d'Hydro-Québec pour ce qui est de la stabilité des parois rocheuses.



**Organigramme d'EBC inc.
simplifié pour les besoins de l'enquête**

2.2 ORGANISATION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ DU TRAVAIL

2.2.1 Mécanismes de participation

Hydro-Québec

Un comité de chantier est en place et se rencontre toutes les deux semaines. Un représentant du maître d'œuvre, de chaque employeur-contractant présent au chantier, de chaque association représentative et les délégués de chantier font partie du comité. Chaque membre rapporte au maître d'œuvre les problèmes de santé ou de sécurité relatifs à leurs travaux et un suivi y est effectué.

Un agent de sécurité du maître d'œuvre et un représentant des travailleurs effectuent des inspections conjointes auprès des entreprises œuvrant sur le chantier.

De façon régulière, l'Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail du secteur de la construction (ASP Construction) dispense des formations sur différents sujets concernant la santé et la sécurité au travail sur les chantiers.

EBC inc.

Les contremaitres tiennent des réunions de début de quart avec leurs équipes de travailleurs où différents sujets relatifs à la santé et la sécurité y sont discutés. Des pauses-sécurité sont également tenues chaque semaine, mais pas nécessairement sur tous les quarts de travail. Celles-ci traitent de différents sujets, dont de l'information pouvant provenir du comité de chantier. Enfin, généralement deux représentants de l'employeur et un représentant des travailleurs assistent au comité de chantier.

2.2.2 Gestion de la santé et de la sécurité

Maitre d'œuvre

Le département d'ingénierie du maitre d'œuvre est responsable de produire les études préalables et les documents nécessaires à la réalisation des ouvrages. Les méthodes de travail des entrepreneurs découlent directement de ces informations.

Hydro-Québec a un programme de prévention pour l'ensemble des travaux. Il a été déposé à la CNESST le 31 mars 2010. Dans ce document, plusieurs éléments sont prévus, dont :

- Chaque employeur-contractant au chantier doit déposer son programme de prévention au moins dix jours avant le début de ses travaux.
- Chaque employeur-contractant au chantier doit nommer un représentant en santé et sécurité qui est chargé de l'application de son programme de prévention spécifique.
- Tous les nouveaux travailleurs du chantier reçoivent une session d'accueil présentant les principaux éléments de son programme de prévention.
- Des agents de sécurité sont affectés aux différents secteurs du chantier afin de s'assurer du respect de son programme de prévention. Leurs tâches sont gérées par un chef d'équipe santé et sécurité.
- Les employeurs-contractants doivent déposer au maitre d'œuvre des méthodes de travail pour certains travaux spécifiques. Celles-ci sont validées par les départements santé et sécurité au travail, environnement et ingénierie du maitre d'œuvre qui sont à pied d'œuvre sur le site.
- Les employeurs-contractants doivent utiliser l'article 5.7 et les annexes 19 et 20 de ce programme concernant les excavations dans le roc (Annexe F).

Le maitre d'œuvre détient une certification OHSAS 18001 *Systèmes de management de la santé et de la sécurité au travail*.

Hydro-Québec établit un plan d'action annuel pour ses travaux de construction. En 2016, les dangers prioritaires sont la prévention des blessures aux mains et la bonne tenue des lieux.

Depuis le début des travaux sur ce chantier, l'événement actuel est le quatrième accident mortel à survenir.

Employeur-contractant

EBC a déposé un programme de prévention pour le contrat R4-06-01 *Excavation et bétonnage de la dérivation provisoire*. Il est divisé en plusieurs sections dont la description du projet, la politique de l'entreprise, la formation et l'information ainsi que l'accueil des travailleurs qui présente entre autres les pratiques générales de travail sécuritaires. L'employeur-contractant donne à chaque nouveau travailleur une session d'accueil pour les règles prévues à son programme de prévention.

Une personne ayant une carte d'agent de sécurité est embauchée à titre de conseiller en prévention. Ce conseiller fait une inspection journalière des lieux de travail et produit un rapport de ses interventions.

SECTION 3

3 DESCRIPTION DU TRAVAIL

3.1 DESCRIPTION DU LIEU DE TRAVAIL

Le site des travaux se situe à l'est de la municipalité de Havre-Saint-Pierre, au canal d'amenée de la dérivation provisoire de Romaine-4, à la hauteur du kilomètre 149 de la route principale du chantier.

En rive gauche, une excavation à flanc de montagne a été faite afin de pouvoir y aménager un canal qui servira à amener le débit d'eau de la rivière vers la galerie de la dérivation provisoire (Image 1). Ce canal a une longueur d'environ 200 m et une hauteur maximale de 54 m au portail amont (entrée de la galerie souterraine) (Tableau 1). La largeur passe de 60 m à la rivière à 22 m au portail. Les parois rocheuses sont à peu près verticales. L'effondrement a eu lieu sur la paroi gauche du canal d'amenée.

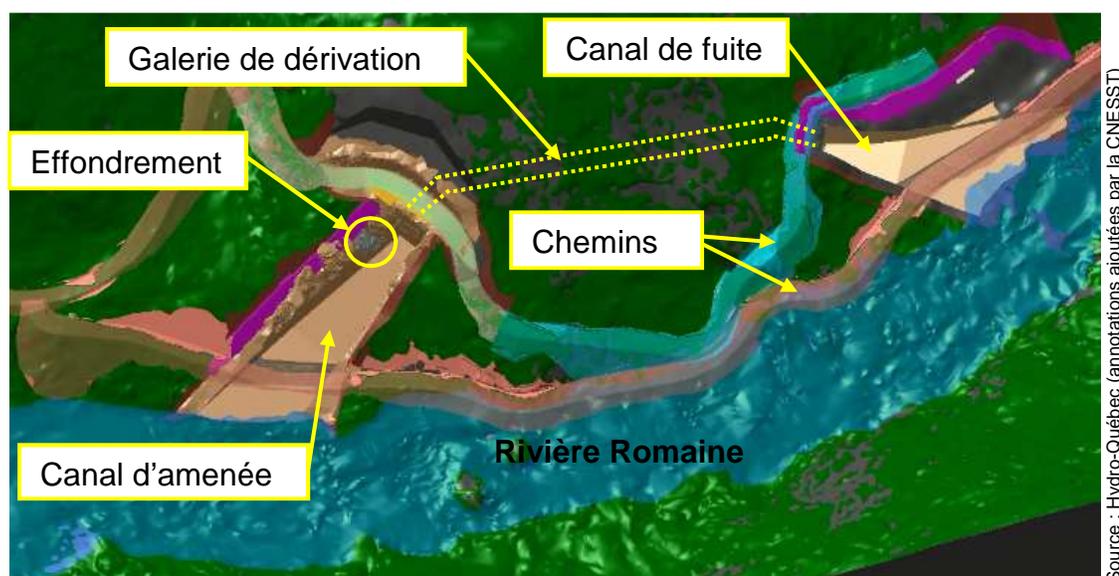


Image 1 - Localisation de l'effondrement et des composantes de la dérivation provisoire

Au moment de l'accident, les sections M10 et M11 de la banquette 7 sont composées de roches dynamitées et la section M12 de la banquette 7 n'est pas encore dynamitée (Plan 2).

Selon Environnement Canada, à l'aéroport de Havre-Saint-Pierre, la température est d'environ -11 °C à 23 h, le jour de l'accident.

Selon Ressources naturelles Canada, aucun séisme n'a eu lieu à moins de 300 km dans les jours précédents l'effondrement.

3.2 DESCRIPTION DU TRAVAIL À EFFECTUER

Après le dynamitage des sections M10 et M11 de la banquette 7, le travail consiste à déblayer le matériel produit.

Pour réaliser ces travaux de déblaiement, une pelle hydraulique et trois camions à benne 50 tonnes sont utilisés.

La pelle hydraulique reliée à l'accident est de marque Caterpillar, modèle 374DL, 2013 et elle possède une structure de protection grillagée au pare-brise de la cabine.

SECTION 4

4 ACCIDENT: FAITS ET ANALYSE

4.1 CHRONOLOGIE DE L'ACCIDENT

Le jour de l'accident vers 12 h, le sautage de la section M10 de la banquette 7 est réalisé par des travailleurs d'EBC. Par la suite, le marinage du roc de cette section est réalisé jusqu'au moment du sautage de la section M11 de la banquette 7 qui est effectué vers 17 h 30.

Vers 19 h, les travailleurs de nuit débutent leur quart de travail. Une réunion de début de quart est réalisée par le contremaître avec les travailleurs. Les travailleurs se rendent par la suite à leur tâche respective. Le marinage des déblais de roc dynamité des sautages M10 et M11 débute. Vers 22 h 50, une roche d'environ 0,4 m³ tombe de la paroi gauche. M. [B], opérateur de pelle, demande par communication radio à M. [C], [...], de venir le voir. M. [B] demande par la suite à M. [D], [...], qui positionne son camion pour se faire charger, de s'avancer étant donné la roche tombée. M. [E], [...], en attente à l'aire de chargement, observe l'opérateur de pelle descendre de sa station de chargement pour s'approcher de la roche tombée et vérifier ce qu'il en est. À ce moment, un important volume du roc de la paroi gauche s'effondre et ensevelit la pelle hydraulique et l'opérateur à ses commandes. Des manœuvres sont réalisées pour secourir l'opérateur jusqu'au moment où l'on constate son décès. Les manœuvres de secours sont aussitôt interrompues étant donné la dangerosité du site où des roches chutent de la paroi et d'autres peuvent chuter à tout moment.

Des travaux pour sécuriser le site de l'accident sont réalisés. Le 23 décembre vers 17 h, le corps de M. [B] est récupéré.

4.2 CONSTATATIONS ET INFORMATIONS RECUEILLIES

4.2.1 Le travailleur accidenté

- Il possède plus de [...] comme opérateur de pelle hydraulique.
- Il possède un certificat de compétence compagnon, opérateur de pelle hydraulique, émis par la Commission de la construction du Québec.
- Il a suivi l'accueil général sur la santé et sécurité d'EBC le [...].

4.2.2 Réalisation des travaux

- L'orientation du mur gauche est de 116° (Tableau 1).

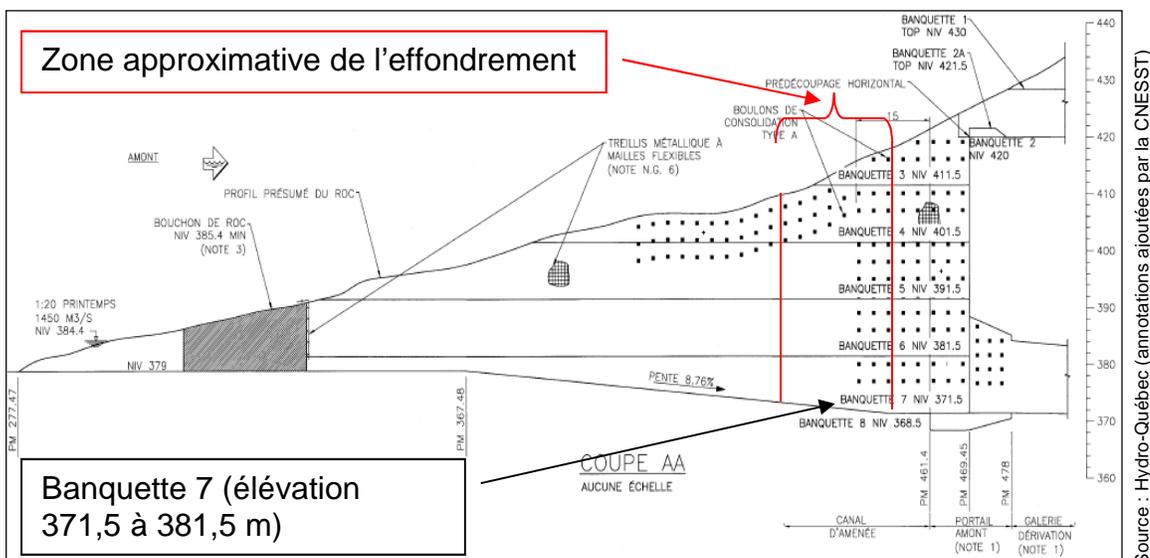
		Orientation de l'axe (règle de la main droite vers l'excavation)		Hauteur (m)	
		Phase 1	Phase 2	Phase 1	Phase 2
Canal d'aménagé	Paroi amont	N211°	N199°	48,5 m	48,5 m
	Paroi gauche	N128°, N121° ⁽¹⁾	N116°	0 à 55 m	0 à 54 m
	Paroi droite	N296°, N301° ⁽¹⁾	N284°	0 à 48 m	0 à 53 m

⁽¹⁾Orientation des parois au droit du portail amont

Source : Hydro-Québec

Tableau 1 - Géométrie des parois de la dérivation provisoire

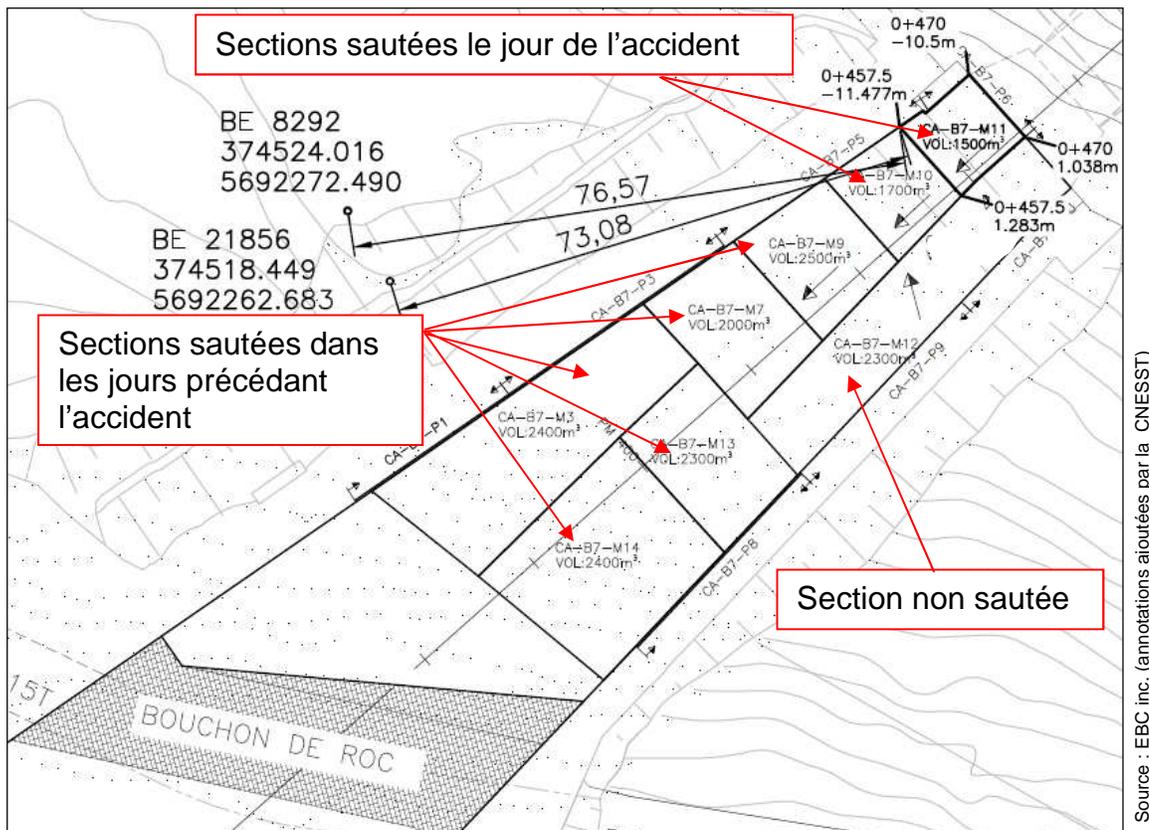
- La méthode de travail *R4-06-01-ENT-MET-0003 rév. A Méthode d'excavation de roc à ciel ouvert* produite par EBC et acceptée par le maître d'œuvre est celle appliquée pour la réalisation de cette excavation. Elle est muette concernant les observations obligatoires de l'équipe de géologie entre chaque sautage de sections adjacentes.
- Initialement, les dépôts de mort-terrain sont retirés jusqu'à 5 m au-delà du sommet de la ligne d'excavation du roc dans le but qu'il n'y ait aucun matériel lâche en bordure des parois.
- Les structures géologiques des parois rocheuses sont cartographiées par l'équipe de géologie d'Hydro-Québec au fur et à mesure de l'excavation.
- L'excavation du canal d'aménagé sur toute sa hauteur est divisée en sept tranches horizontales appelées banquettes (Plan 1).



Source : Hydro-Québec (annotations ajoutées par la CNESST)

Plan 1 - Vue en coupe de la paroi gauche

- La hauteur normale d'excavation d'une banquette est de 10 m.
- L'excavation de la banquette 7 en cours lors de l'accident se divise en plusieurs sections (Plan 2).



Plan 2 - Vue en plan des sections d'excavation de la banquette 7

- Lors de l'excavation de la banquette 5 le 21 novembre 2016, un effondrement d'une plus petite envergure à celle de l'accident a eu lieu au moment de l'écaillage mécanique où une surexcavation sous une partie de roc consolidé a mené à l'effondrement de cette partie.
- Les joints défavorables présents dans la paroi gauche ont mené à une excavation d'un volume de roc d'environ 8 000 m³ supplémentaire à ce qui était prévu à la conception. Cela a produit une pente d'environ 45° sur les 25 premiers mètres de hauteur et plus large d'environ 37 m au sommet de la paroi gauche (Image 2).

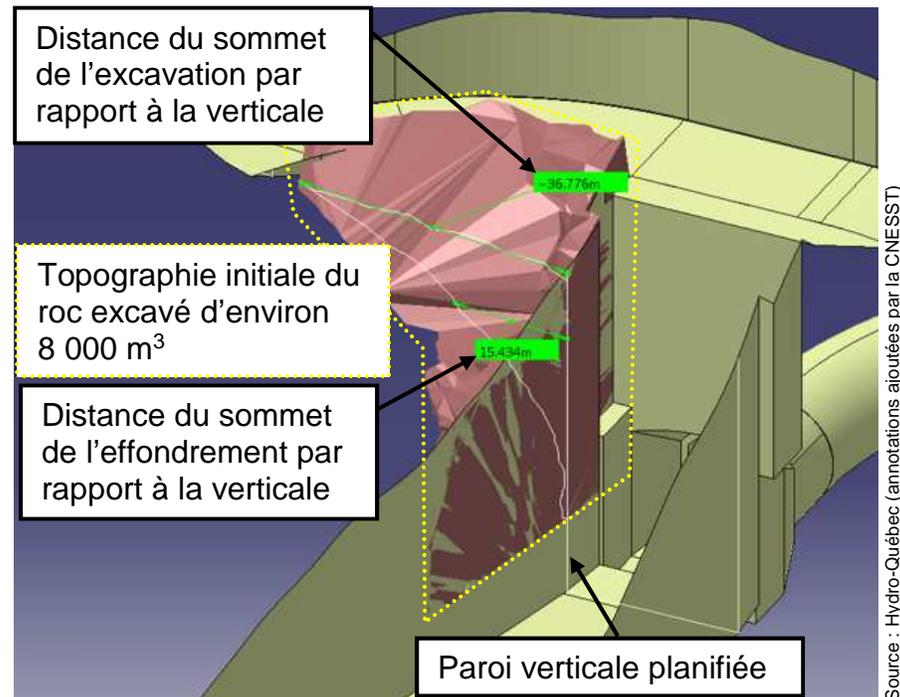


Image 2 - Volume supplémentaire excavé non prévu au moment de la conception

- Le 3 décembre 2016, Hydro-Québec a demandé à EBC dans sa correspondance n° R4-06-01 DB MEMO 58 d'installer trois cibles d'arpentage sur la paroi gauche entre les points métriques (PM) 440 et 465 (Image 3).
- Aux environs des PM 433 à 440, les orientations et les pendages des joints et du dyke d'environ 1 m d'épaisseur qui y sont présents ne causent pas de danger d'effondrement selon le jugement de l'équipe de géologie.
- Un journal de forage est complété par les foreurs d'EBC.
- Ces journaux ne sont pas transmis à l'équipe de géologie pour bonifier leur connaissance sur l'état du roc en cours d'excavation.

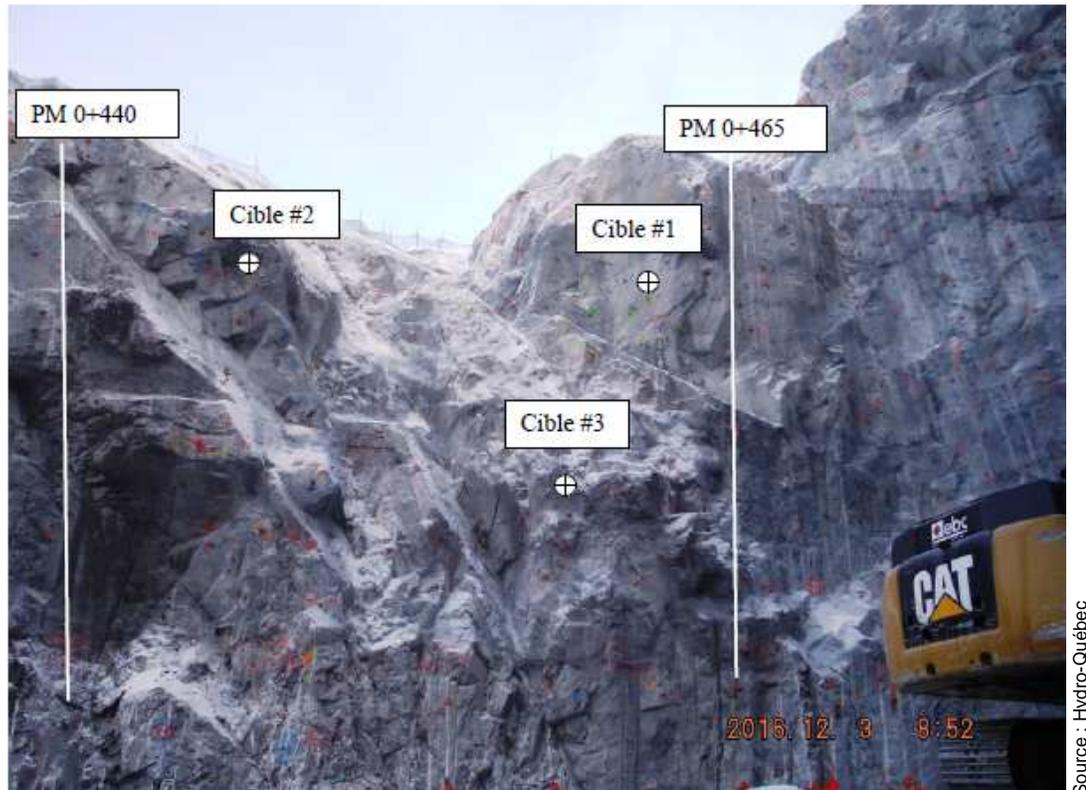


Image 3 - Localisation des trois cibles d'arpentage sur la paroi gauche selon la correspondance no R4-06-01 DB MEMO 58

- Le 9 décembre 2016, la cible n° 3 est mise en place sur la paroi (Images 3 et 4).
- Aucun suivi par relevé d'arpentage de cette cible n'a été réalisé avant l'effondrement pour détecter la présence d'un mouvement.
- Les cibles n°s 1 et 2 sont absentes de la paroi (Image 3).
- La localisation prévue de la cible n° 2 sur l'image du mémo se retrouve dans la zone du volume de roche de l'effondrement (Image 3).
- EBC produit des plans de sautage (PSA) pour le sautage des différentes sections des sept banquettes du canal d'amenée.
- Hydro-Québec effectue une vérification de conformité de chacun des PSA.
- EBC produit le PSA du sautage n° CA-B7-M10 le 7 décembre 2016.
- Hydro-Québec vérifie le PSA n° CA-B7-M10 le 7 décembre 2016.
- EBC produit le PSA du sautage n° CA-B7-M11 le 8 décembre 2016.
- Hydro-Québec vérifie le PSA n° CA-B7-M11 le 9 décembre 2016.
- Pour informer l'ensemble des personnes œuvrant sur le chantier du moment où auront lieu les sautages CA-B7-M10 et CA-B7-M11, EBC envoie par courriel aux divers

représentants de toutes les entreprises présentes sur le chantier l'avis de sautage n° 81 le 8 décembre 2016.

- L'avis de sautage n° 81 informe que deux sautages auront lieu le 9 décembre, soit à 12 h et à 17 h 30.
- Les sautages des sections M10 et M11 ont lieu le 9 décembre aux heures prévues.
- Les dernières observations géologiques réalisées par l'équipe de géologie ont eu lieu avant le sautage de la section M10.

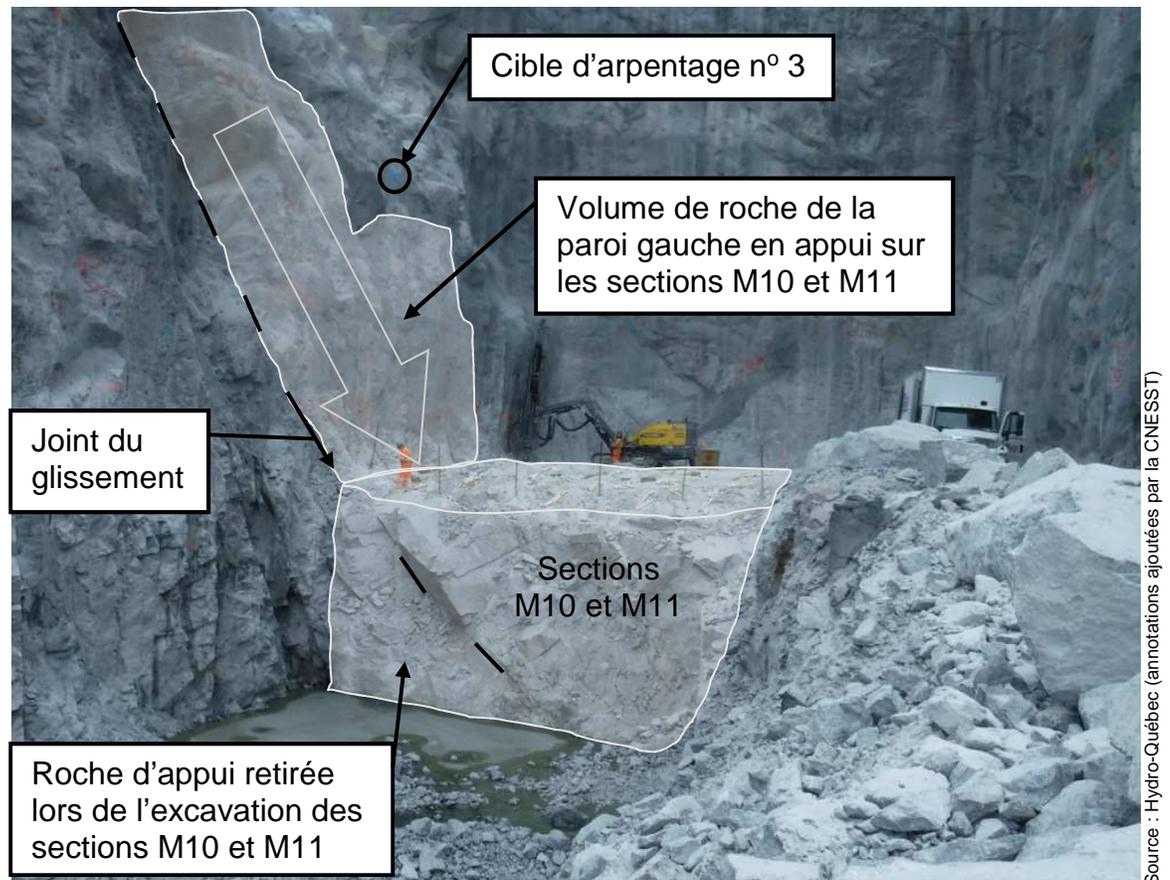


Image 4 - Photo prise le jour de l'accident avant les sautages des sections M10 et M11

4.2.3 L'effondrement

- Il est localisé approximativement entre les PM 433 et 455 (Image 5).
- Il est d'une longueur d'environ 22 m.
- Il est localisé approximativement entre les élévations 375 et 410.
- Il est d'une hauteur d'environ 35 m.
- Sa surface à sa base ne peut être identifiée étant donné l'accumulation des débris rocheux.

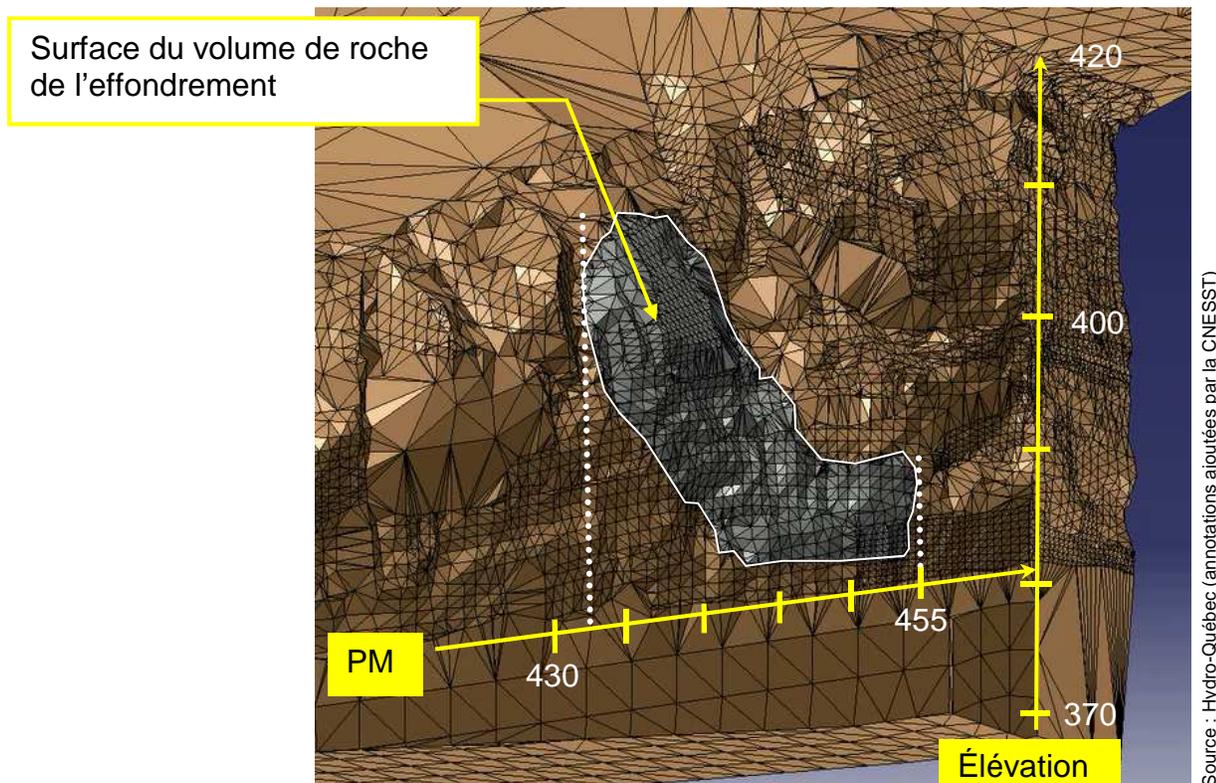


Image 5 - Localisation approximative de la surface du volume de roche de l'effondrement

- Le boulonnage présent est composé de dix-huit boulons d'ancrage de type A de 4 m de long, de huit boulons d'ancrage de type A de 6 m de long et de cinq boulons d'ancrage de type C de 8 m de long.
- Ce boulonnage n'est pas prévu pour la consolidation d'un volume de roche de 8 000 m³.
- L'épaisseur maximale du bloc de roc s'étant effondré est d'environ 8 m (Image 6).

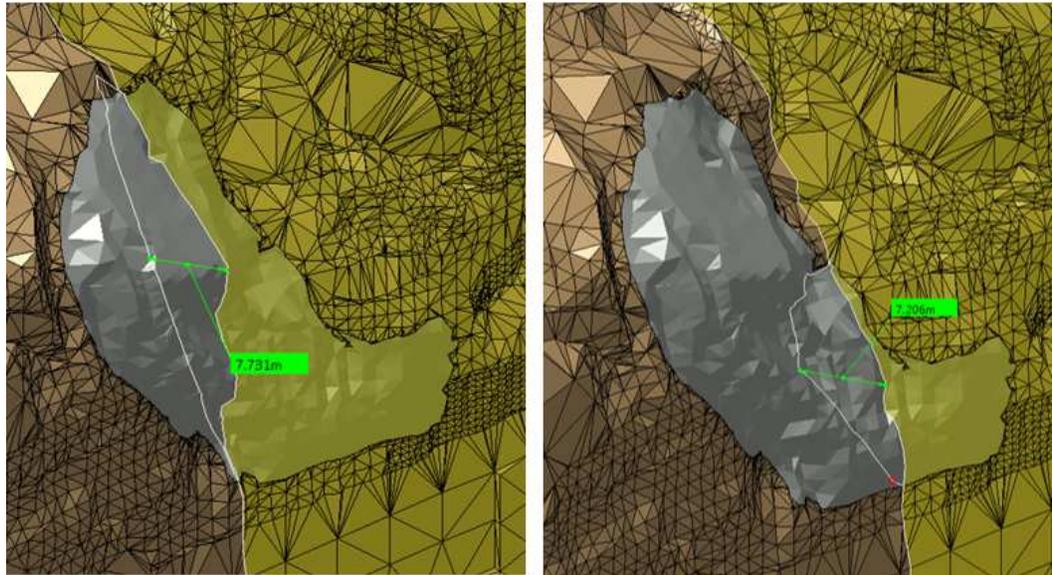


Image 6 - Représentation de l'épaisseur du bloc de roche de l'effondrement

- Le volume de l'effondrement est estimé à 1 600 m³ et à un poids de 4 300 000 kg.
- Le joint mesuré sur la paroi avant l'accident à un pendage de 60° et une direction de pendage de 155° (Image 7).
- Selon la photogrammétrie du joint de glissement de l'amont vers l'aval, le pendage varie de 58° à 69° et la direction de pendage bifurque à l'intérieur du roc en variant de 161° à 182°.

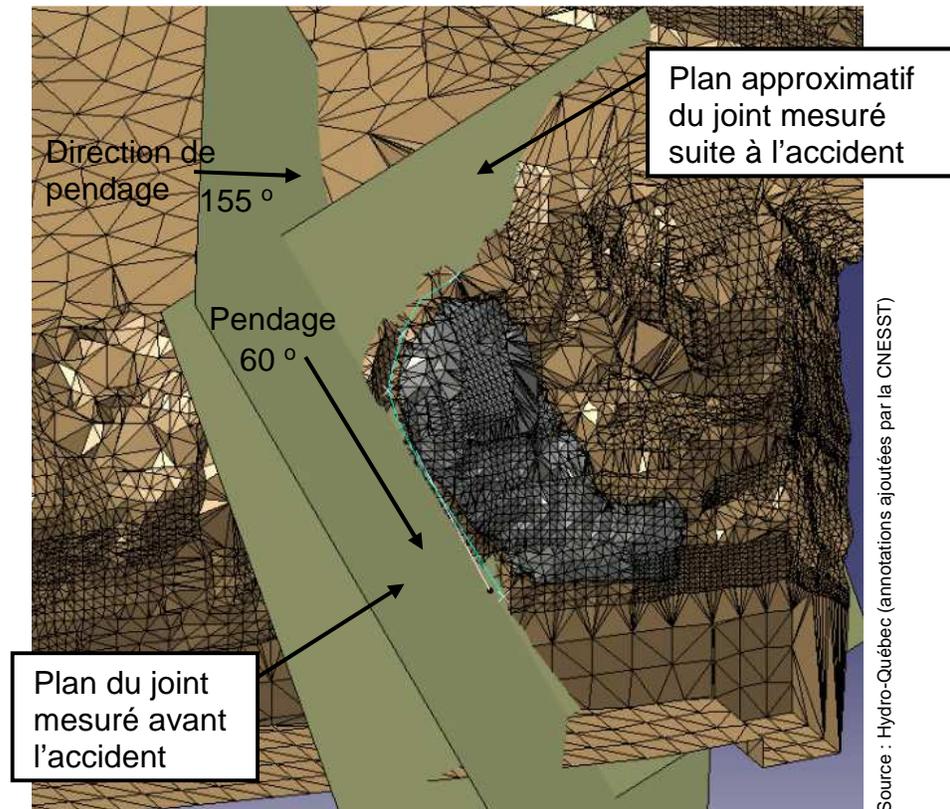


Image 7 - Pendage et direction de pendage du joint du glissement mesuré avant et après l'accident

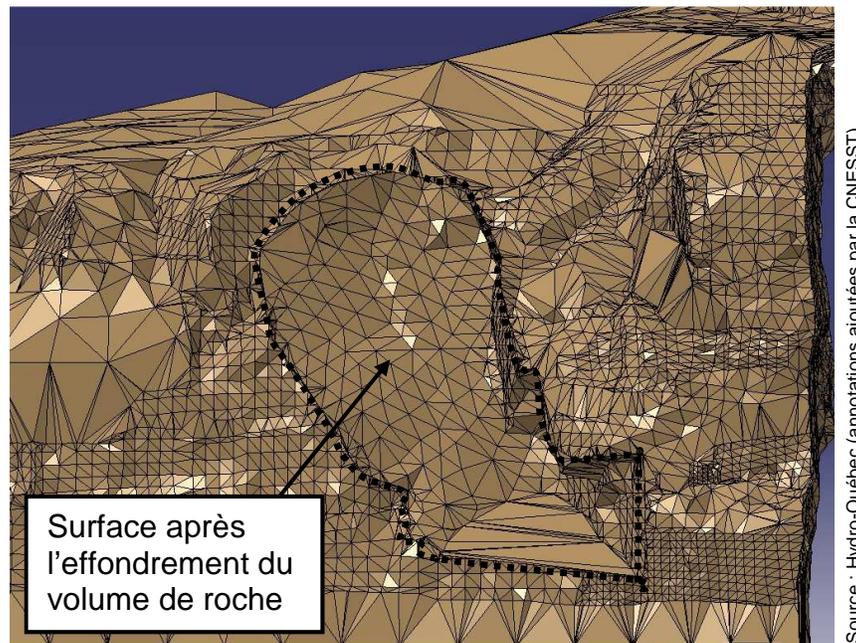


Image 8 - Modélisation de la surface du roc après l'effondrement

4.2.4 Informations recueillies du rapport d'expertise de SRK Consulting (Canada) (Annexe D)

- Pendant le marinage, un glissement le long d'un joint [...] a permis l'éroulement de la paroi gauche.
- À la suite d'un tir du 9 décembre, un joint apparenté aux joints de la famille no 2 (voir le Tableau 8) a été mis à découvert lors du dynamitage et du marinage. L'enlèvement de matériaux servant de contrefort au joint a permis le glissement sur plan et l'éroulement rocheux.

Tableau 8 : Orientation des familles de joints secteur de la dérivation provisoire

Tableau 5-13 : Familles de joints relevés par géocaméra – secteur de la dérivation provisoire					
Familles de joints	Pendage (°)	Direction du pendage (°)	Type de famille	Association	Pourcentage des joints mesurés
J1	17	204	Principale	Joints ouverts	29,9%
J2	55	170	Principale	Intrusions de pegmatite et joints ouverts	8,9%
J3	74	134	Principale	Joints fermés	4,5%
J4	79	002	Principale	Joints fermés	2,5%

Tableau 5-14 : Paramètres de référence/Baseline – familles de joints – secteur de la dérivation provisoire		
Familles de joints	Pendage (°)	Direction du pendage (°)
J1	5 - 30	195 - 215
J2	45 - 65	160 - 180
J3	65 - 85	125 - 145
J4	70 - 90	000 - 015

Référence : Contrat R4-06-01 Excavation et bétonnage de la dérivation provisoire Rapport géotechnique de paramètres de référence Geotechnical Baseline Report (GBR)

- La force de cisaillement exercée sur le joint est de 36 641 kN.
- La force de résistance au cisaillement du joint est de 14 785 kN.
- La force de résistance au cisaillement des boulons du soutènement en place est de 3 675 kN.
- La force totale de résistance au cisaillement est de 14 785 kN + 3675 kN, soit 18 460 kN.
- *Le facteur de sécurité incluant les boulons = 18 460 kN / 36 641 kN = 0.5 confirmant que les boulons n'ont pas été suffisants pour empêcher le glissement (Avec un facteur de sécurité de 1, on se retrouve théoriquement à l'équilibre).*
- *Un minimum de trois à cinq sondages supplémentaires aurait permis de confirmer les hypothèses de conception et d'identifier des structures ou formations géologiques inconnues pouvant être nuisibles à la stabilité des ouvrages, surtout si la hauteur finale de l'excavation est de 30 m ou plus.*

- *Une étude de stabilité de l'excavation finale du canal d'amenée et du portail amont aurait permis une approche de conception proactive surtout si une analyse des risques avait été incluse pour l'excavation finale. La combinaison d'études pour l'excavation finale et l'analyse des risques permettraient de proposer des mesures d'atténuation minimisant les risques tels qu'un raffinement du schéma de boulonnage proposé.*
- *Les joints de la famille J2 ont été identifiés comme pouvant créer des glissements sur plans (section 6.1.3 du Rapport géotechnique de paramètre de référence [« GBR »]), une analyse probabiliste tenant de la variabilité de l'orientation des joints [section 5.2.4.4 du GBR tableau 5.14 [...]] en considérant l'excavation finale avec les logiciels Swedge et Rocplane aurait pu démontrer la possibilité d'un plan de glissement important pour une hauteur de paroi de 50 m. À la suite de cette analyse, une gestion de risques et des mesures d'atténuation auraient pu être proposées.*
- *Selon la suite des événements relatés par Hydro-Québec, le jour de l'accident deux dynamitages ont été faits sans que les géologues d'Hydro-Québec puissent inspecter la surface rocheuse exposée. Ce faisant, la structure ayant causé l'éroulement n'a pas été répertoriée et des analyses de stabilité qui auraient indiqué un risque d'instabilité n'ont pas été faites. De ce fait, des mesures préventives pour sécuriser la paroi n'ont pas été appliquées avant le deuxième dynamitage.*

Donc il faudrait s'assurer, qu'avant d'autoriser un dynamitage, que les géologues d'Hydro-Québec aient inspecté les surfaces exposées après le marinage afin d'évaluer la possibilité d'instabilité et établir des mesures correctrices s'il y a lieu.

- *Un autre aspect au niveau de la communication est l'absence d'un journal de forage pouvant être consulté par les géologues d'Hydro-Québec. Ce journal tenu par les foreurs peut mener à l'identification de structures ou de géologie défavorables intersectées par les forages de production, tels des vides, des zones plus fracturées ou des zones plus altérées.*
- *Il aurait été prudent de prévoir une séquence d'excavation qui commence à la paroi droite plus stable pour se diriger vers la paroi gauche moins stable. Cette séquence d'excavation aurait permis :*
 1. *L'identification de structures ou de conditions géologiques potentiellement nuisibles à la stabilité de la paroi gauche avant d'excaver plus profondément cette paroi.*
 2. *Le maintien d'un contrefort rocheux sur la paroi gauche procurant plus de stabilité à la paroi ce qui permet d'établir des mesures préventives pour assurer la stabilité de la paroi lors de l'excavation d'une banquette.*

4.2.5 Informations tirées des extraits de recherches littéraires (Annexe C)

- *Il est écrit dans le Manuel canadien d'ingénierie des fondations (4^e édition) qu'on peut également effectuer la cartographie des caractéristiques des joints à partir de vues exposées de la masse rocheuse sur des affleurements ou sur toute paroi d'excavation où le roc est exposé, comme des puits, des tranchées ou des galeries. [...] Lorsqu'on cartographie des affleurements rocheux, il est important que la fenêtre d'échantillonnage ou la ligne de balayage soit assez longue pour relever suffisamment de détails qui constitueront une analyse statistique valable.*

- Il est écrit dans le *Manuel canadien d'ingénierie des fondations concernant l'intégrité structurale d'une masse rocheuse*, [qu'il] importe de mesurer, de caractériser et d'analyser aussi bien les détails localisés que ceux dont la présence est généralisée.
- Selon la norme ISO 31010, lors de la phase de conception et de développement, l'évaluation des risques permet d'assurer que les risques liés au système sont tolérables et permet de participer au processus d'amélioration de la conception.
- Selon ASCE (1976) dans son introduction : les caractéristiques des sols sont très variables et peuvent changer brusquement sur de courtes distances.
- Selon ASCE (1976), en établissant clairement la portée du projet, en examinant les conditions prévues du sol et en indiquant celles qui pourraient être inattendues, des lignes de communication claires entre la conception et la construction peuvent être établies de sorte que tout écart par rapport aux conditions prévues puisse être rapidement et adéquatement reconnu, et des modifications peuvent être faites si nécessaire.
- Selon BSI (2015), même intensive, l'investigation ne peut que réduire les incertitudes et les risques. L'excavation complète est la seule façon de révéler la vraie nature du terrain.
- Selon BSI (2015), un registre des risques devrait commencer dès la première phase de toute investigation. Le registre des risques devrait identifier les risques que les conditions de terrain pourraient entraîner pour le projet de construction proposé et devrait être continuellement maintenu, mis à jour et révisé à mesure que les résultats d'investigation deviennent disponibles.
- Selon BSI (2015), la révision en cours de construction devrait être effectuée pour déterminer, à la lumière des conditions nouvellement révélées, dans quelle mesure les conclusions tirées des investigations du sol doivent être révisées, le cas échéant.
- Selon AFNOR (2007), les contrôles suivants doivent être effectués :
 - contrôle de la coupe du terrain en cours d'excavation ;
 - examen du fond de l'excavation.
- Selon l'Ordre des ingénieurs du Québec, seul un ingénieur est autorisé à interpréter les données nécessaires afin de donner un avis géologique essentiel aux travaux de génie.
- À partir de recherches documentaires et du rapport de SRK Consulting (Canada), nous pouvons conclure qu'un forage à environ tous les 60 m le long de la ligne d'excavation pourrait être retenu comme une règle sécuritaire.

4.2.6 Études géotechniques d'Hydro-Québec

Extraits du document : *Excavation et bétonnage de la dérivation provisoire - Rapport géotechnique de paramètres de référence – Géotechnical Baseline Report (GBR) – Section 4 – Addenda 2*

5.2.4.4 Joints et structures majeures

a) Joints – familles de joints (étude structurale et indice Jn)

Les joints constituent le principal type de discontinuité rencontré au site des ouvrages. Leurs distributions et caractéristiques ont une grande incidence sur les résultats des travaux d'excavation ainsi que sur le choix des méthodes de travail. La caractérisation des joints et des familles de joints se base sur les observations faites lors de la description des carottes de forages et des relevés de géocaméra. Plus particulièrement, les paramètres étudiés sont les familles de joints et leur ouverture, la fréquence apparente de fracturation, l'espacement apparent, la rugosité et l'altération des joints.

[...] Il convient de noter que les structures retenues pour définir les familles de joints sont les joints (ouverts, partiellement ouverts et fermés). Les structures identifiées comme « possibles » et « probables » ont été éliminées et seules les structures qualifiées de « certaines » ont été retenues.

À partir de cette représentation stéréographique, les familles de joints principales ont été établies. Le tableau 5-13 présente les familles de joints établies à partir des relevés de géocaméra aux huit forages précités auxquels ont été ajoutés les relevés sur les affleurements rocheux en rive gauche. Ces familles constituent un paramètre de référence/Baseline dont les valeurs sont données au tableau 5-14.

Tableau 5-13 : Familles de joints relevés par géocaméra – secteur de la dérivation provisoire

Familles de joints	Pendage (°)	Direction du pendage (°)	Type de famille	Association	Pourcentage des joints mesurés
J1	17	204	Principale	Joints ouverts	29,9%
J2	55	170	Principale	Intrusions de pegmatite et joints ouverts	8,9%
J3	74	134	Principale	Joints fermés	4,5%
J4	79	002	Principale	Joints fermés	2,5%

Tableau 5-14 : Paramètres de référence/Baseline – familles de joints – secteur de la dérivation provisoire

Familles de joints	Pendage (°)	Direction du pendage (°)
J1	5 - 30	195 - 215
J2	45 - 65	160 - 180
J3	65 - 85	125 - 145
J4	70 - 90	000 - 015

[...] Le tableau 5-15 dresse la liste des joints ouverts et structures majeures présents dans le secteur de la dérivation provisoire. Ce tableau provient de l'analyse de relevés de géocaméra effectués aux emplacements des forages TF-58-14, TF-68-14, TF-02-79 et TF-134-15 (Groupe Qualitas, 2015 et 2016). Le dyke « B » relevé dans le forage TF-68-14 recoupe le portail amont et peut créer une instabilité sur la partie gauche de la plateforme au niveau 420 m.

Tableau 5-15 : Joints ouverts et structures majeures – secteur de la dérivation provisoire

Forage ⁽¹⁾	Localisation	Structure	Profondeur ⁽²⁾ (m)	Ouverture ou épaisseur (mm)	Pendage (°)	Direction du pendage (°)
TF-68-14	Portail amont	Joint ouvert (A)	16,25	13,1	22	158
		Dyke (B)	18,8	1 350	39	170
		Joint ouvert (B)	20,16	4,6	43	185
		Dyke (C)	5,8	6 000	42	144
TF-58-14	Galerie de dérivation - bouchon de béton	Dyke (D)	63,6	1 700	56	167
TF-02-79	Barrage – près du portail aval	Joint ouvert (E)	6,3	1	3	154
		Joint ouvert (F)	11,33	1	83	092
TF-134-15	Canal de fuite – mur gauche	Dyke de pegmatite (G)	12,0	600	67	239
	Portail aval	Dyke de pegmatite (H)	16,6	300	69	178
	Portail aval – voûte de la galerie de dérivation	Dyke de pegmatite (I)	19,7	600	28	319

Notes : (1) aucun joint ouvert n'a été répertorié dans le forage TF-134-15

(2) profondeur en mètres dans l'axe du forage

6 Incidences des conditions géologiques et géotechniques sur la conception et les méthodes de construction

6.1.2 Excavation du roc

6.1.2.7 Stabilité des parois d'excavation

Des discontinuités à fort pendage, ouvertes ou partiellement ouvertes, sont inclinées vers les excavations du canal d'entrée et du canal de sortie. L'entrepreneur doit tenir compte des fréquences des joints, de leur orientation et pendage dans la conception des sautages de masse et des dynamitages périphériques contrôlés.

6.1.3 Surexcavation – canal d'amenée et portail amont

La majorité des joints ouverts et des dykes rencontrés dans les forages et sur les affleurements ne forment pas de plans ou de blocs instables. Cependant, leur présence doit tout de même susciter une attention particulière au moment des travaux d'excavation au chantier.

[...] Aux parois gauche et amont, la formation de blocs géométriquement instables est possible. Au mur gauche, une certaine proportion des plans de la famille J2 associée aux intrusions de pegmatite pourrait tout de même s'avérer défavorable en ce qui concerne les glissements sur plan.

6.2 Consolidation

À l'exception de la consolidation planifiée montrée aux dessins contractuels, le choix de la méthode de consolidation des parois excavées est déterminé par le personnel d'Hydro-Québec. Les méthodes, les matériaux et la mise en place de la consolidation sont spécifiés aux CTP.

Le type de consolidation (boulons de consolidation, goujons et béton projeté) est déterminé selon les directives des géologues d'Hydro-Québec en fonction des conditions

du massif rocheux observées après écaillage et inspection des surfaces. L'entrepreneur doit prévoir qu'il aura à réaliser une consolidation supplémentaire à l'endroit des volées et banquettes réalisées antérieurement lorsque des structures géologiques cachées se révéleront tardivement. [...]

Extrait du document : R4-06-90 – Dérivation provisoire et batardeaux, Rapport Synthèse RA-2015-0017-01

1.1 Objectif du document

Ce document est le rapport d'ingénierie détaillée phase 1 pour le lot R4-06-90 : Dérivation provisoire et batardeaux. L'objectif du document est de présenter les données de base, les critères généraux de conception, la description des ouvrages et des équipements de la dérivation provisoire et les batardeaux retenus au terme de la phase 1 ainsi que les informations pour l'ingénierie détaillée phase 2.

Extraits du document : Annexe D2 - Analyse de la géologie structurale et stabilité des excavations RA-2015-0021-01

3.1.2 Analyse cinétique

[...] L'analyse cinétique est effectuée dans les cas suivants :

- Les blocs découpés par des joints ouverts ayant été positionnés spatialement dans CATIA et montrant un risque de rupture. Dans ce cas, la dimension et la position des blocs est telle qu'observée au modèle.
- Les blocs potentiels critiques découpés par familles de joints moyennes. Dans ces cas, la dimension des blocs est limitée à la première banquette (10 m de hauteur) et la longueur de la paroi. La pente du terrain naturel est aussi considérée dans la modélisation.

7 Conclusion et recommandations

[...] Les recommandations sur le soutènement requis pour les différents ouvrages, basés sur les conclusions et analyses des sections précédentes, sont les suivantes :

- Au canal d'amenée et au portail amont de la dérivation :
 - un patron de boulonnage planifié de 3,0 m c/c avec des boulons de type A de 4 m de longueur dans la partie supérieure des murs, soit 3 rangées sur toutes les parois de plus de 30 m de hauteur.
 - un patron de boulonnage planifié 3,0 m c/c de 4 m type A sur la pleine hauteur de la paroi, à partir de 1,5 m de la surface et jusqu'à 6 m du radier, sur les murs latéraux et la face du portail amont, jusqu'à 15 m en amont de la structure bétonnée.
- [...]
- Sur toutes les surfaces excavées, incluant les zones de boulonnage planifié :
 - un boulonnage de type « si requis », avec des boulons de consolidation de type A de 4 m ou 6 m de longueur et des boulons de consolidation de type C de 8 m de longueur selon les conditions géologiques et le jugement du géologue au chantier.

Extrait du document : Annexe C1 - Critères de conception – Hydrologie – Hydraulique – Géotechnique – Géologie RA-2015-0002-01

5.3.1 Excavation dans le roc

La méthode d'excavation utilisée est le forage et dynamitage. La face finale d'excavation est verticale et l'excavation se fait en banquettes successives d'une hauteur limitée à 10 m de façon à contrôler la déviation des trous. La hauteur de la première banchette pourra être ajustée au besoin pour tenir compte du profil topographique du roc et celle-ci peut être excavée à la verticale.

Extraits de la note interne No CI-2016-0008-01 : Mise à jour de l'analyse de la géologie structurale et stabilité des excavations suites aux investigations de 2015

La présente note a pour objectif de mettre à jour le rapport « RA-2015-0021-01 Analyse de la géologie structurale et stabilité des excavations » (Hydro-Québec, 2015) réalisée en phase 1 d'ingénierie relativement aux investigations supplémentaires réalisées en 2015. Elle traite uniquement des changements reliés aux données additionnelles obtenues de la campagne d'investigations de 2015.

[...] À noter que pour la mise à jour de l'étude de la géologie structurale et la stabilité des excavations, seules les données provenant des forages TF-101-15 et TF-134-15 ont été utiles.

[...] 2) Orientation des familles de joints

L'ajout des données d'orientations des joints ouverts, partiellement ouverts et fermés obtenues par les relevés de géocaméra (optique et acoustique) à l'ensemble des données déjà disponibles a changé légèrement les orientations moyennes des familles de joints. Le tableau suivant présente les changements.

Tableau 2 : Familles de joints principales identifiées à la dérivation provisoire de Romaine 4

Familles	Pendage/Dir. Pend. (°)		Pourcentage des joints mesurés		Type	Association
	Phase 1	Phase 2	Phase 1	Phase 2		
J1	22/185	17/204	16 %	30 %	Famille principale	Joints ouverts
J2	59/156	55/170	7 %	9 %	Famille principale	intrusions de pegmatites; joints ouverts
J3	75/134	74/134	4 %	5 %	Famille principale	joints fermés
J4	82/005	79/002	3 %	3 %	Famille principale	joints fermés

Autres informations concernant les études géotechniques

- Hydro-Québec applique un processus d'élaboration des devis techniques en deux phases. Après la phase 1 qui présente, entre autres, les données de base et les

critères généraux de conception, la phase 2 consiste à obtenir plus d'informations propres au site de l'ouvrage par des investigations géologiques et géotechniques supplémentaires.

- L'analyse cinétique sur une hauteur de 10 m est réalisée sur les familles de joint moyennes étant les plus probables d'être rencontrées dans le secteur selon l'hypothèse que la continuité moyenne n'est généralement pas supérieure à cette hauteur. Si une structure particulière est rencontrée (dans les investigations ou lors de l'excavation), celle-ci doit faire l'objet d'une analyse en fonction de ses paramètres spécifiques.
- Des analyses cinétiques sur toute la hauteur de l'excavation ont été réalisées pour les joints ouverts et les structures majeures identifiés dans les investigations, car ceux-ci sont possiblement continus sur plus de 10 m.

4.3 ÉNONCÉS ET ANALYSE DES CAUSES

4.3.1 Un volume de roche instable s'effondre et écrase un travailleur dans sa pelle hydraulique

Tout au long de l'excavation du canal d'amenée de la dérivation provisoire, plusieurs structures présentes sur la paroi rocheuse gauche sont cartographiées par l'équipe de géologie d'Hydro-Québec. Aux environs des PM 433 à 440, les orientations et les pendages des joints et du dyke d'environ 1 m d'épaisseur qui y sont présents ne causent pas de danger d'effondrement selon le jugement de l'équipe de géologie. Avant que ne se produise l'effondrement, l'équipe de géologie détermine que la direction et le pendage du joint de glissement sont 155° et 60° . Ce joint est apparenté à la famille de joints J2 qui a été identifiée dans le GBR comme pouvant créer des glissements sur plan. En réalité, la direction du joint du glissement bifurque à l'intérieur du roc à 182° , ce qui amène le joint dans une direction plus parallèle à l'excavation que supposé, donc plus instable. L'équipe de géologie ne peut pas faire cette constatation avec les observations effectuées à la surface de la paroi, au-dessus du niveau 381,5 m de la banquette 6. Le volume de roche pouvant glisser sur ce joint, en étant mis à découvert lors de l'excavation, n'est pas identifié. Les boulons de consolidation installés ne sont pas prévus pour la consolidation d'un tel volume de roche dont la largeur approximative est 22 m, la hauteur est d'environ 35 m et l'épaisseur maximale est environ 8 m.

Selon le rapport d'expertise de SRK Consulting (Canada), la force de cisaillement du volume de roche exercée sur le joint de glissement de la paroi gauche est 36 641 kN. Une force supérieure (résistance au cisaillement) à cette dernière est nécessaire pour maintenir ce volume en place et empêcher sa chute. Lors du retrait des sections M10 et M11, la force totale de résistance au cisaillement du joint est 18 460 kN. Cette valeur est inférieure à la force de cisaillement du volume de roche de 36 641 kN. Le 9 décembre 2017, la section M10 est dynamitée vers 12 h et la section M11 vers 17 h 30. Après chacun de ces deux sautages, du marinage est réalisé. Le volume peut alors chuter à tout moment pendant le retrait de la roche d'appui des sections M10 et M11 qui forment les derniers remparts de sécurité.

En cours de marinage, vers 22 h 50, l'opérateur de la pelle hydraulique observe, sur la surface de roulement du lieu de chargement des camions, qu'une roche est tombée du bas de la paroi gauche. Il s'en approche pour vérifier ce qu'il en est. À ce moment, un volume de roche d'environ 1 600 m³ et d'une masse d'environ 4 300 000 kg s'effondre et ensevelit la pelle. La cabine de la pelle hydraulique avec l'opérateur à son bord sont écrasés sous le poids de la roche.

Cette cause est retenue.

4.3.2 Les études géotechniques et les moyens de contrôle du danger d'effondrement sont insuffisants et mènent à la chute d'un volume de roche non identifié

Pour réaliser la conception de la dérivation provisoire, Hydro-Québec applique un processus d'élaboration des devis techniques en deux phases. D'abord, il y a la phase 1 au moment duquel les données de base, les critères généraux de conception, la description des ouvrages et des équipements, les batardeaux ainsi que les informations nécessaires à l'ingénierie détaillée de la phase 2 sont présentés. Par la suite, il y a la phase 2 qui consiste à obtenir plus d'informations propres au site de l'ouvrage par des investigations géologiques et géotechniques supplémentaires pour détailler davantage le massif rocheux au droit de l'excavation dans les analyses. Il est écrit dans le *Manuel canadien d'ingénierie des fondations concernant l'intégrité structurale d'une masse rocheuse*, [qu'il] *importe de mesurer, de caractériser et d'analyser aussi bien les détails localisés que ceux dont la présence est généralisée*. Nous pouvons constater dans la note d'Hydro-Québec, N° CI-2016-0008-01 *Mise à jour de l'analyse de la géologie structurale et stabilité des excavations suites aux investigations de 2015*, que seules les données de deux forages avec géocaméra réalisés en phase 2 au portail aval du canal de fuite ont été utiles pour cette mise à jour. Ces dernières viennent modifier les données générales des familles de joints moyennes du site de la dérivation provisoire obtenues en phase 1, mais ne donnent pas d'autre information sur les détails localisés du roc à excaver pour le canal d'amenée où s'est produit l'accident. À cet égard, les investigations géologiques et géotechniques supplémentaires réalisées en phase 2 par Hydro-Québec pour détailler davantage le massif rocheux au droit de l'excavation n'ont pas permis d'identifier le joint de l'effondrement.

Pour déterminer le nombre de forages exploratoires avec géocaméra nécessaires lors des investigations pour un tel ouvrage, il n'y a pas de consensus donnant une directive précise dans la littérature. À partir de recherches documentaires et du rapport de SRK Consulting (Canada), nous pouvons conclure qu'un forage à environ tous les 60 m le long de la ligne d'excavation pourrait être retenu comme une règle sécuritaire. Selon les dimensions des trois parois du canal d'amenée, nous pouvons établir qu'environ cinq forages auraient dû être réalisés pour obtenir l'information et la précision nécessaires dans les analyses détaillées. Au total des études des phases 1 et 2, un seul forage avec géocaméra au portail amont a été réalisé.

Selon l'information recueillie, Hydro-Québec a étudié la stabilité des parois de l'excavation sur toute la hauteur de l'excavation seulement pour les joints ouverts et les structures

majeures identifiées dans les investigations, car celles-ci sont probablement continues sur plus de 10 m. Par contre, cette étude a été limitée sur les premiers 10 m de haut de la future excavation pour les familles de joints moyennes en se basant sur l'hypothèse que leur persistance est peu probable à plus de 10 m de profondeur. On peut comprendre qu'il s'agit d'une hypothèse et que malgré cette faible probabilité, il est tout de même possible de retrouver un joint persistant au-delà de 10 m. Selon SRK Consulting (Canada), une analyse de stabilité sur toute la hauteur de l'excavation aurait dû être produite pour démontrer ou infirmer la possible présence d'un plan de glissement important. Ce qui aurait permis une approche de conception proactive en y incluant une analyse de risque permettant de proposer des mesures d'atténuation minimisant les risques. En ce sens, la norme ISO 31010 précise que *lors de la phase de conception et de développement, l'évaluation des risques permet d'assurer que les risques liés au système sont tolérables et permet de participer au processus d'amélioration de la conception.*

Il est important de comprendre qu'il n'y a pas de moyen de connaître parfaitement l'état d'un massif rocheux à excaver étant donné que, comme l'écrit ASCE (1976): *les caractéristiques des sols sont très variables et peuvent changer brusquement sur de courtes distances.* Malgré tous les travaux d'étude réalisés ou pouvant l'être avant que ne débute l'excavation, des incertitudes demeurent quant à l'état réel du massif rocheux. *L'excavation complète est alors la seule façon de révéler la vraie nature du terrain (BSI, 2015).* Il est donc nécessaire de mettre en place, avant même le début de l'excavation, des moyens pour contrôler le danger d'effondrement par une analyse de risques devant être *continuellement maintenue, mise à jour et révisée à mesure que les résultats d'investigation deviennent disponibles (BSI, 2015).* Si Hydro Québec avait réalisé une analyse de risques pour le danger d'effondrement dès la conception, des moyens de contrôle identifiés auraient contribué à éviter cet accident.

Voici sept moyens de contrôle absents ou incomplets identifiés lors de l'effondrement.

1. Au démarrage des travaux d'excavation, la surface du roc du site de l'ouvrage peut être nettoyée après avoir été dégagée de tous les dépôts de mort-terrain qui la recouvre. Ainsi, comme il est expliqué dans le *Manuel canadien d'ingénierie des fondations*, la cartographie des caractéristiques des joints exposés du massif rocheux peut être réalisée pour obtenir des données supplémentaires sur l'état du massif rocheux. Ces dernières peuvent ensuite être incorporées dans l'analyse de stabilité pour en réduire davantage les incertitudes avant de débiter l'excavation du roc.

Au début des travaux, les dépôts de mort-terrain ont été retirés jusqu'à 5 m au-delà du sommet de la ligne d'excavation du roc dans le but qu'il n'y ait aucun matériel lâche en bordure des parois comme prévu dans les devis techniques. Le roc n'a pas été nettoyé pour en faire la cartographie, ce qui a eu comme conséquence un déficit d'informations géologiques important aux travaux d'excavation.

2. En cours d'excavation, l'analyse de stabilité doit être revue pour valider que le soutènement prévu et mis en place est adéquat selon les nouvelles conditions

géologiques identifiées (BSI, 2015). Dans son Annexe D2, Hydro-Québec a prévu un boulonnage planifié sur une portion de la paroi gauche et un boulonnage « si requis » sur la totalité de la paroi. Il faut comprendre que la localisation des boulons du boulonnage planifié est prévue dans les plans au moment de la conception (phases 1 et 2) alors que la mise en place et la localisation d'un boulon du boulonnage de type « si requis » sont déterminées pendant les travaux d'excavation. Toujours dans l'Annexe D2, il est écrit que le boulonnage de type « si requis » est effectué *selon les conditions géologiques et le jugement du géologue au chantier*. Selon l'Ordre des ingénieurs du Québec, seul un ingénieur est autorisé à interpréter les données nécessaires afin de donner un avis géologique nécessaire à des travaux de génie. Le boulonnage nécessaire à la stabilité d'une paroi doit alors être analysé et confirmé par un ingénieur, ce qui n'est pas prévu par Hydro Québec. Cela fait en sorte que depuis le début de l'excavation du canal d'amenée, aucun document d'ingénieur ne confirme la stabilité de la paroi avec le soutènement installé suite aux conditions géologiques rencontrées en cours d'excavation.

3. Des observations géologiques de la coupe du roc en cours d'excavation doivent être réalisées (AFNOR, 2007). L'objectif de ces observations est d'obtenir de l'information additionnelle sur chaque nouvelle surface exposée immédiatement après le marinage des premiers mètres d'une section dynamitée. À cette occasion, des actions peuvent être prises si des structures géologiques critiques sont observées sur les surfaces finales d'excavation ou les surfaces de la section de roc du sautage subséquent. La méthode d'excavation de roc à ciel ouvert appliquée lors de l'accident est muette concernant ces observations. Le jour de l'accident, aucune observation n'a été faite par l'équipe de géologie sur les nouvelles surfaces exposées entre les sautages M10 et M11.
4. Au fur et à mesure de l'avancement des travaux, une révision des études géotechniques peut être nécessaire si un écart aux conditions géologiques prévues est constaté. Pour ce faire, *des lignes de communication claires entre la conception et la construction [doivent] être établies de sorte que tout écart par rapport aux conditions prévues puisse être rapidement et adéquatement reconnu* (ASCE, 1976). En cours d'excavation du canal d'amenée, de nombreux joints défavorables présents dans la paroi gauche ont mené à une excavation beaucoup plus grande que prévue, soit un volume supplémentaire d'excavation d'environ 8000 m³ au mur gauche. D'ailleurs, le 21 novembre 2016, lors de l'excavation de la banquette 5, certaines structures géologiques (joints ou autres) ont mené à un effondrement d'une plus petite envergure à celle de l'accident. Malgré ces nouvelles conditions révélées en cours d'excavation et les écarts à ce qui était prévu à la conception, aucune révision de l'étude de la conception initiale n'a été réalisée par Hydro-Québec.
5. L'impact des conditions défavorables à la stabilité de la paroi peut être minimisé en débutant la séquence d'excavation de l'endroit le plus favorable à la stabilité vers le moins favorable. Au lieu de l'effondrement, l'excavation a débuté du côté de la

paroi gauche, moins favorable à la stabilité. Une séquence d'excavation ayant débuté du côté droit, plus favorable, aurait permis :

- L'identification de structures ou de conditions géologiques potentiellement nuisibles à la stabilité de la paroi gauche avant d'excaver plus profondément cette paroi.
- Le maintien d'un contrefort rocheux sur la paroi gauche procurant plus de stabilité à la paroi et permettant d'établir des mesures préventives pour assurer la stabilité de la paroi lors de l'excavation de la banquette.

La séquence d'excavation planifiée de la banquette 7 ayant débuté de l'endroit le moins favorable à la stabilité vers le plus favorable n'a pas permis de minimiser l'impact des conditions défavorables à la stabilité de la paroi.

6. La présence d'un journal de forage pouvant être consulté par l'équipe de géologie peut leur permettre d'identifier des structures géologiques inconnues dans le roc. Un journal de forage est complété par les foreurs d'EBC, mais il n'est pas prévu que l'information qu'il contient soit transmise à l'équipe de géologie d'Hydro-Québec pour bonifier leur connaissance sur l'état du roc en cours d'excavation. Aucune identification de structures ou de géologie défavorables interceptées par les forages de sautages ou de ceux de la consolidation n'a pu être réalisée étant donné que ce moyen de communication entre les foreurs et l'équipe de géologie n'est pas utilisé.
7. La mise en place d'une méthode de surveillance des parois à l'aide d'instruments permet de déceler de possibles mouvements des parois rocheuses en cours de travaux. Lors de l'accident, une méthode de surveillance de la paroi entre les PM 440 et 465 à l'aide de trois cibles d'arpentage était prévue. L'installation de ces cibles a été demandée par Hydro-Québec dans sa correspondance *R4-06-01 DB MEMO 58* transmise à EBC le 3 décembre 2016. Par contre, l'installation n'est pas complétée au moment de l'accident. Uniquement la cible n° 3, installée le jour de l'accident, est en place, mais aucun suivi par relevé d'arpentage de cette cible n'est débuté. Un mouvement possible sur la paroi gauche dans les heures précédant l'effondrement n'a donc pu être identifié.

L'insuffisance des études géotechniques jumelée à celle des moyens de contrôle du danger d'effondrement ont mené à l'exposition d'un joint critique non identifié et par conséquent à la chute d'un volume de roche.

Cette cause est retenue

SECTION 5

5 CONCLUSION

5.1 CAUSES DE L'ACCIDENT

L'enquête a permis de retenir les causes suivantes :

- Un volume de roches instables s'effondre et écrase un travailleur dans sa pelle hydraulique.
- Les études géotechniques et les moyens de contrôle du danger d'effondrement sont insuffisants et mènent à la chute d'un volume de roches non identifié.

5.2 AUTRES DOCUMENTS ÉMIS LORS DE L'ENQUÊTE

- Une décision rendue le 10 décembre 2016, consignée dans le rapport RAP1124962, ordonne la fermeture du lieu de travail situé dans l'excavation du canal d'amenée de la dérivation provisoire Romaine-4. Le maître d'œuvre et l'employeur se sont conformés à cette ordonnance.
- Du 13 décembre au 22 décembre 2016, les travaux divisés sur quatre méthodes de travail successives soumises par le maître d'œuvre pour sécuriser le site et récupérer le corps de l'opérateur sont réalisés suite à l'acceptation de ces méthodes. Le tout est consigné dans les rapports RAP1123535 et RAP1123538.
- Le 10 février 2017, un accès partiel est accepté dans l'excavation du canal d'amenée de la dérivation provisoire suite au dépôt d'une méthode de travail. Les travaux autorisés consistent à la construction d'une rampe sur le côté gauche de l'excavation et des travaux sur le haut du mur gauche au-dessus du niveau de la rampe. Le reste de l'excavation demeure interdite d'accès. Le tout est consigné dans le rapport RAP1123539.
- Le 13 mars 2017, suite à la réception du rapport d'expertise de l'ingénieur Denis Thibodeau de l'entreprise SRK Consulting (Canada) inc., les conditions de reprise des travaux sont signifiées au maître d'œuvre et consignées dans le rapport RAP1123540.
- Le 30 mars 2017, une rencontre a lieu entre la CNESST, des représentants d'Hydro-Québec, des représentants des travailleurs et M. Thibodeau pour faire une mise au point des conditions de reprise des travaux et présenter les recommandations du rapport d'expertise pour les travaux souterrains de la galerie de la dérivation à venir. Il est précisé qu'un facteur de sécurité minimal de 1,5 doit être utilisé à la place de celui de 1,3 étant donné que la dérivation ne peut être considérée comme un ouvrage temporaire, mais plutôt permanent, avec ses travaux répartis sur une période de trois ans. Le tout est consigné au rapport d'intervention RAP1176062.

- Le 23 mai 2017, il est demandé, pour qu'Hydro-Québec s'assure que ce genre de travaux se déroule de façon sécuritaire sur l'ensemble du chantier, d'apporter des modifications au programme de prévention de maître d'œuvre à l'article 5.7 et aux annexes 19 et 20 qui traitent de l'excavation du roc. Le tout est consigné dans le rapport d'intervention RAP1182372.
- Une décision rendue le 29 juin 2017, consignée dans le rapport RAP1187922, autorise la reprise des travaux du canal d'amenée de la dérivation provisoire Romaine-4.

5.3 SUIVI À L'ENQUÊTE

Pour éviter un accident semblable, la CNESST transmettra à l'Association des constructeurs de routes et grands travaux du Québec (ACRGTQ) les conclusions de cette enquête pour qu'elle en informe ses membres. De plus, la CNESST transmettra les conclusions de l'enquête au ministère des Transports, de la Mobilité durable et de l'Électrification des transports.

ANNEXE A

Accidenté

ACCIDENTÉ

Nom, prénom : [B]

Sexe : Masculin

Âge : [...]

Fonction habituelle : [...]

Fonction lors de l'accident : Opérateur de pelles hydrauliques

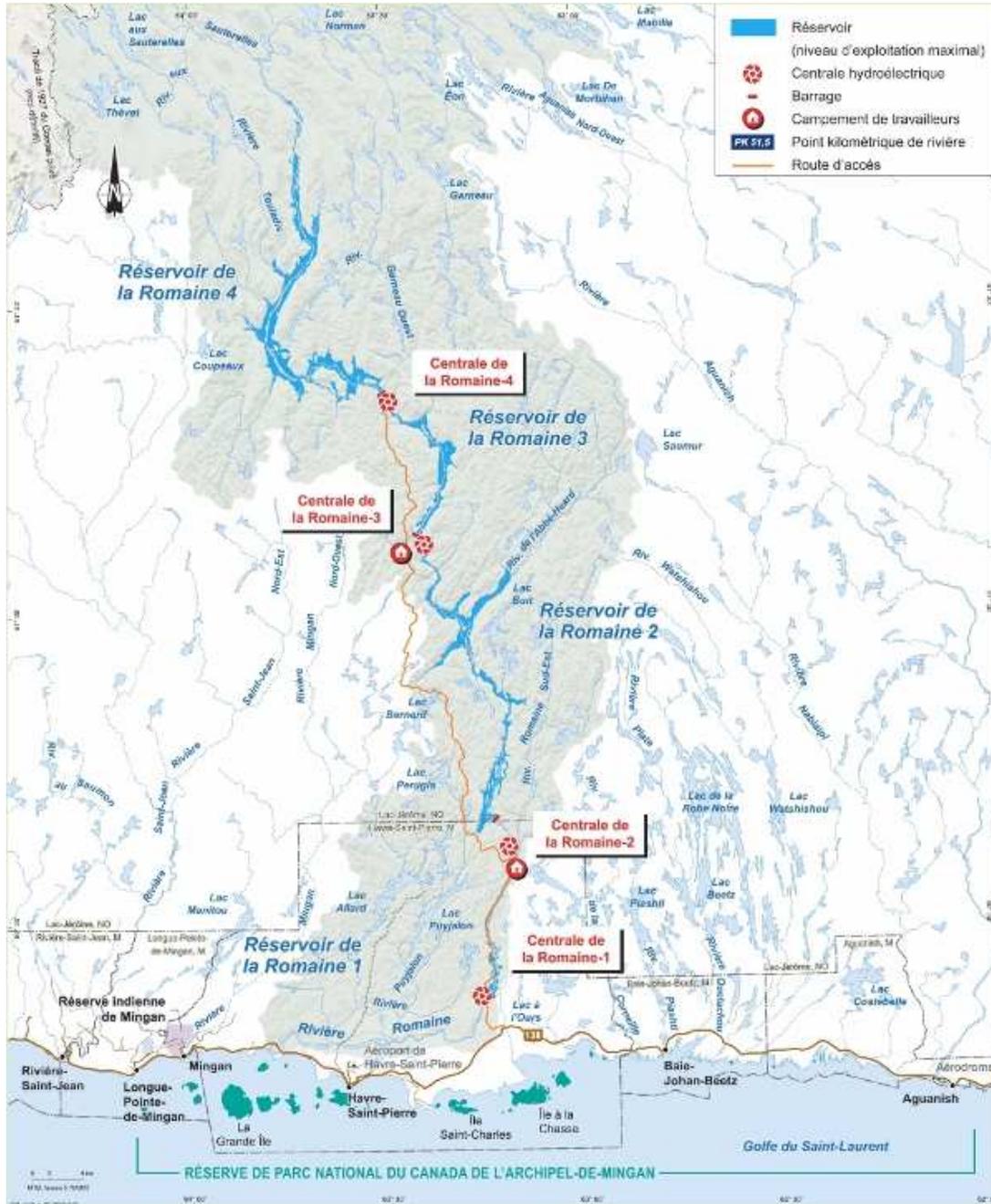
Expérience dans cette fonction : [...]

Ancienneté chez l'employeur : [...]

Syndicat : [...]

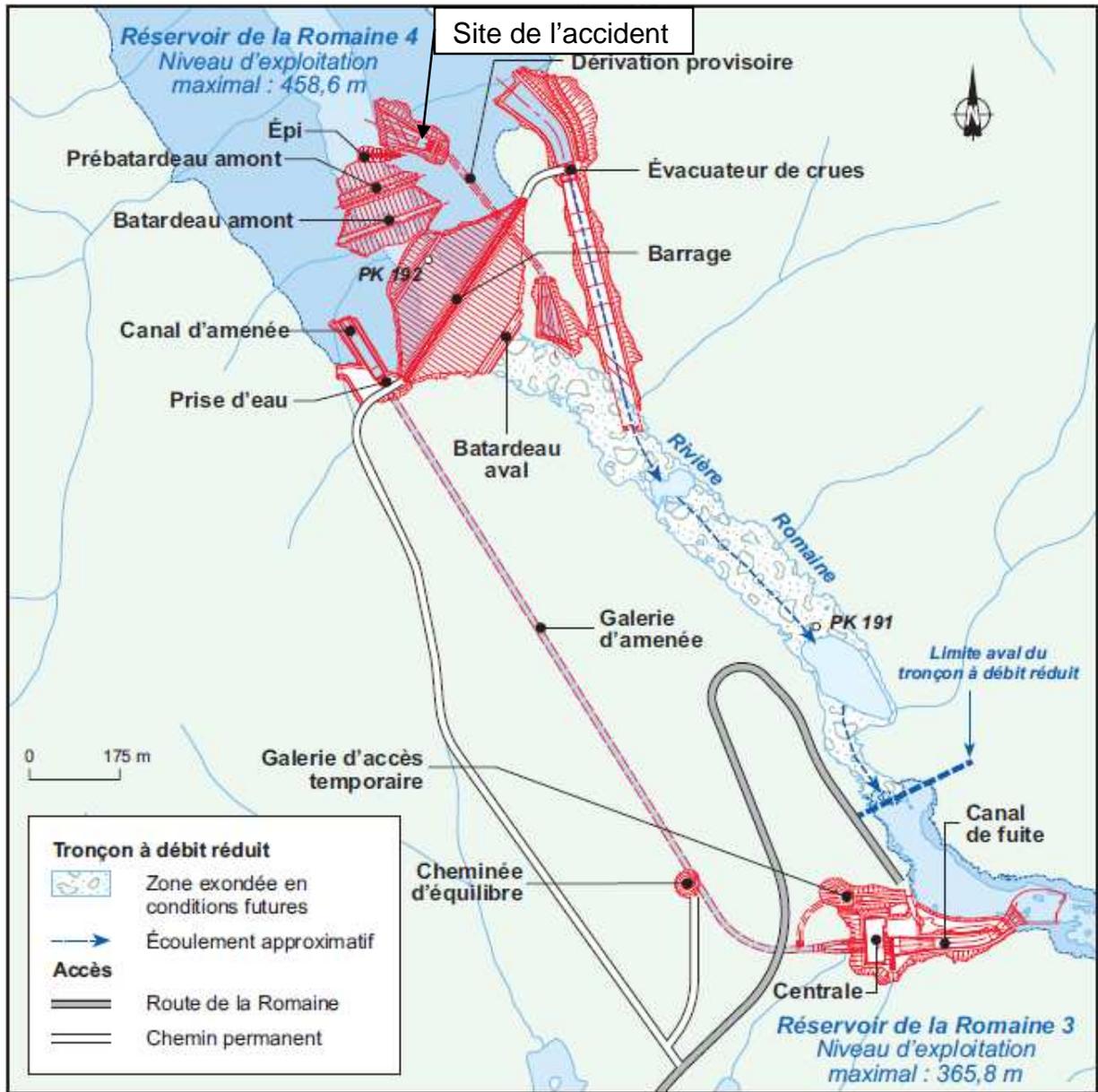
ANNEXE B

Plans et photos



Source : Hydro-Québec

Plan B1- Localisation du chantier



Plan B2 – Identification des ouvrages de Romaine-4

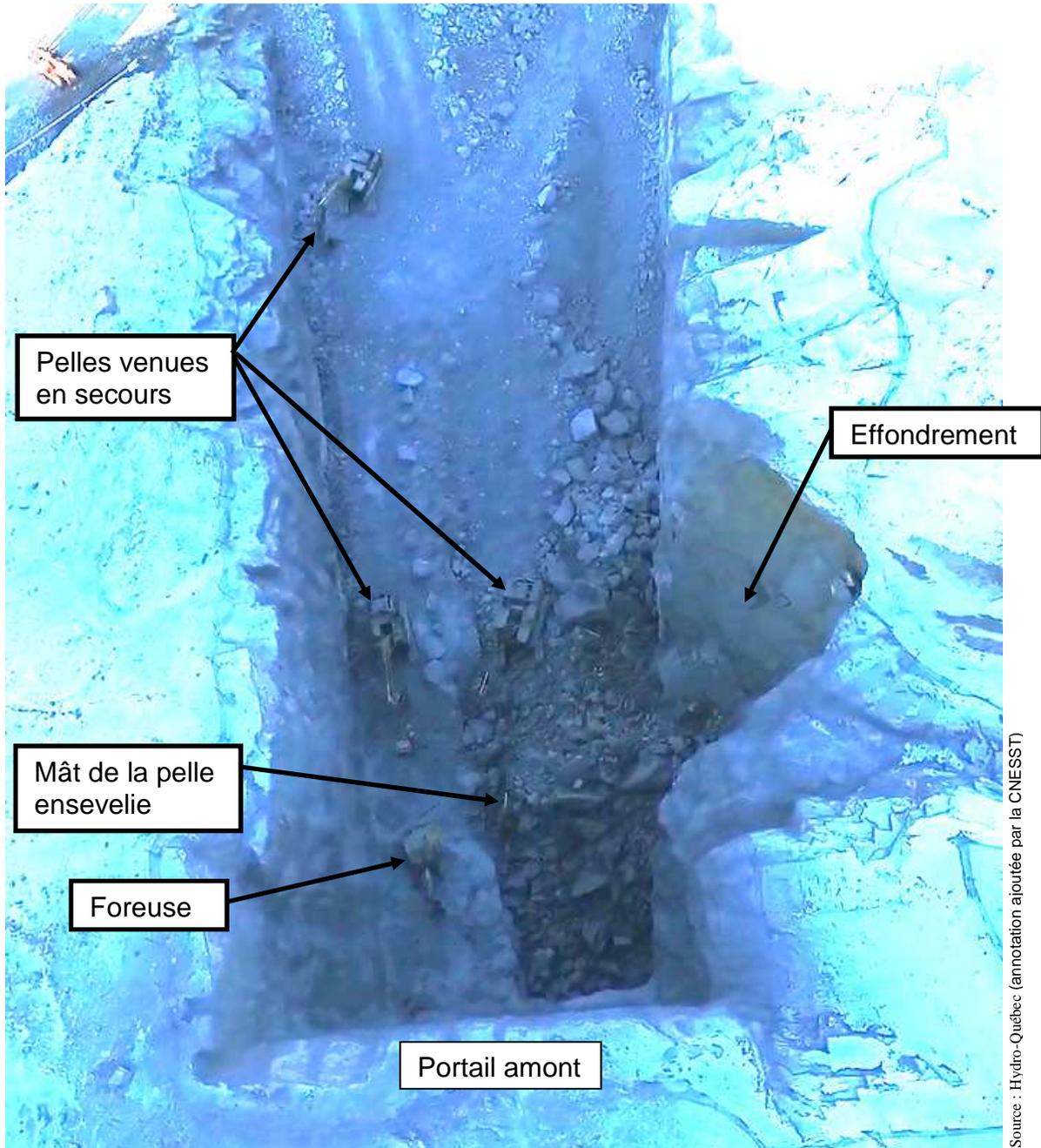


Photo 2 Vue aérienne du canal d'aménée et de l'effondrement

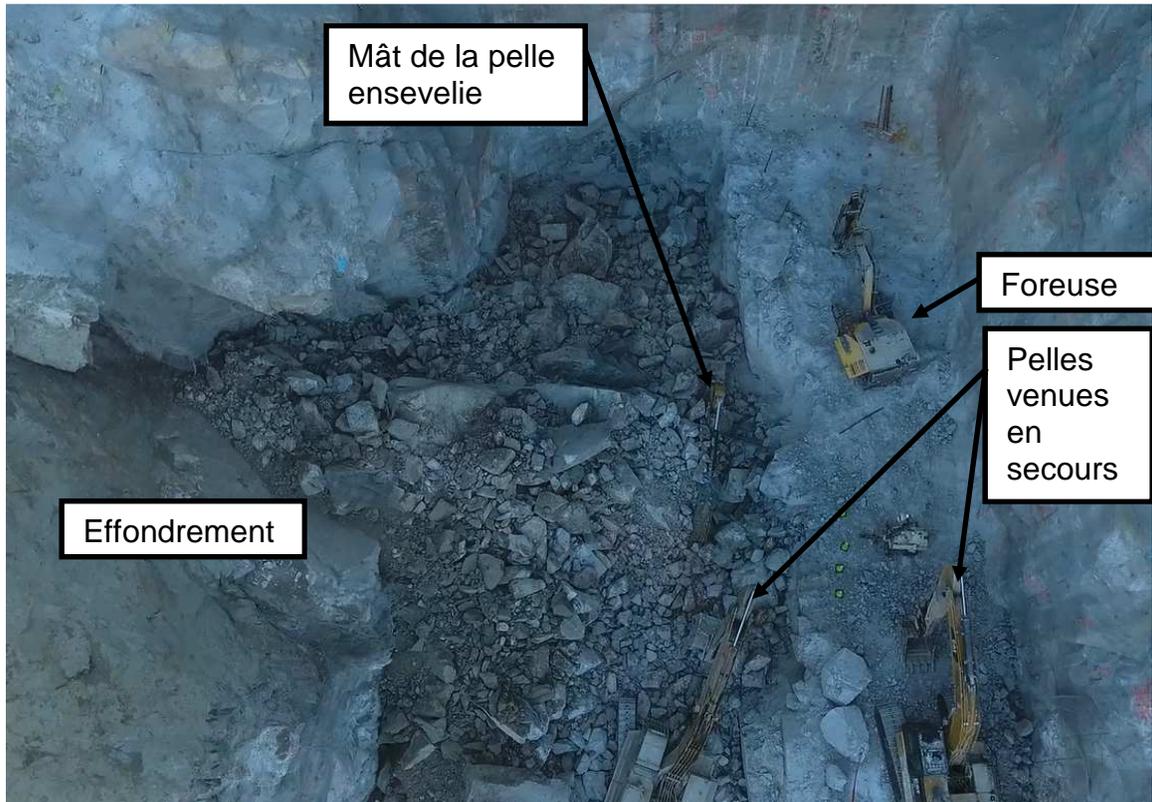


Photo 3 Vue aérienne de la pelle hydraulique ensevelie

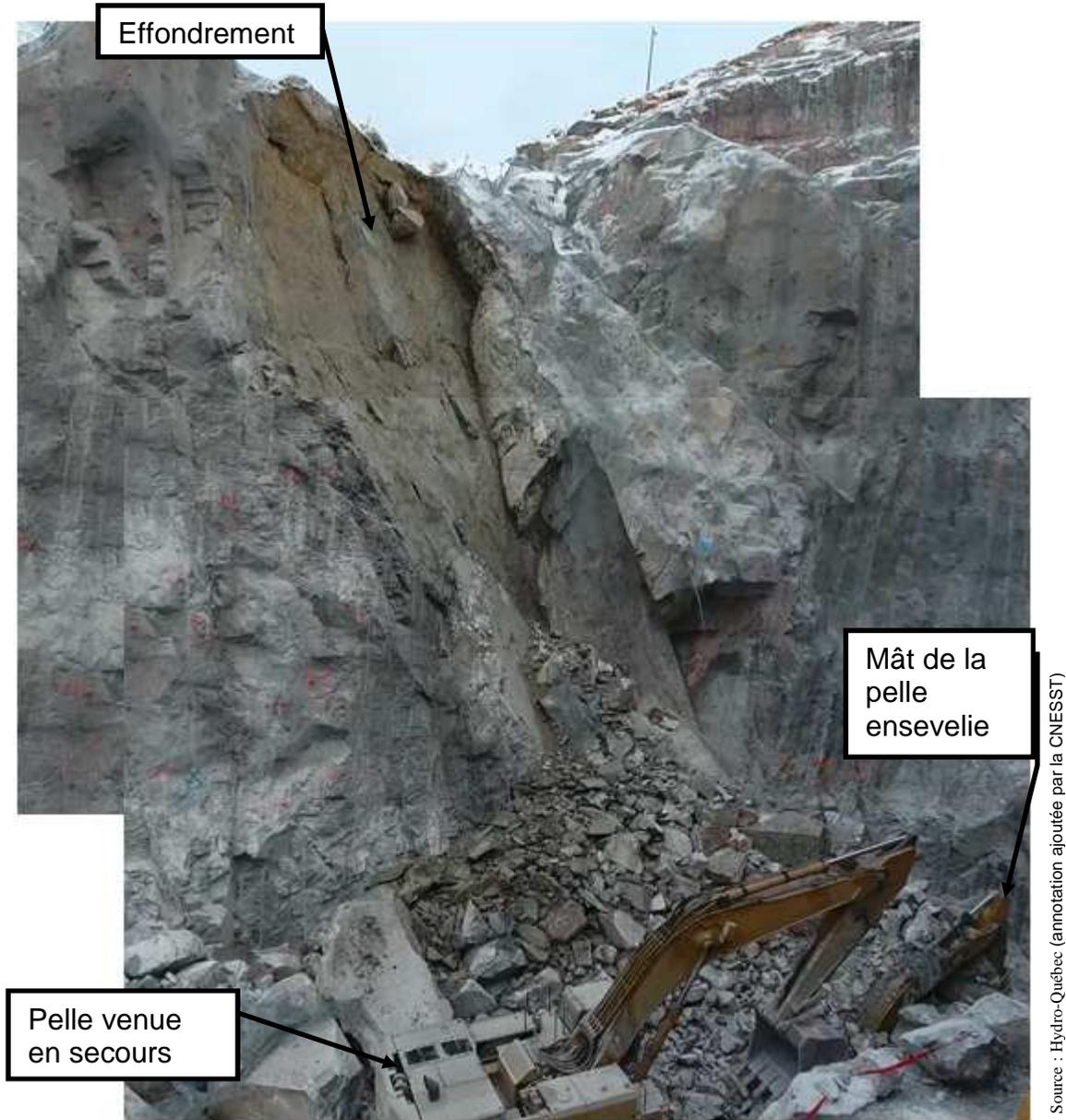


Photo 4 L'effondrement

ANNEXE C

Extraits de recherches littéraires

1) MOVING THE EARTH : THE WORKBOOK OF EXCAVATION (NICHOLS ET DAY, 2010, TRADUCTION LIBRE)

Dans le chapitre *Design theory for rock engineering*, il est écrit : [...] *Finale­ment, la géométrie d'une structure dans la roche dépend de la configuration des caractéristiques géologiques. Dès lors, la conception d'une excavation dans un massif rocheux doit inclure une évaluation approfondie des conditions géologiques et particulièrement des dangers géologiques possibles. [...]*

2) MANUEL CANADIEN D'INGENIERIE DES FONDATIONS (4E EDITION)

Définition du *Roc* : *le roc est un agrégat naturel d'un ou de plusieurs minéraux qui ne peut être brisé manuellement ou désagrégé par le cycle de mouillage-séchage. Les éléments ou blocs qui constituent le roc sont séparés par des discontinuités, des plans de stratifications, des joints, des fractures, des plans de clivage et de cisaillement. Ces surfaces naturelles constituent des plans de faiblesse qui réduisent la résistance des grandes masses de roc. Même le rocher le plus solide peut contenir des blocs instables limités par une discontinuité ou de multiples plans de faiblesse.*

À l'article 3.2.4, il est écrit : *On peut également effectuer la cartographie des caractéristiques des joints à partir de vues exposées de la masse rocheuse sur des affleurements ou sur toute paroi d'excavation où le roc est exposé, comme des puits, des tranchées ou des galeries. [...] Lorsqu'on cartographie des affleurements rocheux, il est important que la fenêtre d'échantillonnage ou la ligne de balayage soit assez longue pour relever suffisamment de détails qui constitueront une analyse statistique valable. Il faut normalement un minimum de 100 mesures locales pour définir la structure dans une zone de roc définie (Hutchinson et Diederichs, 1996).*

Priest et Hudson (1976) suggèrent de prendre de 150 à 350 mesures dans un certain nombre de points choisis de façon à fournir des données relatives aux différentes couches lithologiques et aux caractéristiques très variables des discontinuités. Au moment d'établir un programme de cartographie, il est important de considérer les points suivants :

- *Le fait d'augmenter le nombre de mesures augmente la précision des données et le degré de confiance du résultat;*
- *[...]*

À l'article 3.2.4.2, il est écrit : *L'intégrité structurale d'une masse rocheuse est affectée par la présence de discontinuités. Des structures majeures, de dimensions limitées ou très étendues comme des plans de cisaillement, des failles ou toute autre zone majeure de faiblesse, déterminent le comportement de la masse rocheuse si elles y sont présentes.*

Des structures dont la présence est généralisée vont aussi altérer le comportement de la masse rocheuse. Des systèmes de joints d'expansion et des structures mineures de cisaillement se forment sous les champs de contraintes antérieures qui sont relativement constants dans une région donnée. Ainsi, on retrouve habituellement quelques groupes distincts de structures orientées de la même façon au sein d'une masse rocheuse qu'on désigne comme des ensembles ou des familles de joints. On définit des joints non groupés comme étant aléatoires. Il importe donc de mesurer, de caractériser et d'analyser aussi bien les détails localisés que ceux dont la présence est généralisée. [...]

À l'article 4.4.3, il est écrit : L'utilisation d'un seul forage n'est nullement recommandée même pour un petit projet, car il ne s'agit pas d'une pratique prudente, [...]; un minimum de trois forages devrait être réalisé. Aussi, selon ce même article, le calcul du nombre de forages et de leur espacement constitue un aspect très important des études géotechniques dans des projets vastes et complexes. Cependant, il est impossible d'établir un calcul sur des règles simples pour le déterminer. On doit donc faire appel à un ingénieur géotechnicien expérimenté pour déterminer l'étendue de la reconnaissance et pour superviser le travail.

À l'article 4.8.1, il est écrit : [...] Des forages sont nécessaires pour effectuer la reconnaissance du roc en profondeur. [...]

3) SUBSURFACE INVESTIGATION FOR DESIGN AND CONSTRUCTION OF FOUNDATIONS OF BUILDINGS (ASCE, 1976, TRADUCTION LIBRE)

Dans l'introduction, il est écrit : [...] Les caractéristiques des sols sont très variables et peuvent changer brusquement sur de courtes distances. [...]

Dans la partie 1, il est écrit : [...] Les conditions révélées lors de la construction devraient être comparées à celles prévues par l'exploration. Les informations sur les conditions du sol utilisées ou supposées lors de la conception, y compris les propriétés physiques pertinentes des différentes couches de sol, devraient être disponibles à ceux qui supervisent et inspectent les travaux de construction afin que les conditions déviantes puissent être reconnues sur le terrain pendant la construction et portées à l'attention de l'ingénieur concepteur. [...]

Les explorations géotechniques sont généralement réalisées en quatre phases :

1. Études et explorations initiales pour déterminer la stratification du sol et les caractéristiques requises pour la conception, considérant à la fois la structure en conception et les possibles structures adjacentes. Celles-ci devraient être planifiées en tenant compte des exigences structurales, de la profondeur de l'excavation, des connaissances disponibles sur les conditions du sol et des exigences possibles comme l'assèchement et d'autres problèmes de construction.

2. Augmentation des investigations, si nécessaire, de parties spécifiques de l'investigation initiale pour obtenir plus d'informations pertinentes, pendant la phase de conception et pour la préparation des documents contractuels.

3. Vérification des conditions prévues de fondation pendant la construction afin que des changements puissent être apportés, le cas échéant, à la conception ou à la procédure de construction de l'ouvrage.

4. Observation de stabilité de la structure et du sol après la construction.

Dans la partie 1, il est écrit : [...] *Le nombre, la profondeur, l'espacement et le type d'essais à effectuer lors d'une exploration sont tellement liés aux conditions du site, au type de structure et de ses exigences, qu'aucune règle stricte ne peut être établie. [...]*

Dans la partie 4, il est écrit : [...] *Il devrait y avoir une coopération étroite entre l'équipe d'ingénierie à la conception et le personnel chargé de la supervision de la construction. Cette coopération nécessite que l'organisation chargée de la construction connaisse ce qui a été prévu. Outre les plans et devis reliés au contrat, toutes les données sur le sol, l'interprétation des données et les rapports utilisés pour la conception devraient être mis à la disposition du personnel affecté à la construction. [...]* En établissant clairement la portée du projet, en examinant les conditions prévues du sol et en indiquant celles qui pourraient être inattendues, des lignes de communication claires entre la conception et la construction peuvent être établies de sorte que tout écart par rapport aux conditions prévues puisse être rapidement et adéquatement reconnu, et des modifications peuvent être faites si nécessaire.

[...] *Comme Karl Terzaghi l'a souligné : « En génie civil, le succès dépend principalement d'une perception claire des incertitudes dans les hypothèses fondamentales et des observations soigneusement planifiées et consciencieusement exécutées pendant la construction ». Les valeurs réelles doivent être comparées aux valeurs prédites et, en cas de désaccord, l'ingénieur doit d'abord confirmer la fiabilité des données et leur interprétation. Si des divergences importantes existent encore entre les valeurs mesurées et prédites, des essais et des vérifications supplémentaires sur les paramètres du sol devraient être réalisées et la validité des théories et des hypothèses utilisées dans la conception des fondations réévaluée. Des modifications dans les procédures de conception et de construction pour les fondations devraient être faites en conséquence. [...]*

Dans la conclusion, il est écrit : [...] *Il faut garder à l'esprit que les conditions de sol et de fondation sont très variables et ne sont généralement que connues de manière imparfaite. [...]*

4) CODE OF PRACTICE FOR GROUND INVESTIGATIONS (BSI, 2015, TRADUCTION LIBRE)

Section 1 : Considération préliminaire

Chapitre 7 : Stratégie d'investigation

Un registre des risques devrait commencer dès la première phase de toute investigation. Le registre des risques devrait identifier les risques que les conditions de terrain pourraient entraîner pour le projet de construction proposé et devrait être continuellement maintenu, mis à jour et révisé à mesure que les résultats d'investigation deviennent disponibles. [...]

Section 3 : Planification des investigations du sol

Chapitre 17 : Portée des investigations du sol

17.4 Nature et variabilité du terrain

[...] Même intensive, l'investigation ne peut que réduire les incertitudes et les risques. L'excavation complète est la seule façon de révéler la vraie nature du terrain. [...]

Section 10 : Rapports et interprétation

62 Générale

[...] Le rapport d'investigation du sol et le rapport de conception géotechnique devraient rester des documents actifs tout au long du processus d'investigation; cela inclut l'incorporation des résultats des investigations pendant la construction et après la construction terminée et l'ouvrage en service. [...]

63.4.4 Caractérisation des paramètres

[...] Le rapport devrait inclure des commentaires sur la cohérence des informations existantes et des nouvelles informations, en particulier attirer l'attention sur les anomalies et proposer une investigation plus approfondie pour traiter ces questions.

Le rapport devrait également présenter l'état actuel des conditions du sol comme incorporées dans le modèle du terrain; à cette étape, le modèle devrait être adéquat et devrait fournir une identification claire des dangers du terrain présent et des risques de la conception et la construction. Les incertitudes qui subsistent devraient être discutées et les façons dont elles seront résolues devraient être présentées; il se pourrait aussi que d'autres investigations visant à résoudre les anomalies aient été décidées par rapport à des raisons de coût-avantage; ceux-ci devraient également être discutés.

Un avis devrait être fait concernant les données sur lesquelles l'analyse et les recommandations sont basées, en particulier toutes les limitations et la variabilité. Toutes préoccupations ou problèmes devraient être consignés dans le registre des risques géotechniques et les suggestions de résolution présentées. [...]

63.4.5 Rapport de supervision, de suivi et de maintenance

Commentaire sur 63.4.5

Il est important de noter que l'enquête n'est pas complète une fois la conception de la structure géotechnique terminée. L'enquête est un processus qui se poursuit tout au long de la construction avec des observations visant à confirmer les hypothèses faites dans la conception et à rechercher des écarts par rapport aux conditions attendues du sol ou des eaux souterraines. La conception de la structure pourrait également exiger qu'une évaluation soit effectuée pour tous tassements ou autres mouvements.

La fréquence et les emplacements des vérifications devraient être identifiés dans le rapport de conception géotechnique et communiqués à ceux impliqués dans la construction sur le site. En outre, il convient de préciser qui doit effectuer ces contrôles, et il devrait y avoir une procédure d'examen et d'action, si nécessaire. [...]

Section 11 : Revue durant et après la construction

64 Général

Commentaire sur l'article 64

Il y a une difficulté inhérente pour la prévision des conditions du sol avec les investigations effectuées avant le début des travaux parce que, peu importe l'intensivité des investigations et quelles sont les méthodes utilisées, seule une petite partie du sol est examinée. Il est également vrai que pour de nombreuses investigations, la localisation exacte des structures géologiques prévues n'a pas été déterminée et par conséquent, les conditions du sol spécifiques à chaque structure ne sont pas toujours connues.

Le sol exposé durant la construction et le comportement des structures pendant et après la construction doivent être surveillés afin de vérifier que les prédictions faites pendant la conception restent valides.

65 Objectif de la révision

La révision en cours de construction devrait être effectuée pour déterminer, à la lumière des conditions nouvellement révélées, dans quelle mesure les conclusions tirées des investigations du sol doivent être révisées, le cas échéant. Pour une efficacité maximale, cette révision devrait être effectuée sous la direction d'un conseiller géotechnique.

Lorsque des informations supplémentaires ou différentes sont observées lors de la construction, la conception et la construction devraient être revues et la conception ou la méthode de construction devra être modifiée à la suite de la révision. [...]

Les informations recueillies lors de la construction devraient être utilisées pour :

A) vérifier l'adéquation de la conception;

B) vérifier la sécurité des travaux durant la construction et évaluer l'adéquation des travaux temporaires;

C) vérifier les résultats d'investigation du sol et fournir des commentaires lorsque ces résultats peuvent être réévalués;

D) vérifier les hypothèses concernant les conditions de sol liées à la méthode de construction, lesquelles pourraient inclure les eaux souterraines;

E) vérifier la pertinence des installations d'instruments;

F) [...]

67 Surveillance

[...] NOTE La surveillance pourrait être nécessaire pour vérifier que les travaux de construction peuvent s'effectuer en toute sécurité sur des structures importantes ou critiques telles que les barrages, les digues, les grands bâtiments avec construction souterraine, les excavations profondes ou les tunnels. [...]

5) EUROCODE 7. CALCUL GEOTECHNIQUE – PARTIE 1 : REGLES GENERALES (AFNOR, 2005)

Section 4 Surveillance de l'exécution des travaux, suivi et entretien

4.1 Généralités

[...] (3) Il convient que le contrôle du déroulement des travaux de construction et de la qualité de la réalisation s'appuie sur les opérations suivantes, lorsqu'elles sont pertinentes :

— vérifier la validité des hypothèses de calcul ;

— identifier les différences entre l'état réel du terrain et les hypothèses de calcul ;

— vérifier la conformité des travaux au projet.

[...]

4.2 Surveillance

4.2.1 Programme de surveillance

(1) Le programme de surveillance inclus dans le rapport de dimensionnement géotechnique doit indiquer les limites admissibles pour les résultats qui seront obtenus au cours de la surveillance.

(2) Il convient de spécifier dans le programme de surveillance, le type, la qualité et la fréquence de la surveillance, qui devraient être proportionnés avec :

- le degré d'incertitude des hypothèses de calcul ;
- la complexité des conditions de terrain et de chargement ;
- le risque de rupture en cours d'exécution des travaux ;
- la possibilité de modifier le projet ou d'appliquer des mesures correctives au cours de l'exécution des travaux.

4.4 Contrôle de l'exécution des travaux

(1)P La conformité des opérations réalisées sur le chantier à la méthode d'exécution adoptée dans le calcul et indiquée dans le rapport de dimensionnement géotechnique doit être vérifiée. Les écarts observés entre les hypothèses du calcul et les travaux effectués sur le chantier doivent être rapportés sans délai.

[...]

6) EUROCODE 7. CALCUL GEOTECHNIQUE – PARTIE 2 : RECONNAISSANCE DES TERRAINS ET ESSAIS (AFNOR, 2007)

Section 2 Élaboration des reconnaissances des terrains

2.5 Contrôle et suivi

(1)P Pour vérifier que les conditions du terrain correspondent à celles qui ont été déterminées lors des reconnaissances géotechniques, et que les propriétés des matériaux approvisionnés et l'exécution des travaux correspondent à ce qui est prévu ou spécifié, un certain nombre de contrôles et d'essais complémentaires doivent être effectués, s'il y a lieu, lors de la construction et de l'exécution du projet.

[...]

(2)P Les contrôles suivants doivent être effectués :

- contrôle de la coupe du terrain en cours d'excavation ;
- examen du fond de l'excavation.

(3) Les contrôles généraux suivants peuvent être effectués :

— [...]

— mesures du comportement des constructions, des travaux de réseaux ou de génie civil avoisinants ;

— mesures du comportement de l'ouvrage réel. [...]

(4)P Les résultats des contrôles doivent être compilés, rapportés et comparés aux spécifications du projet. Des décisions doivent être prises sur la base de ces observations.

P : selon la norme, signifie un principe.

7) ISO 31010 : GESTION DES RISQUES – TECHNIQUES D'ÉVALUATION DES RISQUES (CEI, 2009)

4.3.4. Évaluation des risques

[...] L'évaluation des risques permet de bien appréhender les risques, leurs causes, leurs conséquences et la probabilité d'occurrence. [...]

6.6 Application de l'évaluation des risques au cours du cycle de vie

[...] Lors de la phase de conception et de développement, l'évaluation des risques permet :

- d'assurer que les risques liés au système sont tolérables,*
- de participer au processus d'amélioration de la conception,*
- de participer aux études de rentabilité,*
- d'identifier les risques ayant un impact sur les phases suivantes du cycle de vie.*

Section 6 Rapport de reconnaissance des terrains

6.3 Évaluation des informations géotechniques

[...] (4) L'utilisation de moyennes peut masquer la présence d'une zone de plus faible résistance et il convient d'en faire usage avec prudence. Il est important de repérer les zones de faible résistance. Une variation des paramètres ou des indices géotechniques peut indiquer d'importantes variations des conditions du site.

8) CE QUE LES INGENIEURS FONT (ORDRE DES INGENIEURS DU QUEBEC, 2011)

La Loi sur les ingénieurs précise, entre autres, les actes exclusifs et les champs de pratique des ingénieurs. Selon l'article 3 de la loi, l'ingénieur est autorisé à exécuter, et ce, de façon exclusive, les actes suivants :

- donner des consultations et des avis, c'est-à-dire analyser, interpréter des données, faire des hypothèses et parvenir à une opinion éclairée, exprimée dans un vocabulaire pouvant être compris de celui qui le consulte;*
- faire des mesurages, des tracés, préparer des rapports, des calculs, des études, des dessins, des plans, des devis et des cahiers des charges;*
- inspecter ou surveiller les travaux dans le but de contrôler et de vérifier.*

Tous ces actes peuvent être accomplis dans des domaines précis, tels qu'ils sont décrits par l'article 2 de la Loi, soit :

- barrages, canaux, havres, phares et tous travaux relatifs à l'amélioration, à l'aménagement ou à l'utilisation des eaux;*
- travaux électriques, mécaniques, hydrauliques, aéronautiques, électroniques, thermiques, nucléaires, métallurgiques, géologiques ou miniers ainsi que ceux destinés à l'utilisation des procédés de chimie ou de physique appliquée;*
- [...]*
- mécanique des sols nécessaires à l'élaboration de travaux de génie;*
- ouvrages ou équipements industriels impliquant la sécurité du public ou des employés.*

9) FORAGE EXPLORATOIRE

Nous pouvons établir qu'un forage à environ tous les 60 m le long de la ligne d'excavation pourrait être retenu comme une règle sécuritaire à partir des sources suivantes :

- Selon le rapport de SRK Consulting (Canada), la pratique dans le domaine minier est de faire un forage à environ tous les 60 m pour déterminer les réserves minérales d'un gisement.
- Selon la Federal Highway Administration (1999), l'espacement entre les forages est de 30 à 60 m pour une paroi rocheuse le long d'une route.
- Selon la Federal Highway Administration, National Highway Institute (2002), l'espacement entre les forages pour les coupes dans le roc d'une longueur de plus de 60 m devrait généralement être entre 60 et 120 m.
- Selon AFNOR (NF EN 1997-2 septembre 2007), il convient d'adopter pour les ouvrages linéaires (routes, voies ferrées, canaux, canalisations, digues, tunnels, murs de soutènement), des sondages de reconnaissances géotechniques espacés de 20 m à 200 m.

ANNEXE D

Liste des personnes et témoins rencontrés

- M. Virgile Albert, administrateur de projets Romaine-1 et 4, Hydro-Québec
- M^{me} Mélanie Carrière, ing., chef géotechnique, Conception des aménagements de production, hydraulique et géotechnique (CAPHG), Hydro-Québec
- M^{me} Karine Champagne, ing. géologue, CAPHG, Hydro-Québec
- M. Redha Kara, ing., chef unité hydraulique et géotechnique, CAPHG, Hydro-Québec
- M. Michael Labelle, directeur, ingénierie de production, Hydro-Québec;
- M. Victor Gauvin, administrateur d'ingénierie Romaine-4, Hydro-Québec;
- M^{me} Catherine Ouellet, ing. de projets, Administration de projets Romaine-4, Direction principale Projets de construction, Hydro-Québec
- M. Marc Imbeau, chef planification, estimation et contrôle de coût, Hydro-Québec
- M. Jean-Pierre Perron, chef chantier, Hydro-Québec
- M. Bruno Boucher, chef administration de contrat, Hydro-Québec
- M. Gaétan Noël, ingénieur résident, Hydro-Québec
- M. Denis Fortin, géologue, Hydro-Québec
- M. Gaston Morin, géologue, Hydro-Québec
- M. Yan Gagnon, chef d'équipe géologue, Hydro-Québec
- M. Alexis Cardin, adjoint technique à l'ingénierie, Hydro-Québec
- M. Dany Déry-Chamberland, géologue, Hydro-Québec
- M. Romuald Racine, coordonnateur santé-sécurité, Hydro-Québec
- M. Claude Barette, agent de sécurité, Hydro-Québec
- M. Luc Gagné, agent de sécurité, Hydro-Québec;
- M. Luc Bouchard, agent de sécurité, Hydro-Québec;
- M. Jérôme Laprise, agent de sécurité, Hydro-Québec;
- M. Gaston Morin, ing., Hydro-Québec;
- M^{me} [F], [...], EBC inc.;
- M. [C], [...], EBC inc.;
- M. [G], [...], EBC inc.;
- M. [H], [...], EBC inc.;
- M. [I], [...], EBC inc.;
- M. [J], [...], EBC inc.;
- M. [K], [...], EBC inc.;
- M. [E], [...], EBC inc.;
- M. Vincent Maheu, agent, Sûreté du Québec;
- M^{me} Anne Gagnon, enquêteuse, Sûreté du Québec;
- M^{me} Mireille Picard, agente, Sûreté du Québec;
- M. Robert Poulin, enquêteur, Sûreté du Québec;
- M. André Voyer, technicien en scènes de crime, Sûreté du Québec.

ANNEXE E

Rapport d'expertise

Rapport intérimaire concernant les causes de l'accident survenu le 9 décembre 2016 sur le chantier d'Hydro-Québec Romaine 4 du portail amont de la déviation provisoire

Rapport préparé pour

La Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail



Rapport préparé par



SRK Consulting (Canada) Inc.
5CC009.000
Le 9 mars 2017

SRK Consulting

Rapport intérimaire concernant les causes de l'accident survenu le 9 décembre 2016 sur le chantier d'Hydro-Québec Romaine 4 du portail amont de la déviation provisoire

Madame Cathy Chénard

Directrice santé sécurité
Service de la Prévention-Inspection et Service de la réparation — CAR
Direction régionale Côte-Nord
Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail
700, boulevard Laure, Bureau 236
Sept-Îles (Québec) G4R 1Y1

SRK Consulting (Canada) Inc.

1984 Regent St. South
Sudbury, ON P0M 1N0

Courriel : dthibodeau@srk.com
Site web : www.srk.com

Tél. : +1.705.682.3270

SRK Project Number 5CC009.000

Mars 2017

Auteur :

Denis Thibodeau, PhD, ING.
Conseiller principal (géomécanique)

Contrôle par les pairs :

Sébastien Bernier, MSc, géo.
Conseiller principal (Ressources minérales)

Table des matières

Avertissement	3
Droit d'auteur	3
1 Introduction	4
2 Rappel des évènements	4
2.1 Cause directe	5
2.2 Causes indirectes ou facteurs contributifs	7
2.2.1 Collecte de données géotechniques	7
2.3 Études géotechniques	8
2.4 Communications	8
2.5 Séquence d'excavation	9
2.6 Soutènement	9
3 Conclusions	13
4 Recommandations	13

Liste des tables

Tableau 1 : Orientation des familles de joints secteur de la dérivation provisoire	5
Tableau 2 : Nombre de boulons si requis installés.....	9

Liste des figures

Figure 1 : Plan de glissement vu vers l'aval (12 décembre 2016).....	4
Figure 2 : Illustration du mécanisme de l'éroulement vue vers l'aval (9 décembre 2016)	6
Figure 3 : Illustration du mécanisme de l'éroulement vue vers l'aval (9 décembre 2016)	7
Figure 4 : Sondage exploratoire fait près du portail amont	11
Figure 5 : Sondages supplémentaires suggérés (modifié de 6734-70707-008-01-E-HQ-0-QT717-01-SM) ...	12
Figure 6 : Géométrie de paroi avec gradins [pas à l'échelle].....	12

Avertissement

Les opinions exprimées dans ce rapport sont basées sur les informations fournies à SRK Consulting (Canada) Inc. (« SRK ») par la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (« CNESST »). Ces opinions sont fournies en réponse à la demande expresse de la CNESST et sont sujettes aux termes du contrat entre SRK et la CNESST. SRK a fait preuve de diligence dans l'examen des informations fournies. Bien que SRK ait comparé les principales données fournies avec les valeurs attendues, l'exactitude des résultats et des conclusions de l'examen repose entièrement sur l'exactitude et l'exhaustivité des données fournies. SRK n'accepte aucune responsabilité en cas d'erreurs ou d'omissions dans les informations fournies et n'accepte aucune responsabilité résultant de décisions commerciales ou d'actions qui en découlent. Les opinions présentées dans ce rapport s'appliquent aux conditions et aux caractéristiques du site tel qu'elles existaient au moment des enquêtes de SRK et à celles raisonnablement prévisibles. Ces opinions ne s'appliquent pas nécessairement aux conditions et aux caractéristiques qui peuvent survenir après la date du présent rapport.

Droit d'auteur

Ce rapport est protégé par un droit d'auteur conféré à SRK Consulting (Canada) Inc. Il ne peut être reproduit ou transmis sous quelque forme ou par quelque moyen que ce soit à une personne sans l'autorisation écrite du détenteur du droit d'auteur, SRK, sauf aux fins énoncées dans la soumission présentée à la CNESST le 13 janvier 2017 et selon les termes du contrat entre SRK et la CNESST.

1 Introduction

La Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (« CNESST ») a demandé à SRK Consulting (Canada) Inc. (« SRK ») de lui fournir de l'expertise géotechnique pour lui émettre des hypothèses sur les causes géotechniques de l'accident mortel du 9 décembre 2016. En plus des hypothèses se rapport fournira des recommandations sur de possibles mesures préventives afin de diminuer le risque d'un nouvel écroulement.

2 Rappel des évènements

Le 9 décembre 2016, un opérateur de pelle hydraulique est mort écrasé dans sa cabine, enseveli complètement à la suite d'un écroulement de roc de la paroi gauche du canal d'amenée au portail amont de la galerie de déviation provisoire en construction. Un dynamitage effectué avant l'accident, le 9 décembre a amené le radier à l'élévation 371.5 m le long de la paroi gauche. Le sommet de la paroi gauche étant à l'élévation 420 m, la hauteur de la paroi gauche au moment de l'accident était de 48.5 m. Pendant le marinage, un glissement le long d'un joint (Figure 1) a permis l'écroulement de la paroi gauche. De plus, le joint selon le système Q a un coefficient de rugosité J_r de 1.5 et un coefficient d'altération J_a de 2.0. Donc le coefficient de friction du joint est moins élevé que pour des surfaces de joint saines et non altérées. Un volume de roc estimé à 1633.7 m³ (4313 tonnes métriques) a été déplacé.



Figure 1 : Plan de glissement vu vers l'aval (12 décembre 2016)

2.1 Cause directe

À la suite d'un tir du 9 décembre, un joint apparenté aux joints de la famille no 2 (voir le Tableau 1) a été mis à découvert lors du dynamitage et du marinage. L'enlèvement de matériaux servant de contrefort au joint a permis le glissement sur plan et l'éroulement rocheux.

Tableau 1 : Orientation des familles de joints secteur de la dérivation provisoire

Familles de joints	Pendage (°)	Direction du pendage (°)	Type de famille	Association	Pourcentage des joints mesurés
J1	17	204	Principale	Joints ouverts	29,9%
J2	55	170	Principale	Intrusions de pegmatite et joints ouverts	8,9%
J3	74	134	Principale	Joints fermés	4,5%
J4	79	002	Principale	Joints fermés	2,5%

Familles de joints	Pendage (°)	Direction du pendage (°)
J1	5 - 30	195 - 215
J2	45 - 65	160 - 180
J3	65 - 85	125 - 145
J4	70 - 90	000 - 015

Référence : Contrat R4-06-01 Excavation et bétonnage de la dérivation provisoire Rapport géotechnique de paramètres de référence Geotechnical Baseline Report (GBR)

Donc, la cause directe de l'éroulement rocheux de la paroi gauche du canal d'amenée au portail amont de la déviation provisoire est l'exposition d'un joint de faible coefficient de friction sur la paroi de gauche. Une fois que le contrefort fourni par le roc dynamité a été enlevé par le marinage, le roc a pu glisser le long du joint. Les Figures 2 et 3 illustrent le mécanisme de la rupture. Le soutènement en place n'a pas été suffisant pour empêcher le glissement et maintenir le volume de roc en place comme le démontre le calcul de stabilité suivant :

W : masse de roc déplacé lors de l'éroulement : 4313 tonnes métriques (Tm)

C : cohésion du joint : 0 MPa

Φ : angle de friction du joint : 35 °

g : constante gravitationnelle : 9.81 m/s²

α : angle du joint par rapport à l'horizontale : 60 °

F_n : Force normale sur le joint = $W * g * \cos(\alpha) = 4313 \text{ Tm} * 9.81 \text{ m/s}^2 * \cos(60^\circ) = 21 \text{ 115 kN}$

F_c : Force de cisaillement sur le joint = $W * g * \sin(\alpha) = 4313 \text{ Tm} * 9.81 \text{ m/s}^2 * \sin(60^\circ) = 36 \text{ 641 kN}$

Selon le critère de Mohr-Coulomb

La résistance au cisaillement $\tau = C + F_n \tan(\Phi) = 0 + 21 \text{ 115 kN} * \tan(35^\circ) = 14 \text{ 785 kN}$

Facteur de sécurité $FS = \tau / F_c = 14 \text{ 785} / 36 \text{ 641 kN} = 0.40$ sans les boulons

Un total de 31 boulons ont traversé le plan de glissement :

- 18 de type A 4 m de long
- 8 de type A 6 m de long
- 5 de type C de 8 m de long.

La capacité en traction des boulons de type A est de 200 kN et en cisaillement de 100 kN (selon le critère de Tresca 50 % de la capacité en traction)

La capacité en traction des boulons de type C est de 430 kN et en cisaillement de 215 kN (selon le critère de Tresca 50 % de la capacité en traction)

Donc les forces résistantes au cisaillement sont τ plus la contribution des boulons en cisaillement (BC)

$$BC = 26 \text{ boulons type A} * 100 \text{ kN} + 5 \text{ boulons type C} * 215 \text{ kN} = 3\,675$$

$$\text{La Force totale résistante au cisaillement} = 14\,785 \text{ kN} + 3\,675 \text{ kN} = 18\,460 \text{ kN}$$

Le facteur de sécurité incluant les boulons = $18\,460 \text{ kN} / 36\,641 \text{ kN} = 0.50$ confirmant que les boulons n'ont pas été suffisant pour empêcher le glissement.

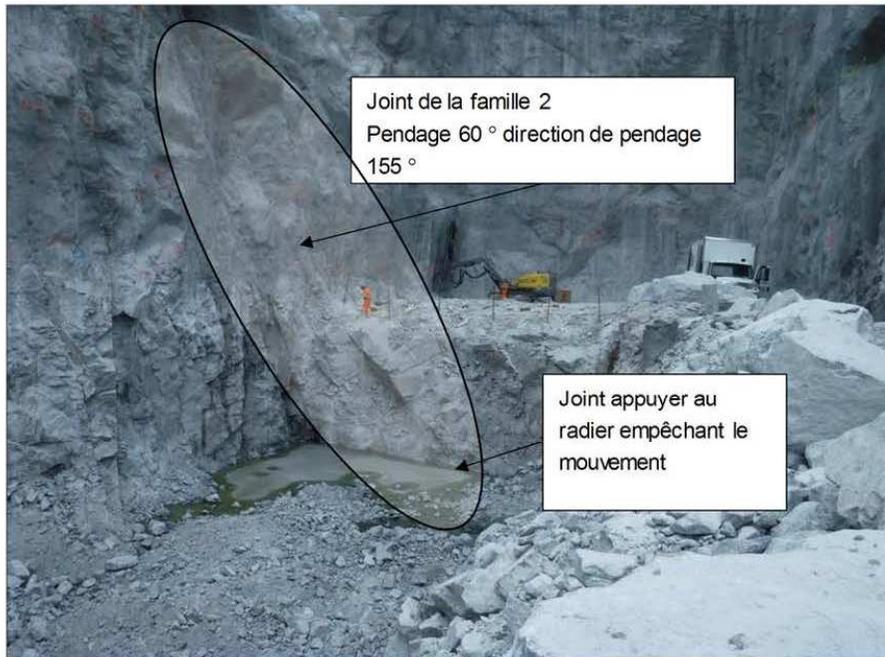


Figure 2 : Illustration du mécanisme de l'écroulement vue vers l'aval (9 décembre 2016)

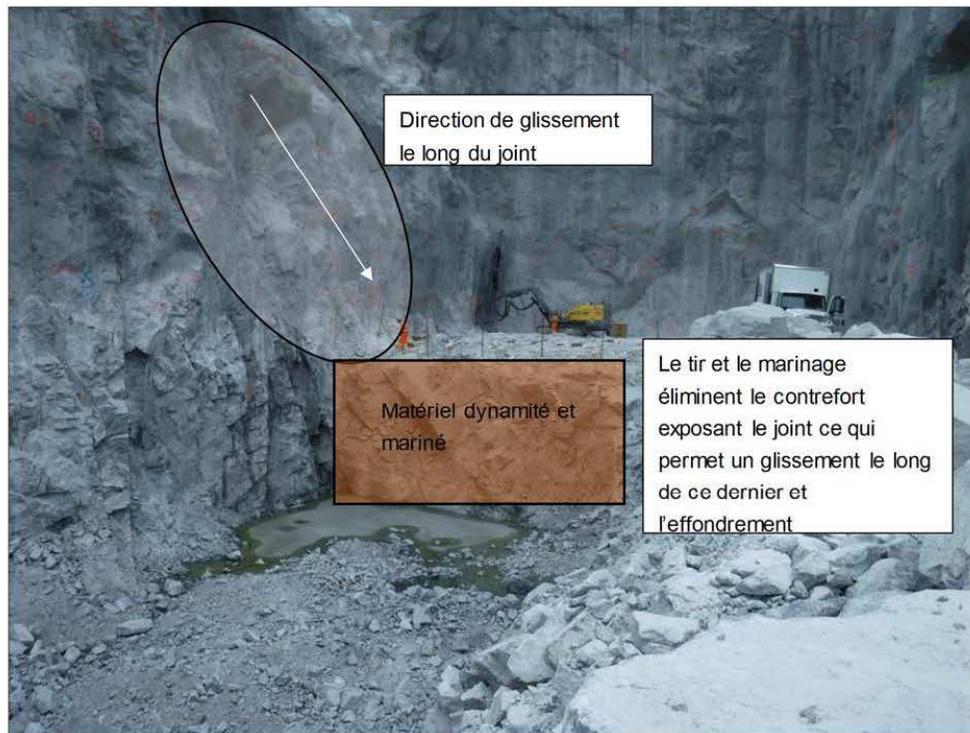


Figure 3 : Illustration du mécanisme de l'écroulement vue vers l'aval (9 décembre 2016)

2.2 Causes indirectes ou facteurs contributifs

2.2.1 Collecte de données géotechniques

Pour la conception initiale de l'étude de faisabilité, la qualité et la quantité de données géotechniques sont suffisantes avec un sondage (TF-68-14) près du portail amont (Figure 3) et la cartographie de surface. Par contre, pour faire les études détaillées, plus de données sont nécessaires. Par exemple, la cartographie de surface après le décapage de l'aire de travail aurait pu être suppléée grâce à des sondages exploratoires le long de l'excavation du portail. Un minimum de trois à cinq sondages supplémentaires comme l'indique la Figure 4 aurait permis de confirmer les hypothèses de conception et d'identifier des structures ou formations géologiques inconnues pouvant être nuisibles à la stabilité des ouvrages, surtout si la hauteur finale de l'excavation est de 30 m ou plus.¹

¹ Le nombre de forages supplémentaires se base sur la pratique ministérielle d'avoir un forage à tous les 60 m environ pour déterminer les réserves minérales d'un gisement. Également selon le rapport FHWA IR-99-015 Geotechnical Engineering Circular No. 4 Sabitani et al., Published in 1999 par Office of Bridge technology, Federal Highway Administration Washington D.C. des forages distants de 30 m à 60 m pour une paroi verticale le long d'une route.

2.3 Études géotechniques

Les études géotechniques effectuées sont basées sur de bons principes. Sachant que les excavations sont près de la surface, la force gravitationnelle est le moteur de mouvement le long de plan de glissement, ou de mouvement de dièdres formés par les joints et dykes qui recoupe le massif rocheux. Les études géotechniques effectuées sont conformes aux normes de l'industrie en considérant les joints, les structures et les formations géologiques identifiés.

Par contre selon l'annexe D2 section 5.1.2 du rapport R4-06-90 Déviation provisoire et batardeaux Rapport Synthèse d'Hydro-Québec : « les dimensions des coins ont été limitées à la hauteur d'une banquette soit 10 m ». Il semblerait qu'une étude de stabilité de l'excavation finale du canal d'amenée et du portail amont n'a pas été complétée avec les logiciels Swedge et Rocplane de Rocscience utilisés par Hydro-Québec (ou toutes autres méthodes de calculs appropriés). Ceci aurait permis une approche de conception proactive surtout si une analyse des risques avait été incluse pour l'excavation finale. La combinaison d'études pour l'excavation finale et l'analyse des risques permettraient de proposer des mesures d'atténuation minimisant les risques tels qu'un raffinement du schéma de boulonnage proposé.

Les joints de la famille J2 ont été identifiés comme pouvant créer des glissements sur plans (section 6.1.3 du Rapport géotechnique de paramètre de référence [« GBR »]), une analyse probabiliste tenant de la variabilité de l'orientation des joints [section 5.2.4.4 du GBR tableau 5.14 [Tableau 2 dans le texte] en considérant l'excavation finale avec les logiciels Swedge et Rocplane aurait pu démontrer la possibilité d'un plan de glissement important pour une hauteur de paroi de 50 m. À la suite de cette analyse, une gestion de risques et des mesures d'atténuation auraient pu être proposées telles que, mais non limitées à :

- L'excavation d'un gradin pour minimiser le volume de roche pouvant glisser et créer une berme pour stopper et retenir les chutes de roc [Figure 5]. Selon le guide de conception d'Hydro-Québec section 3 Géologie et géotechnique section 3.5.2.4 Géométrie : « selon la topographie du socle et lorsque plusieurs paliers d'excavation sont nécessaires pour atteindre les côtes finales, une berme de 3 à 5 m de largeur est généralement conservée à chaque série de trois banquettes consécutives pour fins de stabilité, de sécurité d'accès ou d'entretien. »] Une berme de 3 à 5 mètres aurait dû être établie. Cela n'a pas été fait et aucun rapport ou note n'ont été trouvés justifiant la décision de ne pas créer de berme.
- Une révision du schéma de boulonnage afin de mieux sécuriser la paroi soit en utilisant des boulons plus longs, en augmentant la densité de boulons ou en utilisant des boulons de plus grande capacité. Les calculs doivent tenir compte des résultats obtenus à l'aide des logiciels tels Swedge et de la géométrie de l'excavation et de la zone de rupture anticipée.

2.4 Communications

Selon la suite des événements relatés par Hydro-Québec, le jour de l'accident deux dynamitages ont été faits sans que les géologues d'Hydro-Québec puissent inspecter la surface rocheuse exposée. Ce faisant, la structure ayant causé l'écroulement n'a pas été répertoriée et des analyses de stabilité qui auraient indiqué un risque d'instabilité n'ont pas été faites. De ce fait, des mesures préventives pour sécuriser la paroi n'ont pas été appliquées avant le deuxième dynamitage.

Donc il faudrait s'assurer, qu'avant d'autoriser un dynamitage, que les géologues d'Hydro-Québec aient inspecté les surfaces exposées après le maritage afin d'évaluer la possibilité d'instabilité et établir des mesures correctrices s'il y a lieu.

Un autre aspect au niveau de la communication est l'absence d'un journal de forage pouvant être consulté par les géologues d'Hydro-Québec. Ce journal tenu par les foreurs peut mener à l'identification de structures ou de géologie défavorables intersectées par les forages de production, tels des vides, des zones plus fracturées ou des zones plus altérées.

2.5 Séquence d'excavation

La paroi de gauche selon les études géotechniques était moins favorable à la stabilité. Ce fait a été confirmé sur le terrain par le nombre de mesures correctrices appliquées sur la paroi gauche [excavation de blocs instables, et le nombre de boulons si requis installés [Tableau 2]]. Il aurait été prudent de prévoir une séquence d'excavation qui commence à la paroi droite plus stable pour se diriger vers la paroi gauche moins stable. Cette séquence d'excavation aurait permis :

1. L'identification de structures ou de conditions géologiques potentiellement nuisibles à la stabilité de la paroi gauche avant d'excaver plus profondément cette paroi.
2. Le maintien d'un contrefort rocheux sur la paroi gauche procurant plus de stabilité à la paroi ce qui permet d'établir des mesures préventives pour assurer la stabilité de la paroi lors de l'excavation d'une banquette.

Tableau 2 : Nombre de boulons si requis installés

Longueur de boulon	Nombre total de boulons si requis installés	Nombre total de boulons si requis installés sur la paroi gauche	Pourcentage de boulon si requis installés sur la paroi gauche
4 m	279	179	64
6 m	53	42	79
8 m	18	17	94
Total	350	238	68

2.6 Soutènement

Le soutènement planifié a été conçu en fonction d'une banquette de 10 mètres de hauteur [annexe D2 section 5.1.2 du rapport R4-06-90 Déviation provisoire et batardeaux Rapport Synthèse d'Hydro-Québec : les dimensions des coins ont été limitées à la hauteur d'une banquette soit 10 m.]. En effectuant une analyse de stabilité pour la hauteur finale de la paroi de gauche [50 m], la possibilité d'un écoulement majeur aurait pu être déterminée permettant d'ajuster la longueur et le schéma de boulonnage en conséquence.

À titre indicatif, le calcul suivant peut-être fait :

Hypothèses :

Demande : Force de cisaillement sur le joint F_c (section 2.1) : 36 641 KN

Résistance au cisaillement τ (section 2.1) : 14 785 KN

Capacité du boulon type C en traction 430 KN

Capacité du boulon en cisaillement (critère de Tresca 50 % de la capacité en traction) : 215 KN

Nombre de boulons requis pour un facteur de sécurité d'un : Contribution de boulons à la stabilité (BC)/Capacité individuelle en cisaillement d'un boulon

$$FS = BC + \tau/FC$$

$F_c - \tau = BC : 36\,641\text{ KN} - 14\,785\text{ KN} = 21\,856\text{ KN}$

Nombre de boulons requis = $21\,856\text{ KN} / 215\text{ KN} = 102$ boulons

Donc une évaluation grossière indique que 102 boulons auraient été nécessaires avec une maille 1.4 m x 1.4 m pour soutenir la masse rocheuse écroulée. En fait, la maille de boulonnage peut être plus lâche si une analyse tenant compte de la contribution des boulons à la cohésion du plan de glissement était faite. Donc la maille de boulonnage se situerait entre 1.4 m x 1.4 m et 3 m x 3 m. La longueur des boulons pour ce cas précis serait de 8 m étant donné que le plan de glissement se trouvait à une distance moyenne de 7.5 m de la surface de la paroi. La longueur de 8 m permet d'avoir un minimum de 0.5 m d'ancrage au-delà du plan de glissement. En général, la longueur des boulons est en fonction de la position des plans de ruptures ou de glissement établis par les analyses géotechniques telles que mentionnées à la section 2.3. D'autres possibilités existent pour assurer la stabilité de la paroi telle établir un gradin, utiliser des boulons de plus grande capacité, établir une pente, etc.

Les boulons sélectionnés sont appropriés. Ce sont des boulons mécaniques à barres crénelées pouvant être injectés avec un coulis de ciment. L'ancre mécanique permet de fournir un soutènement actif dans le massif rocheux en tendant les boulons donc empêchant tout mouvement du massif rocheux après l'installation des boulons. Un boulon non tendu avec coulis de ciment fournit une résistance passive dans le massif rocheux et agit seulement lorsque le massif rocheux commence à se déplacer. L'injection subséquente des boulons tendus permet :

1. De maintenir la traction dans le boulon
2. D'assurer un couplage continu entre le massif rocheux et le boulon faisant de celui-ci un soutènement rigide qui arme le massif rocheux.
3. De fournir une résistance accrue à la corrosion.

Par contre, lorsque la température chute sous le point de congélation de l'eau, l'injection de coulis de ciment ne peut pas se faire donc il serait peut-être approprié de considérer l'utilisation de résine injectable pouvant être utilisée sous le point de congélation et ayant un temps de prise plus rapide qu'un coulis de ciment.

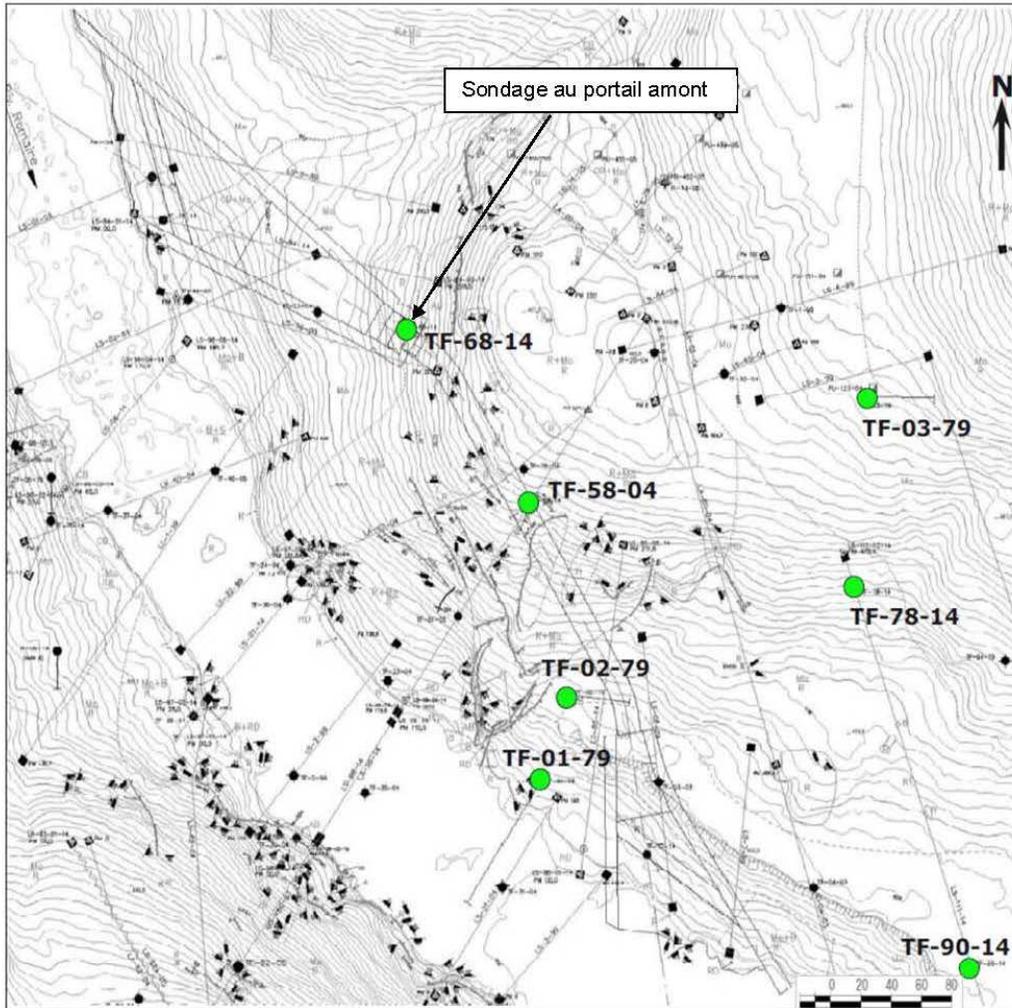


Figure 4 : Sondage exploratoire fait près du portail amont

Référence : (Ingénierie Phase 1 R4-06-90 Dérivation provisoire et batardeau analyse de la géologie structurale et stabilité des excavations)

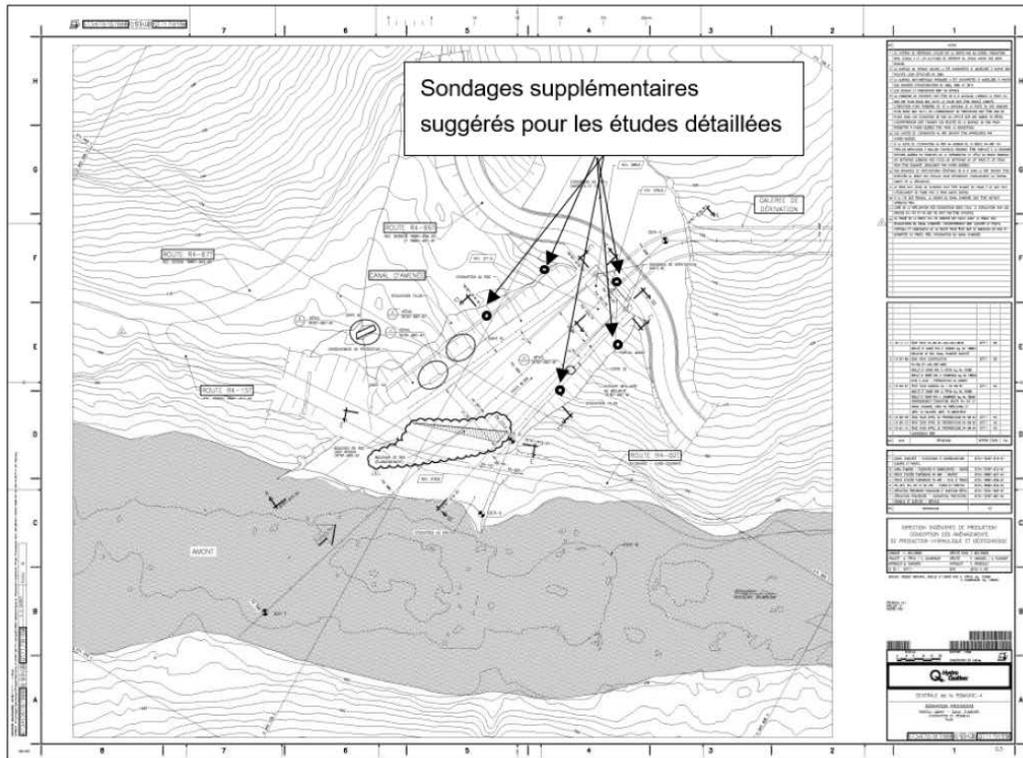


Figure 5 : Sondages supplémentaires suggérés (modifié de 6734-70707-008-01-E-HQ-0-QT717-01-SM)

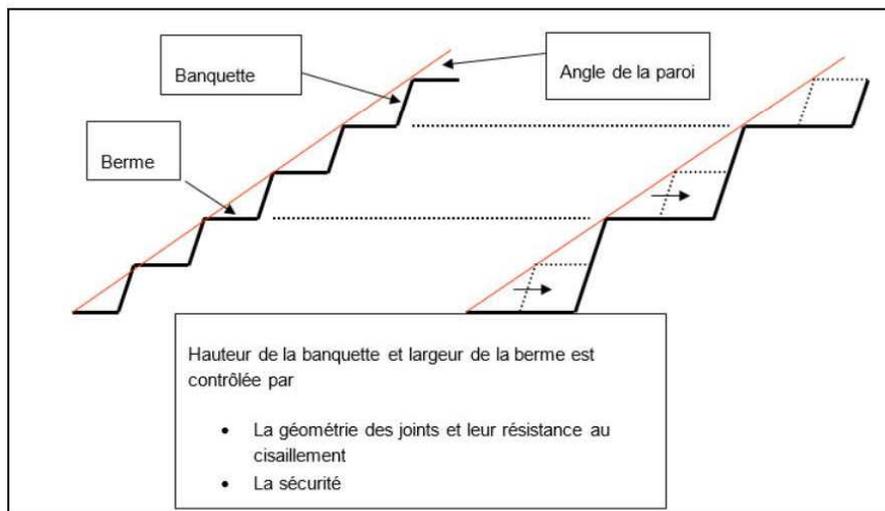


Figure 6 : Géométrie de paroi avec gradins [pas à l'échelle]

3 Conclusions

La cause directe de l'accident du 9 décembre 2016 est l'écrasement rocheux de la paroi gauche du canal d'amenée au portail amont de la déviation provisoire à la suite de l'exposition d'un joint de faible coefficient de friction sur la paroi de gauche. Une fois que le contrefort fourni par le roc dynamité a été enlevé par le marinage, le roc a pu glisser le long du joint. Le soutènement en place n'a pas été suffisant pour empêcher le glissement et maintenir le volume de roc en place.

Par contre, une série d'évènements ou d'omissions ont permis de créer les conditions menant à l'accident du 9 décembre 2016. Voici les éléments identifiés qui indirectement ont créé les conditions nécessaires menant à l'accident du 9 décembre :

- Absence d'études géotechniques détaillées pour l'excavation finale du canal d'amenée et du portail amont
- Problème de communication entre les foreurs, les boufeux et les géologues d'Hydro-Québec pour déterminer les conditions défavorables lors des forages et pour permettre la cartographie des surfaces exposées entre les dynamitages.
- Absence de séquence d'excavation pour minimiser l'impact des conditions défavorables à la stabilité.
- Absence de levées géotechniques additionnelles près des excavations finales afin de confirmer ou d'infirmer les hypothèses utilisées lors de l'étude de faisabilité et ajuster les paramètres et les études géotechniques pour établir les plans détaillés.

4 Recommandations

À la suite de l'analyse effectuée par SRK, les recommandations suivantes sont proposées :

- 1- Faire des études géotechniques additionnelles sur le terrain avant d'établir les plans détaillés afin de
 - a. Confirmer ou infirmer les hypothèses utilisées lors de l'étude de faisabilité.
 - b. Augmenter le niveau de confiance en ce qui concerne la présence ou l'absence de structures ou de conditions géologiques nuisible à la stabilité des ouvrages.
- 2- Confirmer que les boulons choisis et que le schéma de boulonnage proposé est adéquat pour assurer la stabilité de l'excavation finale.
- 3- Faire une étude de stabilité pour l'excavation finale ainsi que chaque étape menant à l'excavation finale [c.-à-d. faire une étude pour la première banquette, faire une étude pour les deux premières banquettes, etc.].
- 4- Établir une méthode d'auscultation des parois.
- 5- S'assurer qu'un ingénieur-géologue confirme que les boulons, si requis, sont efficaces et stabilisent adéquatement le massif rocheux.
- 6- Ajouter des gradins pour des parois verticales de plus de 30 mètres comme indiqué dans le guide de conception d'Hydro-Québec, section 3, géologie et géotechnique.
- 7- Établir un journal de forage.
- 8- Établir une séquence d'excavation qui va des conditions favorables à la stabilité vers les conditions défavorables.

- 9- Cartographier les surfaces exposées par un dynamitage et recommander des mesures correctives s'il y a lieu avant d'effectuer le dynamitage suivant.

Rédigé par

Denis Thibodeau, PhD, ING.
Conseiller principal [Géomécanique]

Contrôlé par

Sébastien Bernier, MSc, géo
Conseiller principal [Ressources minérales]

ANNEXE F

Extrait du programme de prévention du maître d'œuvre
Projet de la Romaine

Programme de prévention Projet de la Romaine	Numero	EQ-8040-ME02/A1	Rev. A
	En vigueur le	1 mai 2012	
	Page	i	

Contrat	Service	Type	Séquence	Révision
R3-00	SS	PP	0001	A
Classement HQ :			1603.02.05.16.01	

PROGRAMME DE PRÉVENTION DU MAÎTRE D'ŒUVRE

PROJET DE LA ROMAINE



Approuvé par : _____

Jean-Pierre Perron, ing.
Chef-de chantier
Direction Projets Complexe de la Romaine

Mise à jour: Avril 2016

Titre Programme de prévention Projet de la Romaine	Numéro EQ-6040-ME02/A1 rév. A En vigueur le 1 mai 2012 Page 32 de 41
--	--

Toute pièce en mouvement qui est accessible par les travailleurs doit être protégée. Un mécanisme d'arrêt d'urgence doit être installé sur les convoyeurs lorsque des passerelles sont mises en place parallèlement aux convoyeurs.

Ce mécanisme devra être opérationnel en tout temps et sa vérification consignée dans un livre de bord par l'opérateur et le personnel d'entretien. Concernant la poussière, le bruit, les vibrations et le contrôle des énergies, les employeurs contractants ont l'obligation de se conformer au Règlement sur la santé et sécurité du travail.

5.5 Explosifs – Entreposage

Avant que l'employeur contractant se mobilise dans l'aire d'entreposage des explosifs, un plan conforme aux exigences de la loi et de la réglementation devra être soumis pour vérification. Ce plan sera transmis préalablement à la Sûreté du Québec par l'employeur contractant pour approbation.

5.6 Forage

L'employeur contractant devra soumettre au maître d'œuvre une procédure de forage.

5.7 Procédure d'excavation dans le roc

L'employeur contractant doit appliquer la procédure minimale exigée lors d'excavation dans le roc (Annexe 19 et Annexe 20) ou dans une carrière à ciel ouvert.

5.8 Travaux superposés et simultanés par différents employeurs contractants dans la même zone de travail

Ces travaux seront coordonnés par le maître d'œuvre (réunion de coordination) lorsqu'ils impliquent plus d'un employeur contractant. L'employeur contractant qui effectue des travaux superposés doit transmettre une méthode de travail au maître d'œuvre avant le début des travaux. Des mesures spécifiques seront élaborées conjointement avec les employeurs contractants impliqués.

5.9 Mise en route

Pour la mise en route des installations, les encadrements connexes au Code de sécurité des travaux d'Hydro-Québec seront appliqués.

5.10 Plan de levage

Avant de procéder à un levage avec une grue mobile d'une charge de 20 tonnes métriques et plus, et/ou lorsqu'un autre appareil de levage est à proximité, l'employeur contractant doit en informer le maître d'œuvre et ce dernier se réserve le droit d'exiger un plan de levage.

Le plan de levage doit être attesté par un ingénieur (soseau d'ingénieur), comprendre un schéma détaillé et être disponible sur les lieux de travail.

5.11 Levage de travailleur à l'aide d'une grue à tour

Le levage de travailleur par une grue à tour est réservé à une situation d'urgence et non pas pour un travail planifié.



Contrat	Service	Type	Séquence	Révision
	SS			
Classement H-Q:				

ANNEXE 19

**PROCÉDURES DE SÉCURITÉ À SUIVRE POUR L'EXCAVATION DANS LE
ROC OU UNE CARRIÈRE**



Contrat	Service	Type	Séquence	Révision
	SS			
Classement H-Q:				

ANNEXE 19

PROCÉDURES DE SÉCURITÉ À SUIVRE POUR L'EXCAVATION DANS LE ROC OU UNE CARRIÈRE

1. ÉQUIPEMENT DE FORAGE

Tous les équipements de forage sur chenille doivent être munis d'un système d'arrêt d'urgence.

2. PROTECTION PERMANENTE AU SOMMET DES BANQUETTES DES EXCAVATIONS

- a) Un nettoyage mécanique sera effectué avec une pelle hydraulique munie d'une grille de protection.
- b) Le bord des parois doit être nettoyé à l'air comprimé après avoir été nettoyé mécaniquement et manuellement pour une largeur de 5 m.
- c) Le contremaître s'assure que le nettoyage de la banquette et/ou du front de taille est fait afin de déceler les fonds de trous.
- d) Un garde-corps, à 3 m du bord de la paroi, sera constitué de poteaux d'acier, soit des tiges d'acier plein d'un minimum de 25 mm de diamètre ou des HSS 48 de 3,2 mm d'épaisseur sur 2,5 m de hauteur, dont 1 m entre dans un trou foré dans le roc; chacun de ces poteaux installé à 3 m l'un de l'autre est relié à deux câbles d'acier tendus d'un minimum de 10 mm de diamètre.
- e) La base du garde-corps sera constituée d'une plinthe d'un minimum de 240 mm de hauteur par 4,8 mm d'épaisseur ou l'équivalent (prolongement du treillis jusqu'à la lisse intermédiaire) afin de prévenir la chute de matériaux.
- f) Les clôtures doivent demeurer en place après la période d'exploitation de la carrière par l'employeur contractant.

3. PROTECTION TEMPORAIRE AU SOMMET DES BANQUETTES

Une clôture située à 1 m du bord de la banquette, qui devra suivre le relief du terrain, sera constituée de poteaux de fer d'un minimum de 35 mm de diamètre sur 2,5 m de long, dont 0,5 m entre dans un trou foré dans le roc solide; chacun de ces poteaux installé à 3 m l'un de l'autre et relié à un câble de nylon tendu de 2 cm de diamètre.

4. FORAGE ET DYNAMITAGE

- a) Toute opération de forage doit se faire :
 - au-delà de 5 m de tout trou chargé ou de tout lieu de chargement d'explosifs;
 - au-delà de 1,5 m d'un trou raté;
 - au-delà de 150 mm d'un fond de trou ou d'un trou ayant fait canon.



Contat	Service	Type	Sequence	Révision
	SS			
Classement H-Q				

PROCÉDURES DE SÉCURITÉ À SUIVRE POUR L'EXCAVATION DANS LE ROC OU UNE CARRIÈRE

(suite)

- b) Les trous ratés doivent être identifiés.
- c) Lors du sautage, l'équipement doit être à une distance suffisante selon l'importance et l'emplacement du sautage.
- d) Les chemins d'accès à une zone de dynamitage doivent être identifiés comme tels.
- e) Le boutefeu a la responsabilité de faire la reconnaissance du site de dynamitage et de rechercher les trous ratés ainsi que les trous ayant fait canon et les fonds de trous.
- f) Le marquage des boulons et l'arpentage le long d'une paroi de roc ne doivent pas être faits avant que l'écaillage de la paroi ne soit fait.
- g) Avant la remise définitive du site de l'excavation, l'employeur contractant remet au maître d'œuvre une attestation signée spécifiant que le site de l'excavation est sécuritaire et qu'aucun explosif n'a été laissé sur place (voir Attestation de réception des fonds de fouilles – annexe 20).
- h) Le maître d'œuvre établit au préalable les heures de sautage et l'employeur contractant doit fournir avant chaque sautage un avis de sautage qui est signé et distribué à tout le personnel concerné ainsi qu'au service de Santé et sécurité au travail de la SEBJ.

5. TRAVAUX DE FORAGE SOUS TERRE

Étapes de travail

1. À la suite du sautage d'un front de taille, le boutefeu doit faire la reconnaissance du site de dynamitage.
2. Marinage.
3. Procéder à l'écaillage mécanique.
4. Procéder à l'écaillage manuel.
5. Sécuriser la voûte contre la chute de pierres jusqu'au front de taille avant tout travail subséquent.
6. Le chef d'équipe identifie chacun des fonds de trous avec de la peinture rouge.

ANNEXE G

Références bibliographiques

AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. *Subsurface investigation for desing and construction of foundations of buildings*, New York, ASCE, 1976, 61 p.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION, et COMITE EUROPEEN DE NORMALISATION. *Eurocode 7 : calcul géotechnique. Partie 1, règles générales*, La Plaine Saint-Denis, France, AFNOR, 2005, 146 p. (NF EN 1997-1:2005).

ASSOCIATION FRANÇAISE DE NORMALISATION, et COMITE EUROPEEN DE NORMALISATION. *Eurocode 7 : calcul géotechnique. Partie 2, reconnaissance des terrains et essais*, La Plaine Saint-Denis, France, AFNOR, 2007, 175 p. (NF EN 1997-2:2007).

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. *Code of practice for ground investigations*, 4e édition, Londres, BSI, 2015, vi, 318 p. (BS 5930:2015).

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE, et ORGANISATION INTERNATIONALE DE NORMALISATION. *Gestion des risques : techniques d'évaluation des risques*, Genève, CEI, 2009, 188 p. (CEI/ISO 31010:2009).

ÉTATS-UNIS. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. *Geotechnical engineering circular no. 4 : ground anchors and anchored systems*, Washington, D.C., FHWA, 1999, 304 p. (FHWA-IF-99-105). [<https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/if99015.pdf>]

ÉTATS-UNIS. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. NATIONAL HIGHWAY INSTITUTE. *Subsurface investigations : geotechnical site characterization : reference manual*, Washington, D.C., NHI, 2002, 332 p. (NHI course no 132031). [<https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/012546.pdf>].

HYDRO-QUÉBEC. *Cartes et plans*, [En ligne], 2017. [<http://www.hydroquebec.com/romaine/projet/cartes.html>] (Consulté le 12 juillet 2017).

NICHOLS, H.L., et D.A. DAY. *Moving the earth : the workbook of excavation*, 6th édition, New York, McGraw-Hill Publishing Company, 2010, 1232 p.

ORDRE DES INGÉNIEURS DU QUÉBEC. *Ce que les ingénieurs font*, [En ligne], 2011. [<https://www.oiq.qc.ca/fr/jeSuis/public/quEstCeQuUnIngenieur/faireAppellIngenieur/Pages/ceQueLesIngenieursFont.aspx>] (Consulté le 25 juillet 2017).

SOCIÉTÉ CANADIENNE DE GÉOTECHNIQUE. *Manuel canadien d'ingénierie des fondations*, 4e édition, Richmond, C.-B., SCG, 2013, xiv, 476 p.