

PHÉNOMÈNE D'EFFONDREMENTS DE TERRAINS

ÉTUDE D'AVANT-PROJET PROPOSITION ET ANALYSE DE SOLUTIONS POUR LA RÉOUVERTURE DU CHEMIN DES PINS

DÉCEMBRE 2022

DIRECTION DU GÉNIE
DIVISION CONCEPTION ET RÉALISATION
VILLE DE TROIS-RIVIÈRES
REF. V3R 6000-20-019

Préparé par :
(sections 4.2 et 4.3 seulement)



2023-02-23

Justine Sirois, ing., M. Sc. A. – FNX INNOV

Vérifié par :
(sections 4.2 et 4.3 seulement)



2023-02-23

Isabelle Maltais, ing. – FNX INNOV

Préparé par :



Guy Francis Kiniffo, CPI - EMS
Infrastructure inc.

Vérifié par :



2023-02-23

Dany Genois, ing.- EMS
Infrastructure inc.

Tableau des révisions				
Révision	Description	Date	Préparé par	Vérifié par
0	Émis pour 60%	2022-10-24	Guy Francis Kiniffo, CPI.	Dany Genois, ing.
1	Émis pour 60% rév. 1	2022-12-02	Guy Francis Kiniffo, CPI.	Dany Genois, ing.
1	Émis pour 60% rév. 1	2022-12-07	Justine Sirois, ing.	Isabelle Maltais, ing.
2	Émis pour rapport final	2022-12-14	Guy Francis Kiniffo, CPI.	Dany Genois, ing.
3	Émis pour rapport final	2023-02-23	Guy Francis Kiniffo, CPI.	Dany Genois, ing.

TABLE DES MATIÈRES

1.	MISE EN CONTEXTE ET OBJET DU MANDAT	1
2.	AVIS TECHNIQUES DU MTQ	2
2.1.	RECOMMANDATIONS DU MTQ	2
2.1.1.	OPTION DU DÉPLACEMENT DU TRACÉ ACTUEL	2
2.1.2.	OPTION D'ABAISSEMENT DU PROFIL DU TRACÉ ACTUEL	3
2.1.3.	OPTION DE LA FERMETURE DU CHEMIN DES PINS	3
3.	COLLECTE ET ANALYSE DES DONNÉES	4
4.	ÉROSION DU RAVIN	4
4.1.	PROGRESSION DE L'ÉROSION DU RAVIN EN AVAL DU PONCEAU	4
4.2.	STABILISATION DU RAVIN PAR UN ENROCHEMENT PAR PALIER	5
4.3.	ESTIMATION PRÉLIMINAIRE DU COÛT DE LA STABILISATION DU RAVIN	10
5.	SOLUTIONS POUR LA RÉOUVERTURE DU CHEMIN DES PINS	10
5.1.	SOLUTION 1 : CONSTRUCTION D'UN PONT SUR PIEUX	10
5.1.1.	GÉOMÉTRIE ET GABARIT DU PONT	11
5.1.2.	ESTIMATION FINANCIÈRE PRÉLIMINAIRE DU PONT SUR PIEUX	11
5.1.3.	ENJEUX POUR LA CIRCULATION	12
5.1.4.	CONTRAINTE D'UN PROJET DE CONSTRUCTION DE PONT	12
5.1.5.	SITUATION À L'ULTIME DU PONT FACE AUX PHÉNOMÈNES DE SUFFOSION	13
5.2.	SOLUTION 2 : RÉFECTION DE LA ROUTE AVEC UN MUR DE TYPE <i>CUT-OFF</i> (OU <i>DEEP SOIL-MIXING</i> . . .)	13
5.2.1.	PRINCIPE DU MUR <i>CUT-OFF</i>	13
5.2.2.	GESTION DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS AVEC LE MUR <i>CUT-OFF</i>	14
5.2.3.	ESTIMATION FINANCIÈRE PRÉLIMINAIRE DU MUR <i>CUT-OFF</i>	14
5.3.	SOLUTION 3 : RÉFECTION DE LA ROUTE AVEC DES MATELAS DE GABIONS	15
5.3.1.	PRINCIPE DU MATELAS DE GABIONS	15
5.3.2.	ESTIMATION FINANCIÈRE PRÉLIMINAIRE DES MATELAS DE GABIONS	15
6.	AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES SOLUTIONS PROPOSÉES	16
7.	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS	17
	BIBLIOGRAPHIE	18

1. MISE EN CONTEXTE ET OBJET DU MANDAT

En 2018, l’effondrement localisé de la chaussée à la hauteur du chemin des Pins et du ruisseau Bellemare a occasionné le bris du ponceau situé sous celle-ci. Après que la Ville de Trois-Rivières (V3R) ait procédé à son remplacement (incluant la réfection de la chaussée et du remblai de la route), il est apparu en 2019, un certain nombre d’affaissements de sols sur le chemin des Pins. Sur la base de trois (3) avis techniques réalisés entre 2019 et 2020, la Direction de la géotechnique et de la géologie (DGG) du ministère du Transport du Québec (MTQ) a statué sur un phénomène « de suffosion naturelle » comme étant la source de ces effondrements et affaissements. Sur la base du constat de la progression de ces affaissements et de leur niveau de dangerosité, le MTQ a émis comme recommandation à la V3R, la fermeture temporaire du chemin des Pins.

Les études de la DGG (intitulées « Avis techniques ») sont présentées à la section 2 et à l’annexe 10 du présent rapport.

En résumé, la problématique actuelle de suffosion naturelle s’explique par le fait que la stratigraphie du secteur est constituée d’une couche de sable lâche de granulométrie serrée très perméable sur une épaisseur de ± quinze (15) mètres. Au fond se trouve une couche d’argile de la mer de Champlain peu perméable reposant elle-même sous une couche de sable stable. Ainsi, l’eau circule à l’interface de la couche de sable lâche perméable et de la couche sous-jacente moins perméable en entraînant les particules de sols avec elle (phénomène d’érosion interne), créant des vides d’où la provenance de ravins de suffosion. L’image suivante présente un croquis approximatif de l’escarpement du ravin qui s’est formé dans l’axe du puits du terrain voisin situé au 1863, chemin des Pins à la suite des phénomènes de suffosion (image non à l’échelle).

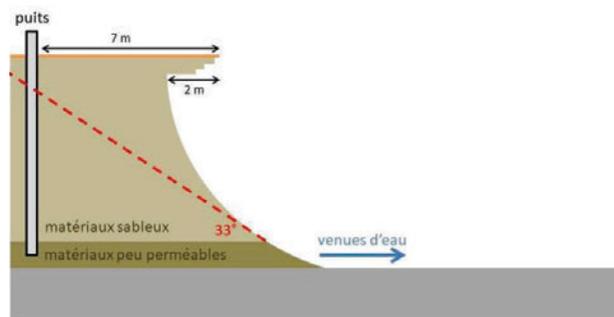


Image provenant du rapport de la Direction de la géotechnique et de la géologie du Ministère du Transport du Québec (MTQ), 14 février 2020.

C’est dans ce contexte que la V3R a mandaté EMS afin de réaliser une étude d’avant-projet dont l’objectif est de proposer et analyser quelques scénarios de solution pouvant permettre la réouverture du chemin des Pins aux véhicules et aux piétons. Ces solutions se veulent complémentaires de celles indiquées par le MTQ dans ses avis techniques, à savoir : le déplacement du tracé actuel, l’abaissement de la route afin d’atteindre la couche géologique imperméable et la fermeture de la route à la circulation par l’aménagement de deux boucles de virage.

La présente étude propose une description des solutions retenues, ainsi qu'une estimation financière (classe D) des coûts préliminaires des travaux de chacune d'elle. Le rapport présente également les avantages et inconvénients de chacune de ces solutions, ainsi que des plans préliminaires en annexe.

L'analyse des données disponibles (fournies conjointement par la V3R et le MTQ) a servi de base pour l'élaboration des solutions au niveau civil et géotechnique. Si l'une ou l'autre de ces solutions devait être retenue, des études complémentaires devront être menées, notamment en hydraulique, en hydrogéologie et en géotechnique afin de disposer de données adéquates et suffisantes pour réaliser les étapes d'ingénierie détaillées, de plans et devis.

2. AVIS TECHNIQUES DU MTQ

Les avis techniques émis par MTQ l'ont été respectivement en juin 2019, en février 2020 et en mars 2020. Les investigations menées ont permis d'identifier les secteurs touchés par les effondrements ainsi que ceux présentant des cavités, du fait de la présence de ravins de suffosion (voir annexe 10).

2.1. RECOMMANDATIONS DU MTQ

Le MTQ a constaté que les affaissements de sol poursuivent leur progression et que le phénomène d'érosion des talus est accéléré en période de crue printanière. En considérant un probable déchaussement des remblais dans les secteurs proches des effondrements à court terme, la première recommandation a été d'élargir le périmètre de sécurité autour des cavités formées. Ceci a pour effet de voir la portion de route (au droit du ponceau) être considérées comme zones à risque d'effondrement. Afin de garantir la sécurité des lieux, le chemin des Pins a été fermé localement à la circulation.

2.1.1. OPTION DU DÉPLACEMENT DU TRACÉ ACTUEL

Cette option proposée par le MTQ consiste à « déplacer la route à l'extérieur de la zone susceptible d'être affectée par les effondrements et la formation de nouveaux ravins » (sans donner la garantie de ne plus être affecté par les phénomènes de suffosion). La Figure 1 montre (pour cette proposition¹) le tronçon de route d'environ 600 mètres minimum au nord du chemin des Pins. Lorsqu'on analyse la topométrie du déplacement potentiel de la route, nous pouvons voir rapidement la grande complexité de mettre en place celle-ci considérant les grandes dénivelées et pente longitudinale de la route projetée. Le profil longitudinal présenté indique également la nécessité de procéder à la mise en place d'enrochements et de ponceaux aux endroits des branches des cours d'eau traversées, ceci afin d'éviter un risque d'affouillement de la partie avale immédiate de leur lit. Cette option, qui ne conserve pas le tracé actuel de la route, n'a pas été financièrement estimée par la Ville de Trois-Rivières, mais une analyse succincte laisse entrevoir qu'elle pourrait être la plus onéreuse des trois options suggérées par le MTQ.

¹ Le tracé demeure dans le district de Saint-Louis-de-France de la Ville de Trois-Rivières

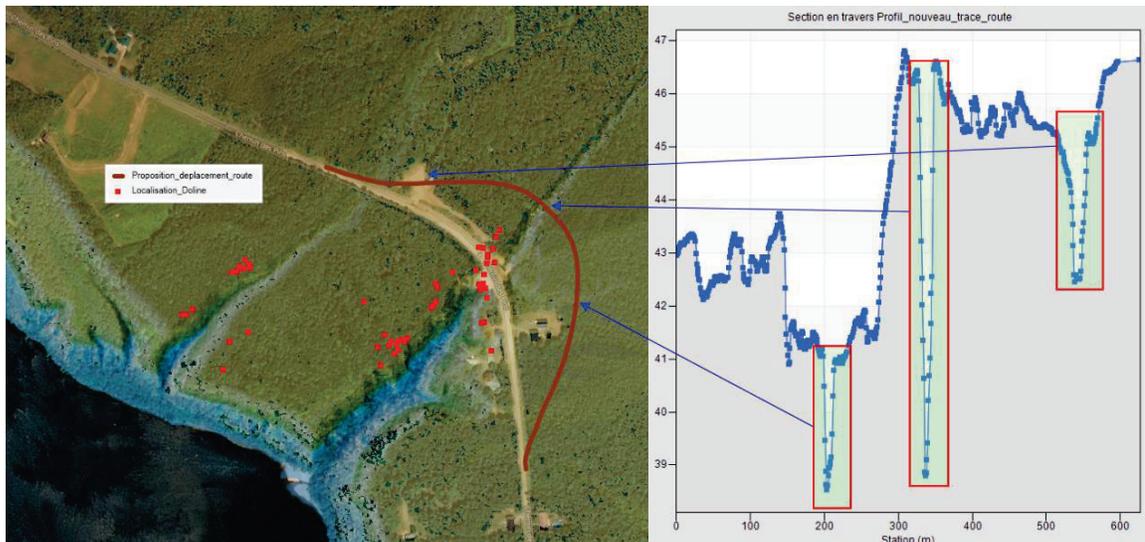


FIGURE 1: PROPOSITION D'UN NOUVEAU TRACÉ DE LA ROUTE PAR LE MTQ

2.1.2. OPTION D'ABAISSEMENT DU PROFIL DU TRACÉ ACTUEL

La seconde option est un abaissement de quinze (15) mètres du profil actuel de la route afin de rejoindre la stratigraphie argileuse imperméable présente sous le sable deltaïque lâche, lui-même en dessous de la voie routière. Selon le MTQ, la problématique actuelle est que le sable naturel sous la route descend jusqu'à la matrice d'argile. Ainsi, lors d'écoulement d'eau dans cette couche stratigraphique, le sable glisse sur l'argile et forme par la suite des ravins de suffosion. Cette option, qui a l'avantage de garder le tracé actuel, s'accompagne d'une recommandation du MTQ, à savoir qu'elle ne permet pas de rencontrer la garantie d'éviter d'autres effondrements, car les observations ont montré des cicatrices d'affaissements en bien des endroits proches du tracé actuel.

Mettre en place un tel profil est d'une grande complexité technique puisqu'il sera énormément difficile de respecter les distances de visibilité routière. Ainsi, fort possiblement que la distance du tronçon projeté sera grandement augmentée afin de rencontrer ces normes de visibilité et respecter les pentes de dénivelée maximale.

Pour cette option, l'estimation financière préliminaire (classe D) demandée par la Ville de Trois-Rivières et réalisée par Stantec en 2021² se chiffre approximativement autour de 11 200 000 \$ avant les taxes pour le coût des travaux.

2.1.3. OPTION DE LA FERMETURE DU CHEMIN DES PINS

Cette recommandation du MTQ est une alternative qui va dans le sens de la sécurité des automobilistes à long terme. Elle consiste à ériger des boucles de virage (ronds-points) de part et d'autre du ruisseau Bellemare, à une distance suffisante (idéalement de 110 mètres du sommet des ravins), de sorte que la

² Réf. Ville de Trois-Rivières: 6000-20-019 (1729-19-161) – PO020246

route praticable demeure à distance suffisante des secteurs où les effondrements ont été observés. Pour cette option, l'estimation financière des coûts de travaux, demandée par la Ville de Trois-Rivières à Stantec en 2021, se chiffre à 200 871 \$ avant les taxes.

3. COLLECTE ET ANALYSE DES DONNÉES

Les données terrain utilisées sont celles, fournies par la V3R, provenant du MTQ qui a autorisé la transmission de ces données à EMS Infrastructure inc. Ces données comprennent notamment un levé lidar, les profils de sondages de quatre (4) forages ainsi que les profils d'essais au piézocône. La V3R a également mis à notre disposition les plans pour construction du remplacement du ponton effectué en 2018³ ainsi que l'estimation préliminaire des coûts des travaux pour l'option d'abaissement de la route actuelle, tel que suggéré par le MTQ. Finalement, l'estimation des coûts des boucles de virage provenant de Stantec a également été fournie à EMS. À noter que les avis techniques sont disponibles à l'annexe 10 du présent rapport.

L'analyse de ces données ainsi que la visite terrain effectuée conjointement par EMS, FNX et la V3R le 9 juin 2022 ont permis d'identifier approximativement les zones touchées par les effondrements. Les analyses du MTQ portées dans ses avis techniques (évaluations et recommandations) ont affiné l'identification de la problématique de suffosion dans le secteur et nous ont guidés quant au choix des solutions présentées dans ce rapport.

Considérant que le présent rapport est un rapport préliminaire, nous jugeons qu'aucune investigation géotechnique et d'arpentage complémentaire n'est requise à cette étape pour l'émission des solutions de réouverture du chemin des Pins. Toutefois, si l'une des solutions proposées dans ce rapport devait être retenue, des études multidisciplinaires additionnelles importantes seront requises.

4. ÉROSION DU RAVIN

4.1. PROGRESSION DE L'ÉROSION DU RAVIN EN AVAL DU PONCEAU

Le terrain montre un certain nombre d'effondrements liés aux phénomènes de suffosion identifiés par le MTQ, ainsi que l'étendue de la progression du ravin

. Selon nos analyses, cette progression s'est rendue à l'infrastructure routière du chemin des Pins.

La Figure 2 montre une vue d'ensemble des points d'effondrement ainsi que l'étendue du ravin qui s'est formé au fil du temps (le tracé en rouge montre le bord supérieur du ravin). Ainsi, afin d'éviter la propagation de l'érosion du ravin actuel, il sera nécessaire d'effectuer une stabilisation de celui-ci.

³ Réf. Ville de Trois-Rivières: 6000-17-057

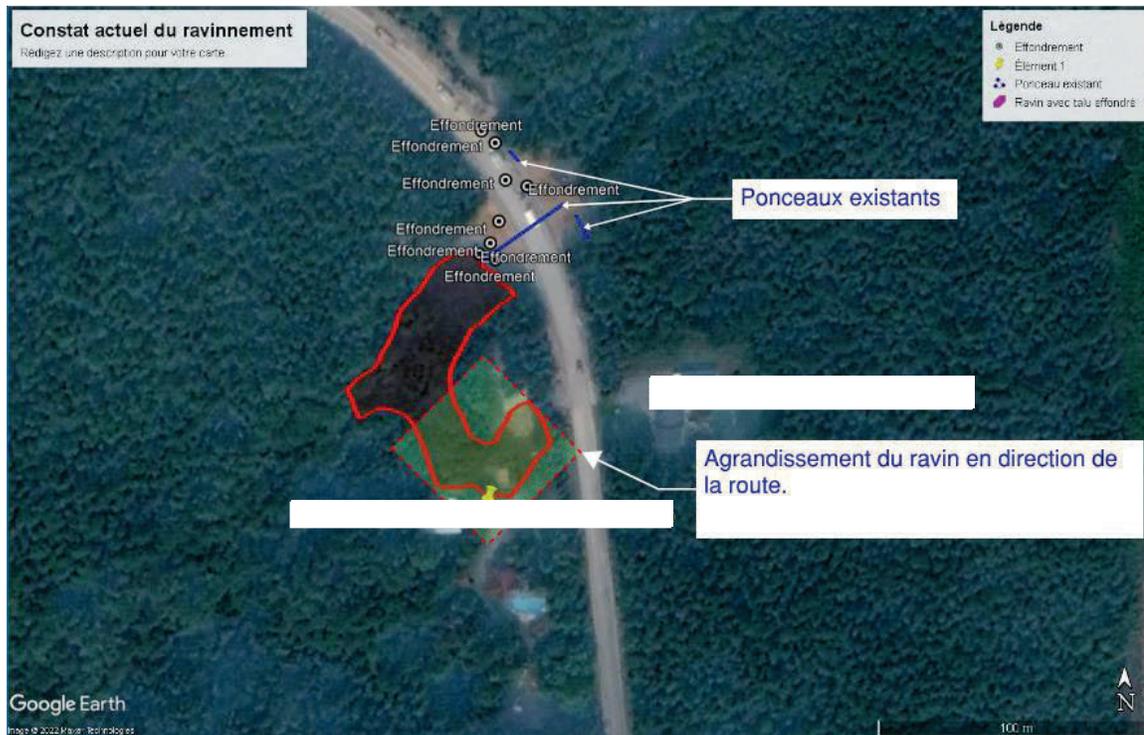


FIGURE 2: VUE DE LA SITUATION ACTUELLE (FÉVRIER 2020)

4.2. STABILISATION DU RAVIN PAR UN ENROCHEMENT PAR PALIER

La stabilisation du talus du ravin, afin de limiter l’affouillement des terres et réduire la progression du ravin en direction sud-est, est une nécessité, et ce, quelle que soit la solution retenue pour la réouverture de la route. La Figure 3 montre que les pentes des talus du ravin progressent de façon continue du côté sud-est. Ces pentes varient globalement entre 5° et 75°.

Pour corriger la situation, il est nécessaire d’étudier le sens et la circulation de l’eau dans les sols avec des études hydrauliques et hydrogéologiques. Par la suite, des études géotechniques et de stabilité complètes seront requises afin de valider les sols en place et proposer une solution adaptée au site. Finalement, les étapes de conception/ingénierie détaillée et de préparation de plans et devis viendront compléter le processus.

Dans le cadre de ce mandat, des analyses préliminaires, avec le peu d’informations disponibles sur les sols lors de la rédaction de ce rapport, ont été réalisées pour confirmer l’instabilité des talus. La Figure 5 et la Figure 6 illustrent les résultats obtenus dans les analyses préliminaires de stabilité pour l’état actuel (Figure 4) du talus. La Figure 8 et la Figure 9 illustrent les résultats obtenus dans les analyses préliminaires de stabilité pour l’enrochement proposé (Figure 7).

Un enrochement partant de la crête du talus et allant jusqu’au ruisseau Bellemare est à considérer comme solution. La coupe-type préparée par le ministère des Transports du Québec, telle qu’illustrée sur la Figure 10, serait un bon outil de départ pour la conception.

La coupe-type de l'empierrement se trouve aussi en annexe 1 tandis que l'annexe 2 présente l'estimation financière classe D pour la stabilisation du talus.

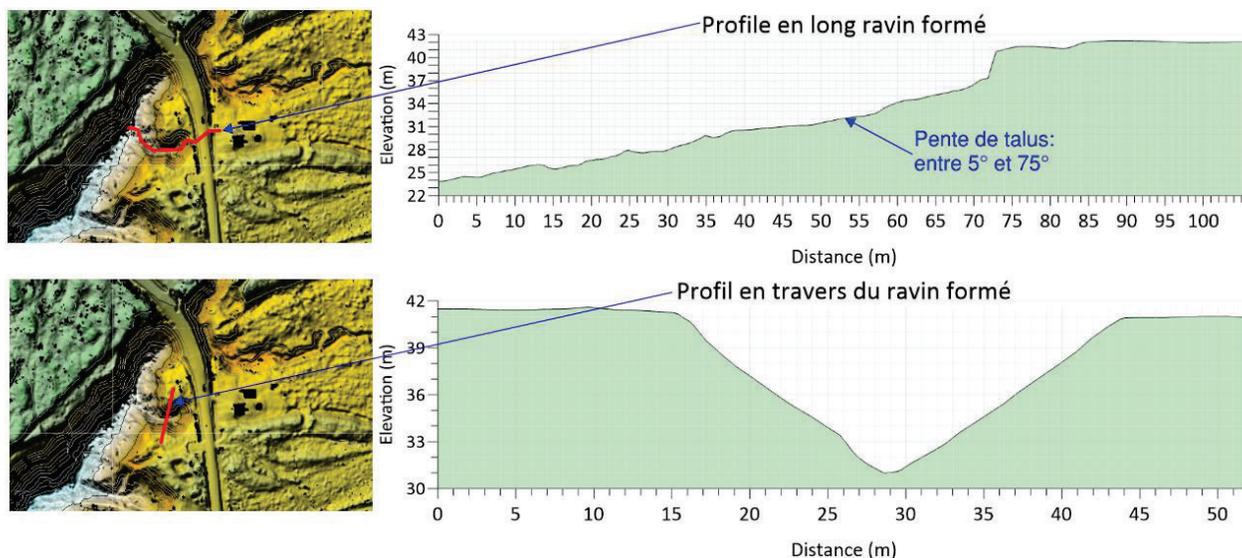


FIGURE 3: PROFIL EN LONG ET EN TRAVERS DE LA PARTIE DU RAVIN FORMÉ PAR PROGRESSION

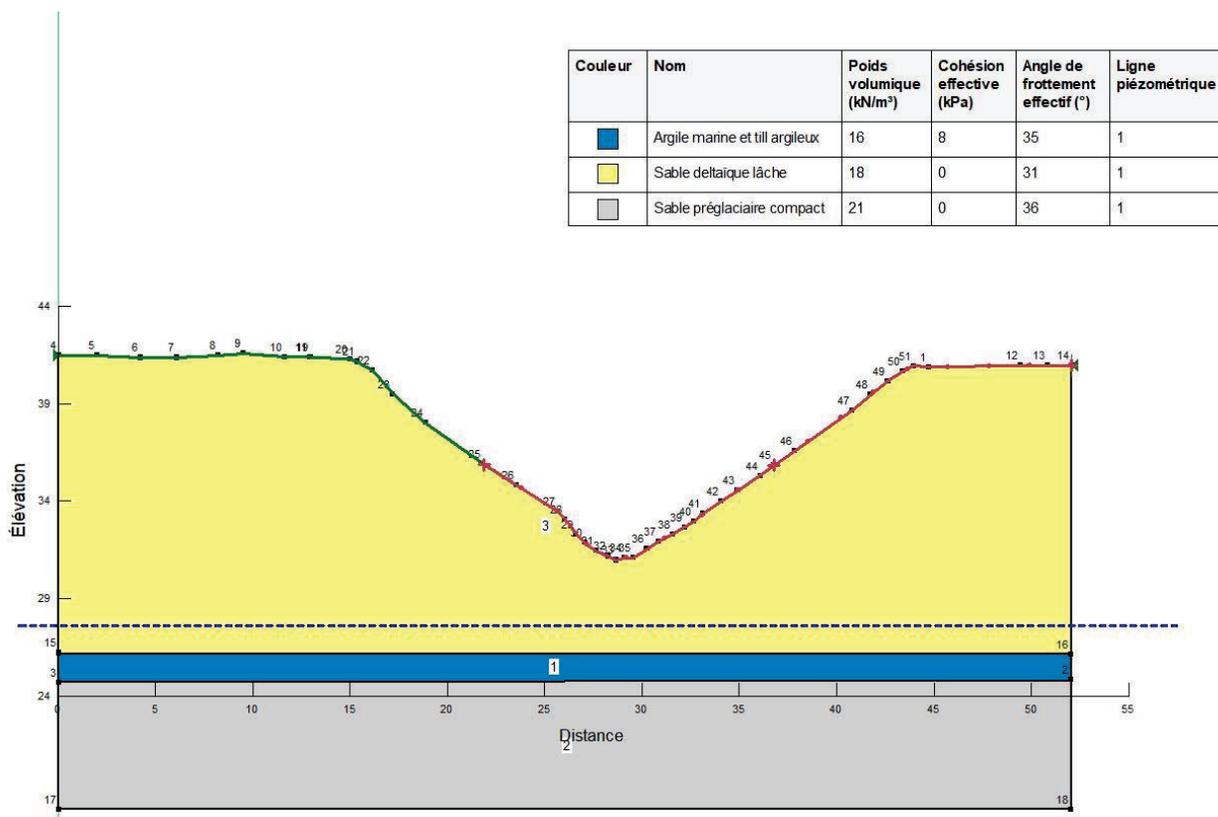


FIGURE 4 : ÉTAT INITIAL DES TALUS

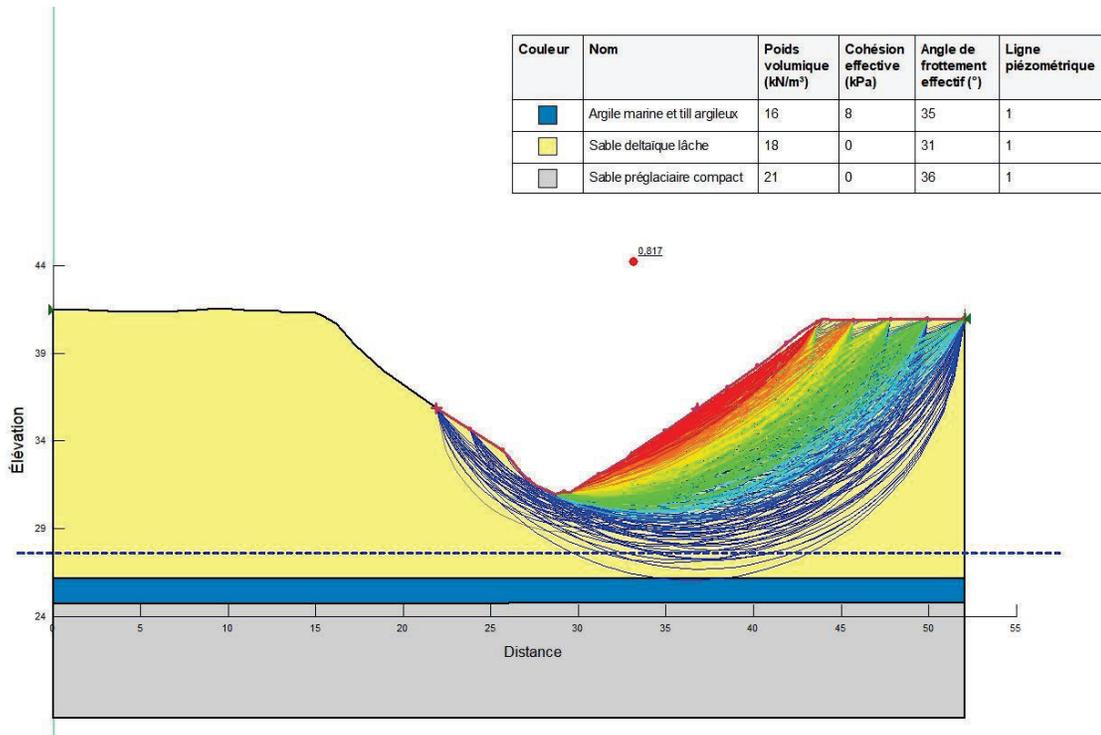


FIGURE 5 : STABILITÉ DU TALUS DROIT SELON LE PROFIL EN TRAVERS DU RAVIN

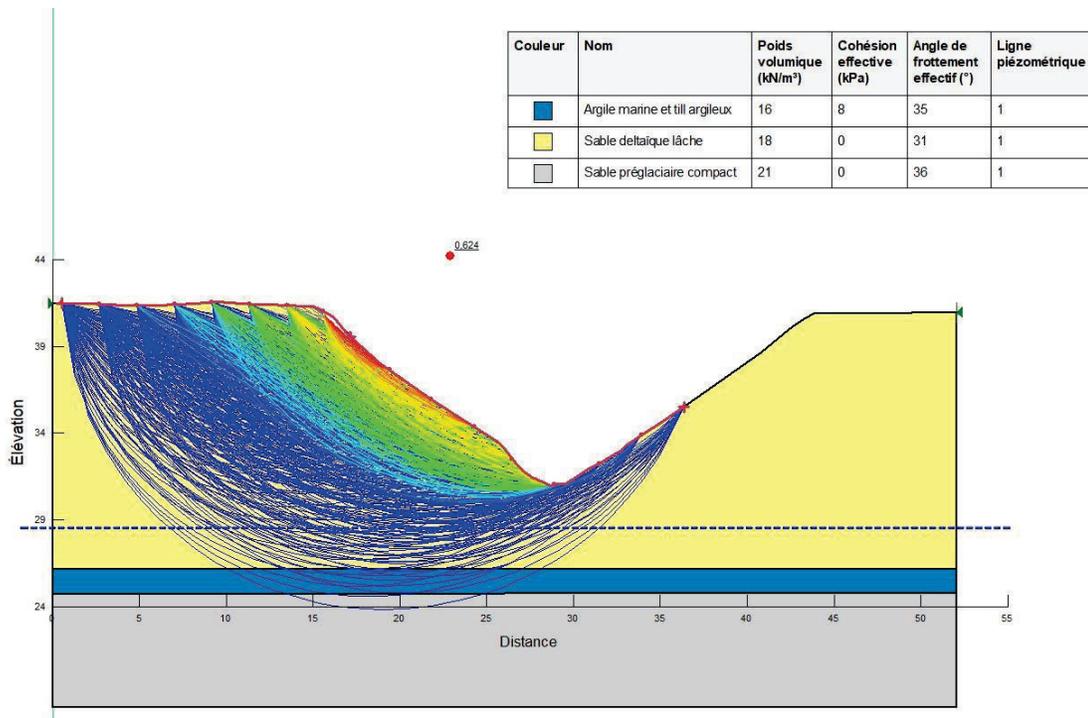


FIGURE 6 : STABILITÉ DU TALUS GAUCHE SELON LE PROFIL EN TRAVERS DU RAVIN

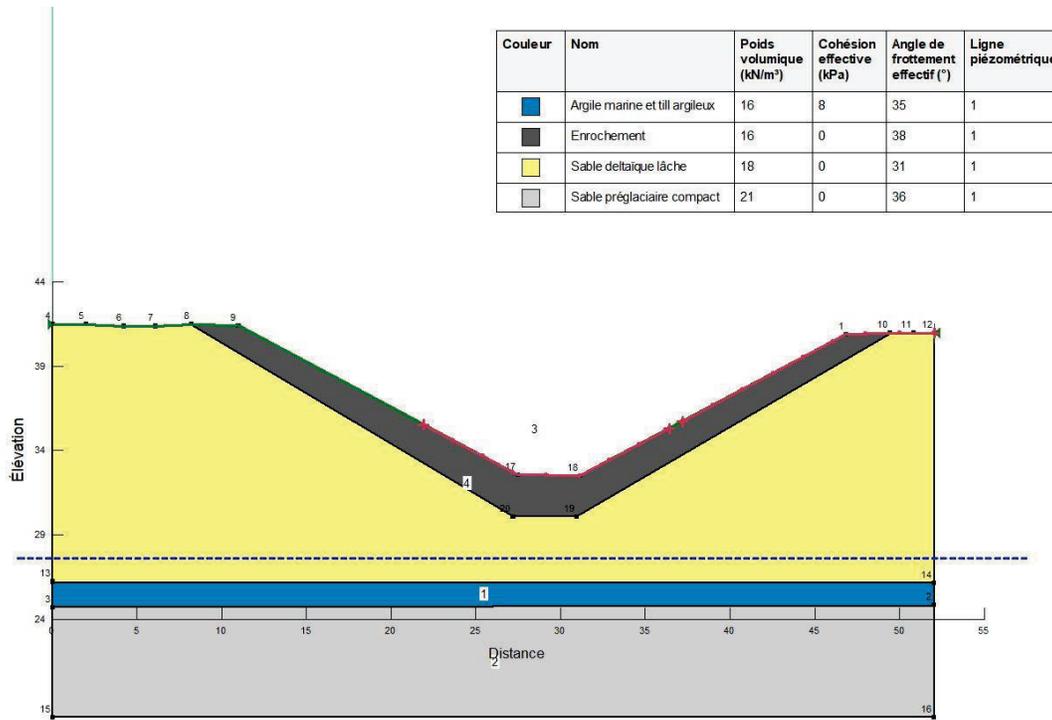


FIGURE 7 : ÉTAT DES TALUS APRÈS ENROCHEMENT

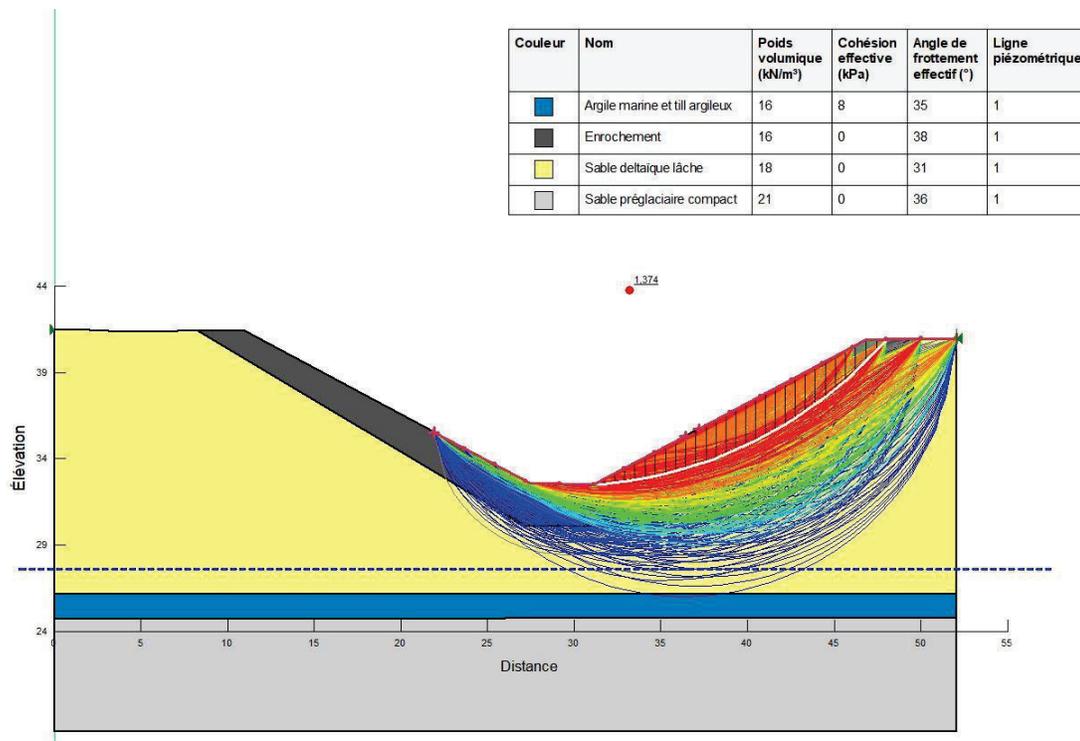


FIGURE 8 : STABILITÉ DU TALUS DROIT AVEC ENROCHEMENT SELON LE PROFIL EN TRAVERS DU RAVIN

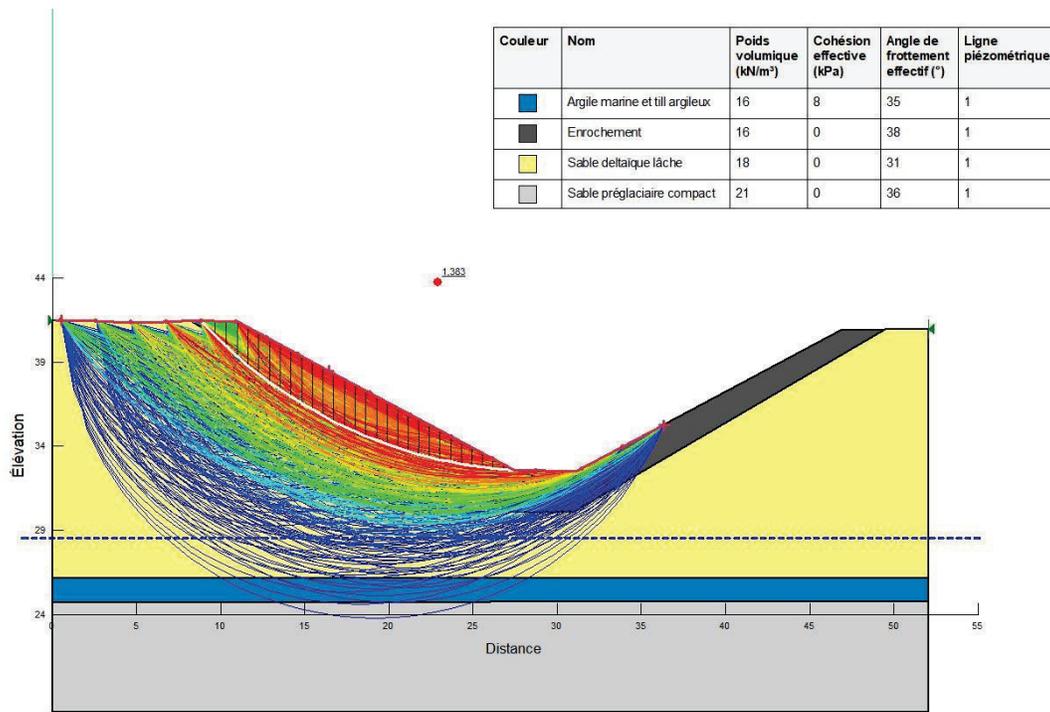


FIGURE 9 : STABILITÉ DU TALUS GAUCHE AVEC ENROCHEMENT SELON LE PROFIL EN TRAVERS DU RAVIN

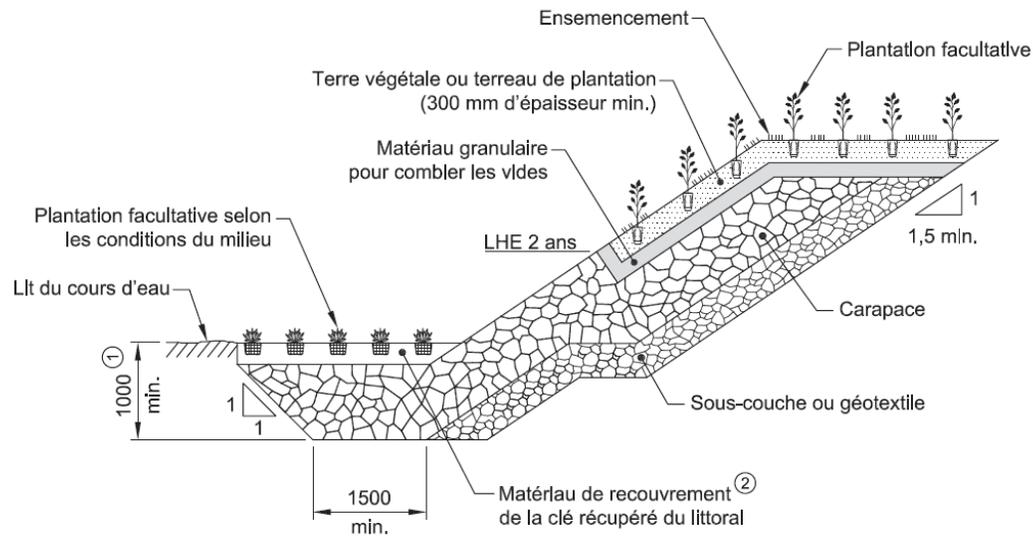


FIGURE 10 : PROPOSITION POUR L'ENROCHEMENT
(EXTRAIT DU DESSIN NORMALISÉ – PROTECTION DES BERGES AVEC EMPIERREMENT VÉGÉTALISÉ, TOME IV – CHAPITRE 6, NUMÉRO 003)

4.3. ESTIMATION PRÉLIMINAIRE DU COÛT DE LA STABILISATION DU RAVIN

L'estimation préliminaire des coûts pour la stabilisation du ravin est présentée à l'annexe 2. Elle inclut, sans s'y limiter, les coûts suivants :

- Les analyses de stabilité complètes ;
- La préparation des plans et devis pour la stabilisation du talus ;
- La réalisation des travaux, incluant la surveillance et les matériaux ;
- Les demandes de certificat d'autorisation auprès du ministère de l'Environnement.

Il est important de noter que l'estimation ne comprend pas les études hydraulique, hydrogéologique et géotechnique, le relevé d'arpentage complet du talus qui sera nécessaire, tous les éléments à caractère environnemental lors de la réalisation (gestion des déblais, sols contaminés, etc.) et tous les frais fixes de l'entrepreneur.

Le total des coûts préliminaires pour cette stabilisation s'élève approximativement à 2 803 800\$ avant les taxes.

Cette estimation est faite à partir d'une conception préliminaire et sur la base de certains des critères indiqués dans les avis techniques de la DGG. Si la stabilisation allait de l'avant, diverses validations devraient être menées afin de préciser tous les critères requis pour sa mise en place. Ces critères pourraient modifier la conception de la solution et le coût des travaux suite aux analyses pourrait être plus élevé.

5. SOLUTIONS POUR LA RÉOUVERTURE DU CHEMIN DES PINS

Dans les rapports de la DGG, une distance d'au moins 110 mètres linéaires du sommet du ravin doit être minimalement considérée afin d'assurer une sécurité pour tenir compte des plus grandes distances où les effondrements ont été observés (voir Figure 1). Ainsi, la longueur de la structure routière à refaire dans le secteur du ponceau devrait minimalement être de 370 mètres linéaires. Le chemin des Pins est une route à caractère rurale à deux voies, sa vitesse est limitée à 70 km/h pour une largeur moyenne en tout de dix (10) mètres (chaussée et accotement). On note dans le secteur du ruisseau Bellemare / chemin des Pins la présence de fossés de part et d'autre de la route ainsi que des ponceaux aménagés aux entrées des lots le long de la route. À noter que la vitesse limite à considérer pour la conception dépendra de la solution retenue.

5.1. SOLUTION 1 : CONSTRUCTION D'UN PONT SUR PIEUX

La première solution étudiée est la construction d'un pont sur pieux. En effet, l'analyse des sondages et des essais aux piézocônes montrent que la stratigraphie en place est composée principalement d'une couche d'environ quinze (15) mètres d'épaisseur en moyenne de sable lâche à très lâche, d'humide à saturé et de faible capacité portante. Une couche de silt et sable d'une bonne résistance à la pénétration au piézocône est présente sous la couche de sable lâche (résistance de pointe q_t). De ce fait, un pont avec

des fondations profondes sur pieux pourrait être une solution adéquate en fonction de la stratigraphie géologique de cette nature.

5.1.1. GÉOMÉTRIE ET GABARIT DU PONT

Le pont proposé est un pont entièrement en béton armé, d'une longueur de 370 mètres, composé de sept (7) piles et d'une culée à chacune des extrémités. Ce même pont pourrait aussi être composé d'un amalgame de béton armé / structure d'acier. En raison de la stratigraphie en place, une fondation profonde sur pieux battus est retenue. Les piles sont ainsi formées de douze (12) pieux de 300 millimètres de diamètre (répartie en trois (3) rangées) pour une longueur unitaire de 23 mètres linéaires. Les culées disposent quant à elles de trois (3) pieux chacun de 20 mètres linéaires de profondeur et d'un diamètre de 1,2 mètre.

À noter qu'à ce stade du projet, les pieux (tout comme le pont en lui-même) ont été dimensionnés avec des critères conservateurs⁴ puisque des études géotechniques approfondies en lien avec la capacité portante des sols devront être réalisées. Cette conception préliminaire a été nécessaire afin d'obtenir un dimensionnement permettant d'émettre une estimation préliminaire. Chaque travée aura une longueur entre les piles de 47,5 mètres et composée de quatre (4) poutres incurvées en béton armé (ASSHTO type VI) d'une hauteur de 1,8 mètre. La dalle du tablier est entièrement continue et incurvée pour suivre le profil du tracé qui aura une largeur totale de 11,7 mètres et d'une épaisseur de 0,3 mètre. Le tablier sera composé de deux voies de circulation de 3,4 mètres chacune et de deux accotements de 2 mètres de large. Les chasse-roues du nouveau pont auront quant à elle une largeur de 450 millimètres pour atteindre une largeur totale de 11,7 mètres.

Les charges utilisées pour l'analyse sont les charges mortes (le poids propre de la structure, soit les poutres et la dalle), les charges mortes additionnelles (le poids propre des chasse-roues, des glissières de sécurité, du pavage, etc.) et la charge vive provenant du camion type CL-625. Le calcul des charges est basé sur des hypothèses simplificatrices afin d'utiliser la méthode d'analyse simplifiée de la section 5.6 de la norme CSA S6-14. Les charges provenant des déformations thermiques, du verglas, du vent et des glaces ont été négligées. Toutefois, si cette solution est retenue, tous les cas de chargement devront être pris en considération. Une étude détaillée devra être faite conformément à la norme CSA S6-14.

La vitesse de conception retenue pour le pont est une approche jugée sécuritaire à 40 km/h du fait de sa longueur élevée, de sa forme incurvée avec un virage significatif et de la présence d'accotements pouvant être utilisés par des piétons.

Le profil longitudinal et les vues 3D préliminaires du pont sont présentés à l'annexe 3 du présent rapport.

5.1.2. ESTIMATION FINANCIÈRE PRÉLIMINAIRE DU PONT SUR PIEUX

L'estimation préliminaire des coûts pour la solution du pont sur pieux est présentée à l'annexe 4. Elle inclut, sans s'y limiter, les coûts suivants :

⁴ Conformément à la norme CSA S6-14

- Le terrassement pour l'agrandissement du secteur et la démolition d'une partie de la route existante ;
- La construction du pont ainsi que des approches au pont ;
- La reconstruction du ponceau avant la construction du pont. Le profil du cours d'eau n'est pas modifié, mais l'installation des pieux va nécessiter le retrait temporaire du ponceau ;
- Le déplacement temporaire des services publics ;
- La contingence et les imprévus, etc.

Le total des coûts préliminaires pour cette solution s'élève approximativement à 48 193 422 \$ avant les taxes.

Cette estimation est faite à partir d'une conception préliminaire simplifiée issue de la norme CSA S6-14 ainsi que de certains des critères indiqués dans les avis techniques du MTQ. Si cette solution est retenue, la conception du pont devra être revue en considérant l'ensemble des critères requis pour une analyse complète conformément à la norme CSA S6-14. De même, les critères comme la distance de visibilité, l'analyse des glissières de sécurité, l'analyse de la giration avec des camions-remorques et celle des différentes vitesses d'approche devront être simulés. Le critère sismique n'a pas été considéré dans la conception tout comme les charges de glace et de neige. Ainsi, lors de la conception, la revue complète des charges vives et mortes devra être effectuée. Le but de la présente section était simplement d'évaluer de façon sommaire les coûts approximatifs d'un pont sur pieux et non de réaliser la conception complète d'un pont.

Il est important de noter que l'estimation ne comprend pas les études hydraulique, hydrogéologique et géotechnique, le relevé d'arpentage complet du talus qui sera nécessaire, tous les éléments à caractère environnemental lors de la réalisation (gestion des déblais, sols contaminés, etc.) et tous les frais fixes de l'entrepreneur.

5.1.3. ENJEUX POUR LA CIRCULATION

La vitesse d'approche au pont doit être analysée afin de garantir une circulation sécuritaire. Le pont présente un virage serré avec une géométrie restreinte et des accotements pour piétons. L'analyse de visibilité pourra permettre de proposer des critères pour la conception, mais de ce qui précède et vu que le chemin des Pins est une route locale rurale avec une vitesse de 70 km/h, nous avons retenu une vitesse d'approche de conception au pont de 40 km/h. Cette vitesse pourra être revue et corrigée par une analyse complète.

5.1.4. CONTRAINTE D'UN PROJET DE CONSTRUCTION DE PONT

Hormis le volet financier, qui présente un coût de construction élevé, les principales contraintes sont également au niveau environnemental. Les travaux de génie civil vont certainement engendrer un certain nombre d'expropriations du fait du gabarit de l'ouvrage. Cette situation doit être prise en compte par rapport au coût de construction versus la plus-value économique apportée par l'ouvrage. Dans la présente

estimation préliminaire de cette solution, le profil du cours d'eau Bellemare n'a pas été modifié. Toutefois, puisque les travaux toucheront directement le cours d'eau, une demande d'autorisation sera requise auprès du ministère de l'Environnement. Si le profil devait être modifié, l'émission de ladite autorisation se fera sur la base d'une étude hydraulique et hydrogéologique poussée dont le coût de réalisation pourrait être important et n'est actuellement pas pris en compte dans la présente estimation.

5.1.5. SITUATION À L'ULTIME DU PONT FACE AUX PHÉNOMÈNES DE SUFFOSION

Les phénomènes de suffosion sont avant tout des phénomènes d'érosion agressive naturelle contre lesquels il est difficile d'apporter des solutions tangibles à moindres coûts. La construction d'un pont sur pieux permet d'ériger des fondations profondes qui assurent à long terme une stabilité de l'ouvrage. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue qu'il est tout à fait possible que les fondations de l'infrastructure routière (qui reposent sur une couche géologique très peu stable) puissent présenter des poches de cavité qui vont entraîner des effondrements localisés. Ces couches géologiques sont également présentes sous le pont et les conséquences à long terme, comme des glissements de terrain, des déchaussements et des tassements différentiels, peuvent survenir sans être nécessairement prévisibles. En fait, la construction d'un pont ne garantit pas de s'affranchir totalement des conséquences négatives liées aux phénomènes de suffosion. Cependant, considérant que les pieux seront installés dans la couche de sable et silt compacte, la fondation du pont devrait être stable. Néanmoins, comme déjà indiqué, une étude approfondie de la capacité portante des sols devra être effectuée avant de réaliser l'ingénierie afin de s'assurer que les sols en place soient capables de prendre les charges attribuées au pont.

5.2. SOLUTION 2 : RÉFECTION DE LA ROUTE AVEC UN MUR DE TYPE *CUT-OFF* (OU *DEEP SOIL-MIXING*)⁵

La deuxième solution étudiée (mur *cut-off*) est celle de la mise en place d'une technique de renforcement pour les sols extrêmement mous et humides afin de leur permettre d'atteindre une résistance et des caractéristiques souhaitées. Ainsi, la portion de l'infrastructure routière susceptible d'être impactée directement par les phénomènes de suffosion est traitée par cette technique qui permet d'améliorer grandement les caractéristiques intrinsèques des sols en place.

5.2.1. PRINCIPE DU MUR *CUT-OFF*

Le principe du mur *cut-off* est un procédé qui consiste à injecter un mélange de ciments, de liants et de sols prélevé in situ au moyen de tarières⁶ ou d'autres outils spécialement conçus à cet effet. Cette construction géotechnique est utilisée dans une grande variété d'applications, dont la coupure du cheminement hydraulique souterrain. Ainsi, pour ce type d'application, les fondations de l'infrastructure routière touchées par les effondrements peuvent être protégées par un procédé de malaxage des sols avec mise en place d'un coulis cimentaire en vue de le rigidifier, le lier, pour finalement en diminuer fortement la perméabilité. On obtient par ce procédé un béton naturel de faible capacité (entre 2 MPa et 5 MPa de résistance). Typiquement, des colonnes formées jusqu'à une profondeur pouvant aller jusqu'à

⁵ Traduit sous le terme de « mélange de sols en profondeur »

⁶ Foreuse de 110t

25 mètres par une largeur de 2,5 mètres sont installées individuellement en panneaux linéaires qui se chevauchent pour aboutir à un traitement de masse ou complet de la zone à traiter. Pour plus de détails, voir la coupe-type du mur *cut-off* à l'annexe 5.

5.2.2. GESTION DES ÉCOULEMENTS SOUTERRAINS AVEC LE MUR *CUT-OFF*

La distance à mettre en place est basée sur les recommandations du MTQ, à savoir une distance sécuritaire de 110 mètres linéaires des effondrements observés. Cette zone tampon impose de mettre en place un mur *cut-off* d'une longueur de 370 mètres linéaires minimum et d'une largeur de 5 mètres par une profondeur de 15 mètres. Cette profondeur est requise, car elle permet d'atteindre la couche de sable et silt compacte peu perméable. Ainsi, ce volume équivaut à rigidifier tout le sable lâche naturel entre la surface et la couche argileuse, ce qui diminuerait les effets de suffosion. La mise en place d'un rideau drainant de 300 millimètres d'épaisseur, formé de pierres nettes (avec un enrobage de géotextile), devrait être effectuée en amont du mur *cut-off* (verticalement sur 15 mètres) afin d'assurer un rabattement des écoulements souterrains et leurs acheminements vers le ruisseau Bellemare. La résurgence de ces écoulements serait mise en place avec des conduites drainantes d'un diamètre grandissant de 150 à 300 millimètres (à mesure que le débit augmente) et un enrochement dans le ruisseau Bellemare pour éviter l'érosion de la berge à l'exutoire. Toutefois, il faut que cette solution soit intégrée dans une analyse hydrogéologique afin d'évaluer les impacts de l'installation d'un mur étanche. L'analyse de l'hydraulique souterraine sera d'une importance capitale afin de s'assurer que la méthodologie mise en place ne dépasse pas la problématique ailleurs.

5.2.3. ESTIMATION FINANCIÈRE PRÉLIMINAIRE DU MUR *CUT-OFF*

L'estimation préliminaire des coûts pour la solution du mur *cut-off* est présentée à l'annexe 6. Elle inclut, sans s'y limiter, les coûts suivants :

- Le terrassement pour la réfection des accotements de la route ;
- La reconstruction de la route après l'installation du mur *cut-off* ;
- La reconstruction des abords du ponceau ;
- Le déplacement des services publics ;
- La contingence et les imprévus.

Le total des coûts préliminaires pour cette solution s'élève approximativement à 16 576 006\$ avant les taxes.

Cette estimation est faite à partir d'une conception préliminaire et sur la base de certains des critères indiqués dans les avis techniques du DGG. Si cette solution est retenue, diverses validations doivent être menées afin de préciser tous les critères requis pour sa mise en place. Ces critères pourraient modifier la conception de la solution et le coût des travaux suite aux analyses pourrait être plus élevé.

À noter que l'estimation ne comprend pas les études hydraulique, hydrogéologique et géotechnique, ainsi que tous les frais fixes de l'entrepreneur.

5.3. SOLUTION 3 : RÉFECTION DE LA ROUTE AVEC DES MATELAS DE GABIONS

La troisième solution étudiée est celle du remplacement de toute l'assise de la portion de l'infrastructure routière sujette aux phénomènes de suffosion par plusieurs matelas de gabions installés successivement un sur l'autre.

5.3.1. PRINCIPE DU MATELAS DE GABIONS

La solution de matelas de gabions consiste à excaver tout le sable naturel lâche sur sa pleine profondeur et longueur, soit ± 15 mètres de profond et de ± 370 mètres de longueur. En fait, il serait nécessaire d'enlever tout le volume de sable lâche naturel pour atteindre le niveau de l'argile. Par la suite, le volume serait comblé par des matelas de gabions d'une épaisseur de 1,5 à 2 mètres d'épaisseur. La roche utilisée dans le matelas de gabions devra être de type granitique afin qu'elle ait une excellente capacité portance. L'empierrement se ferait avec de l'enrochement 300 – 600 mm \varnothing en profondeur et diminuerait avec de la pierre 100 – 200 mm \varnothing en surface. Les pierres devraient être angulées afin qu'elles puissent s'imbriquer l'une dans l'autre. De plus, une membrane géotextile devrait être mise en place entre chacune des couches de matelas de gabions afin d'éviter que les particules fines viennent combler les vides laissés entre chacune des pierres. Ainsi, l'eau souterraine pourrait transiter à travers les vides de l'enrochement sans encombrement et la direction des écoulements souterrains ne serait pas modifiée. De plus, l'hydraulique souterraine demeurerait inchangée, ce qui limiterait grandement le déplacement de la problématique de suffosion ailleurs. Pour la coupe type de cette méthodologie, voir l'annexe 7 du présent rapport.

Prendre note qu'une étude hydrogéologique devra être effectuée avant l'ingénierie de ce concept pour connaître le débit de l'eau souterraine transitant à l'intérieur des vides de l'enrochement de même que les pertes de charge. Si requis, il sera peut-être nécessaire de mettre en place un réseau complémentaire de drainage dans les matelas de gabions. De plus, la spécification des roches devra également être validée afin que celles-ci aient la capacité portante nécessaire.

5.3.2. ESTIMATION FINANCIÈRE PRÉLIMINAIRE DES MATELAS DE GABIONS

L'estimation préliminaire des coûts pour la solution avec matelas de gabions est présentée à l'annexe 8. Elle inclut, sans s'y limiter, les coûts suivants :

- L'excavation du massif de sable lâche naturel ;
- La fourniture et la mise en place des matelas de gabions et des géotextiles ;
- La reconstruction de la route au-dessus des matelas de gabions ;
- La contingence et les imprévus.

Le total des coûts préliminaires pour cette solution s'élève approximativement à 11 337 454 \$ avant les taxes.

Cette estimation est faite à partir d'une conception préliminaire et sur la base de certains des critères indiqués dans les avis techniques du DGG. Si cette solution est retenue, diverses validations doivent être menées au niveau hydrogéologique afin de valider le débit de l'eau souterraine. D'un point de vue géotechnique, la roche mise en place devra avoir la capacité requise pour résister aux charges vives et mortes de la route. De plus, le type de géotextile à mettre en place devra être validé.

Il est également important de préciser que cette méthodologie n'a à toute fin pratique jamais été mise en place sur un autre projet connu. Ainsi, il risque d'être difficile d'imposer une telle méthodologie à une firme sans prendre la responsabilité d'une telle méthode. En somme, si cette méthodologie est privilégiée, plusieurs études hydrogéologique et géotechnique seront nécessaires afin que la firme de génie-conseil ne prenne pas l'entièreté du risque d'une telle méthode.

6. AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES SOLUTIONS PROPOSÉES

Les solutions proposées visent à éviter la formation de dolines au sein de l'infrastructure de la chaussée, de sorte que celle-ci soit sécuritairement praticable sur le long terme, aussi bien pour les automobilistes, les piétons que les riverains. Si le phénomène de formation des dolines est assez bien connu, la mise en place de solutions viables pour empêcher leur formation est onéreuse, et cela sans garantir (à coup sûr), certains effets néfastes comme la formation de cavités, de tassement de sols et/ou de glissements de terrain. Le pont sur fondation profonde⁷ permet d'avoir une chaussée portée par une structure civile, qui théoriquement devrait rester stable (au droit du pont), même en cas de formation de dolines. Dans cette solution, l'écoulement des eaux souterraines (qui n'ait ni stoppé ni dévié) peut, sur le long terme, entraîner un glissement de la couche stratigraphique de sable sous-jacente. Toutefois, l'ancrage des pieux profonds dans la couche portante permet d'assurer une stabilité de l'ensemble de l'ouvrage (sous réserve d'un suivi et d'une auscultation périodique).

La solution des matelas de gabions partage la même école de pensée que celle du pont, à savoir « ne pas entraver l'écoulement des eaux souterraines ». Si cet écoulement est possible avec les matelas de gabions, le phénomène de formation de dolines est limité, car toute l'infrastructure routière est formée uniquement de blocs de roche. La présence de géotextile et de matériaux enrobant⁸ résistant à la corrosion permet la limitation d'apport d'éléments fins, tout en participant à la stabilisation du matelas. Cependant, une prévision à long terme (tassement et/ou glissement) nécessite une étude géotechnique complète afin de vérifier structurellement la stabilité des matelas de gabion qui reposeront sur la couche d'argile de la mer de Champlain.

La mise en place d'un mur *cut-off* va dans le sens de l'autre école de pensée qui est de limiter considérablement l'écoulement souterrain afin d'éviter la formation de dolines. Cette technique d'amélioration de sols extrêmement mous et humides permet d'obtenir, par un mélange mécanique in situ, une barrière imperméable et stable. Le rideau drainant qui l'accompagne assure d'intercepter, de dévier et d'acheminer des filets d'eau négligeables vers un point bas au niveau du ruisseau Bellemare. Sur le long terme, cette solution du mur *cut-off*, qui a une bonne tenue par rapport au phénomène de doline, doit être inspectée régulièrement afin de prévenir d'éventuels dysfonctionnements. L'annexe 9 montre de façon sommaire, un récapitulatif des avantages et inconvénients de ces solutions proposées.

⁷ Solution la plus onéreuse

⁸ Matelas de gabion enrobé d'un filet sous forme de treillis galvanisé

7. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Les solutions proposées pour la réouverture du chemin des Pins vont dans le sens de maintenir le tracé de la route existante sans déplacer celle-ci. Les critères de sécurité par rapport aux effondrements observés et recommandations du DGG présentées dans ses avis techniques ont été pris en compte dans les propositions de solutions. Ainsi, la construction d'un pont sur pieux, qui semble être la plus adéquate pour permettre de subir le moins possible les conséquences des phénomènes d'effondrement, s'avère également la plus onéreuse avec un coût préliminaire des travaux chiffré à 48,2 millions avant les taxes. L'option de l'installation d'un mur *cut-off* (ou *deep soil mixing*), pour couper les cheminements hydrauliques souterrains, sans donner l'assurance de s'affranchir des conséquences des phénomènes d'effondrement, peut-être estimé préliminairement à 16,6 millions avant les taxes. Finalement, la solution de mettre en place la route sur des matelas de gabions est évaluée à 11,4 millions. De plus, cette solution (ainsi que toutes les solutions proposées) devra faire l'objet de plusieurs études distinctes afin d'éviter de mettre tout le risque sur la firme de génie-conseil. Autrement, aucune firme ne voudra réaliser les plans et devis d'une telle solution puisque cette méthodologie n'est pas approuvée et n'a pratiquement jamais été réalisée dans d'autres projets. Les critères qui ont permis la détermination de ces estimations doivent être précisés par des études complètes si l'une ou l'autre de ces solutions est retenue. On parle ici, sans s'y limiter, d'études géotechniques, hydrauliques, hydrogéologiques, environnementales, d'arpentage, etc. Les estimations présentées dans ce rapport ne tiennent pas compte des règlements sur l'encadrement des activités en fonction des impacts environnementaux (REAFIE) et des coûts incidents (études complémentaires, ingénierie, etc.).

Considérant les coûts élevés de chacune des solutions présentées et les risques reliés à leur conception, nous ne pouvons pas recommander la mise en place d'une des solutions présentées dans le présent rapport puisque cette route dessert un faible nombre d'utilisateurs et de citoyens. Suite à l'analyse des différentes solutions présentées, nous recommandons à la Ville de Trois-Rivières de fermer le chemin des Pins de part et d'autre du ruisseau Bellemare et mettre en place des ronds-points. Ainsi, même si cette portion de route est fermée, les usagers et résidents du secteur pourront toujours avoir accès à leurs résidences puisque la route est actuellement bouclée. De plus, considérant la longueur du trajet de détour, nous jugeons également que le temps de réponse des services d'urgence (pompiers, policier, ambulance, etc.) ne sera pas critique et très peu allongé.

Enfin, nous recommandons également de stabiliser le talus comme indiqué à la section 4 du présent rapport afin d'arrêter l'érosion des sols puisque selon nos analyses, tout projet se dirige déjà vers l'infrastructure routière actuelle du chemin des Pins.

Fort possiblement que le phénomène de suffosion (cavités et dolines) se perpétuera dans le temps et que celui-ci est impossible à arrêter sans des travaux. Il est donc nécessaire de circonscrire la problématique et de mettre en place des mesures pour assurer la protection des citoyens du secteur et des usagers de la route. Ainsi, nous croyons fermement que la meilleure façon de protéger les usagers et citoyens est de fermer la route avec la mise en place de boucles de virage, stabiliser l'érosion du talus et suivre de façon annuelle ou bisannuelle l'état de la situation (emplacement des futures dolines). Nous recommandons à la Ville de Trois-Rivières de continuer à documenter dans le futur l'état de la situation afin que l'on puisse continuer à être proactif.

BIBLIOGRAPHIE

Gouvernement du Québec. (2017). *Manuel de conception des structures*. Québec, Québec, Canada: MTMDET. 386 p.

Gouvernement du Québec. (2019). *Conception des ouvrages d'art*. Québec, Québec, Canada: MTQ. 56 p.

Groupe CSA. (2014). *Canadian Highway Bridge Design Code*. Mississauga, Ontario, Canada: CSA. 875 p.

Holtz, Robert D. & Kovacs, William D. (2010). *Introduction à la géotechnique*. Montréal, Québec, Canada: École Polytechnique de Montréal, 807 p.

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre. (2019). *Données du Programme de surveillance du climat*. Direction générale du suivi de l'état de l'environnement.

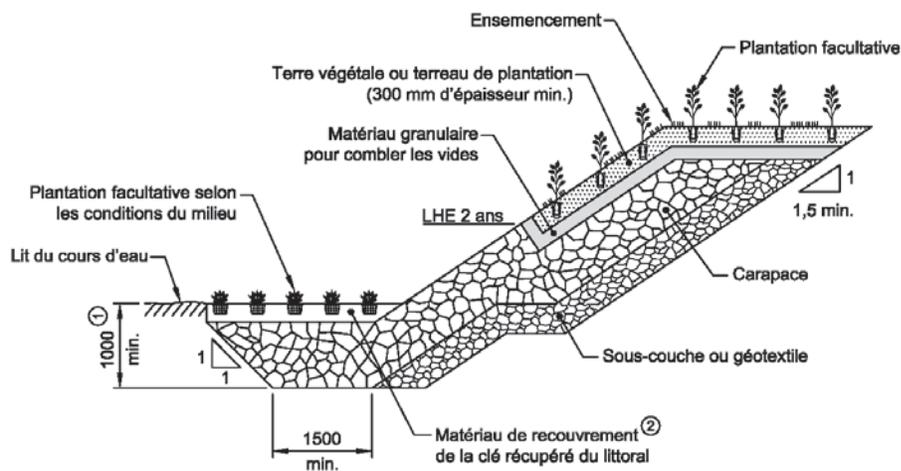
Société canadienne de géotechnique. (2013). *Manuel Canadien d'ingénierie des fondations*. Quatrième édition. 476 p.

ANNEXE 1

PLAN DE L'ENROCHEMENT PAR PALIER DU RAVIN EN PROGRESSION

NORME

PROTECTION DES BERGES AVEC
EMPIERREMENT VÉGÉTALISÉ



① Lorsque la profondeur d'affouillement prévue est supérieure à 1000 mm, cette dimension doit être augmentée.

② Épaisseur des matériaux de recouvrement :

- 300 mm d'épaisseur si la restauration de la végétation est requise (p. ex. : empiètement dans un herbier aquatique);
- 100 mm d'épaisseur si les autorités environnementales exigent un recouvrement de la clé;
- ne s'applique pas dans les autres situations (p. ex. : protection des unités de fondation d'un pont).

Note :

- les cotes sont en millimètres.

MATÉRIAUX — NORMES APPLICABLES

Géotextile
Pierre

BNQ 7009-210
Tome VII, norme 14501

Terre végétale, terreau
ensemencement et plantation

Tome VII, norme 9101

ANNEXE 2**ESTIMATION FINANCIÈRE PRÉLIMINAIRE DE L'ENROCHEMENT PAR PALIER DU RAVIN**



ESTIMATION PRÉLIMINAIRE DU COÛT DES TRAVAUX (CLASSE D)

STABILISATION DU TALUS



Client : Ville de Trois-Rivière - Direction de l'approvisionnement		Réf. V3R 6000-20-019			
Projet : RÉOUVERTURE DU CHEMIN DES PINS		Réf. FNX F2200732-002			
		Date : 5 décembre 2022			
Art.	Description	Nombre estimé	unité	Taux unitaire	Total avant TPS/TVQ
1 ANALYSES DE STABILITÉ COMPLÈTES					
1.1	Honoraires d'ingénierie	200	h	140.00 \$	= 28 000 \$
TOTAL SECTION 1					= 28 000 \$
2 PLANS ET DEVIS					
2.1	Honoraires d'ingénierie - Version préliminaire	200	h	140.00 \$	= 28 000 \$
2.2	Honoraires d'ingénierie - Version finale	75	h	140.00 \$	= 10 500 \$
TOTAL SECTION 2					= 38 500 \$
3 SURVEILLANCE ET RÉALISATION DES TRAVAUX					
3.1	Honoraires d'ingénierie - Surveillance	600	h	140.00 \$	= 84 000 \$
3.2	Excavation - Terrassement	10 000	m ³	15.00 \$	= 150 000 \$
3.3	Enrochement	50 000	t	40.00 \$	= 2 000 000 \$
3.4	Géotextile	10 500	m ²	2.00 \$	= 21 000 \$
TOTAL SECTION 3					= 2 255 000 \$
4 PERMIS					
4.1	Demande de certificat d'autorisation	1	Fort.	15 000.00 \$	= 15 000 \$
TOTAL SECTION 4					= 15 000 \$
TOTAL DES SECTIONS					= 2 336 500 \$
TOTAL DE L'ESTIMATION FINANCIÈRE					
Imprévus (20%)					= 467 300 \$
Total des travaux					= 2 803 800 \$
TOTAL DES TRAVAUX AVANT TAXES :					= 2 803 800 \$
IMPORTANT - LES ITEMS SUIVANTS SONT EXCLUS DE LA PRÉSENTE SOUMISSION :					
LES ÉTUDES GÉOTECHNIQUE, HYDRAULIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE, LE RELEVÉ D'ARPENTAGE COMPLET DU TALUS ACTUEL, TOUS LES ÉLÉMENTS À CARACTÈRE ENVIRONNEMENTAL (GESTION DES DÉBLAIS, SOLS CONTAMINÉS, ETC.) ET TOUS LES FRAIS FIXES POUR LA RÉALISATION DES TRAVAUX					
Préparé par: Justine Sirois et Isabelle Maltais				2022-12-05	
Page 1 de 1					

ANNEXE 3**PROFIL LONGITUDINAL ET VUES PRÉLIMINAIRES 3D DU PONT SUR PIEUX**

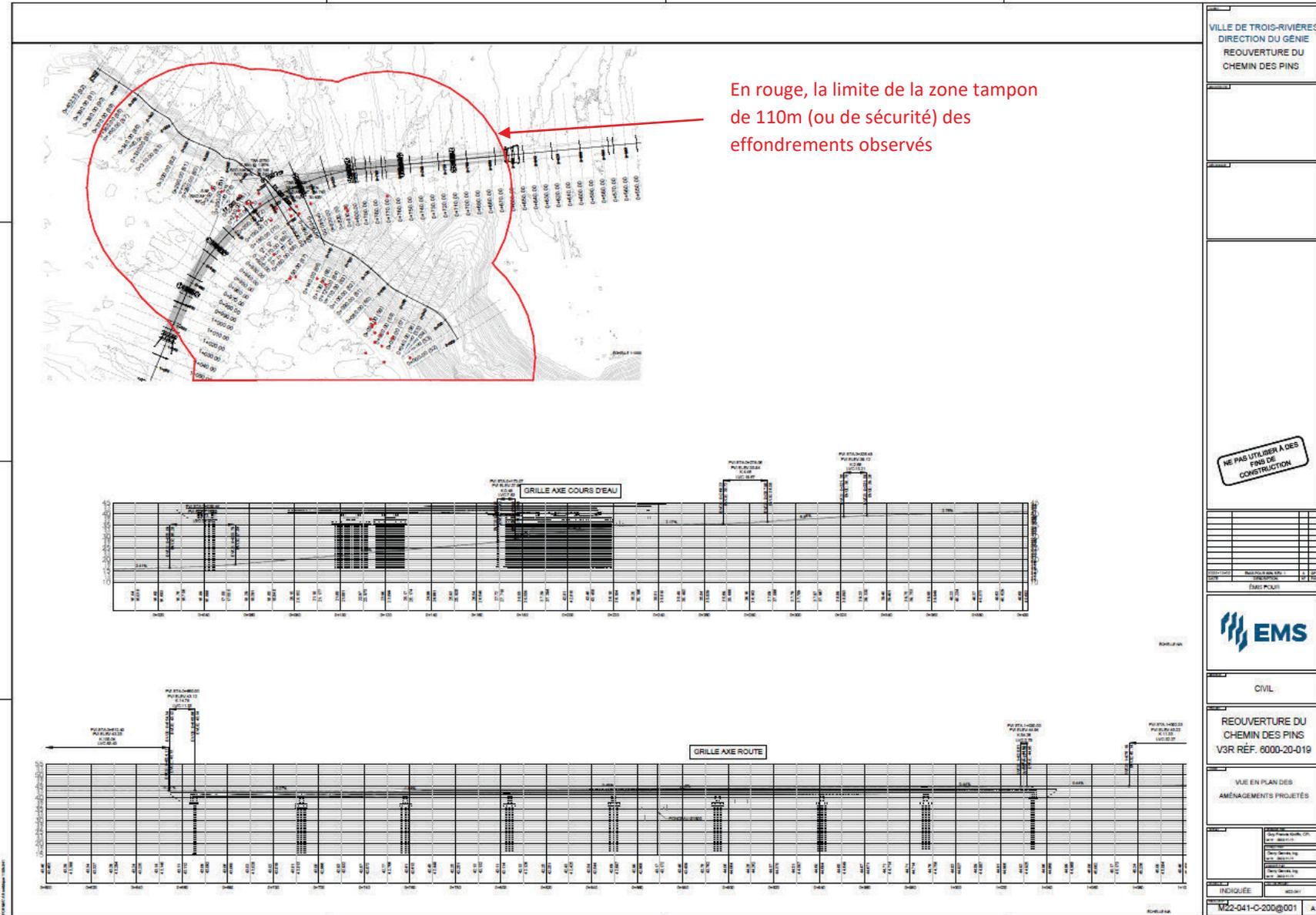


FIGURE 11: VUE EN PLAN, VUE EN TRAVERS ET PROFILS EN LONG DU PONT PROJÉTÉ

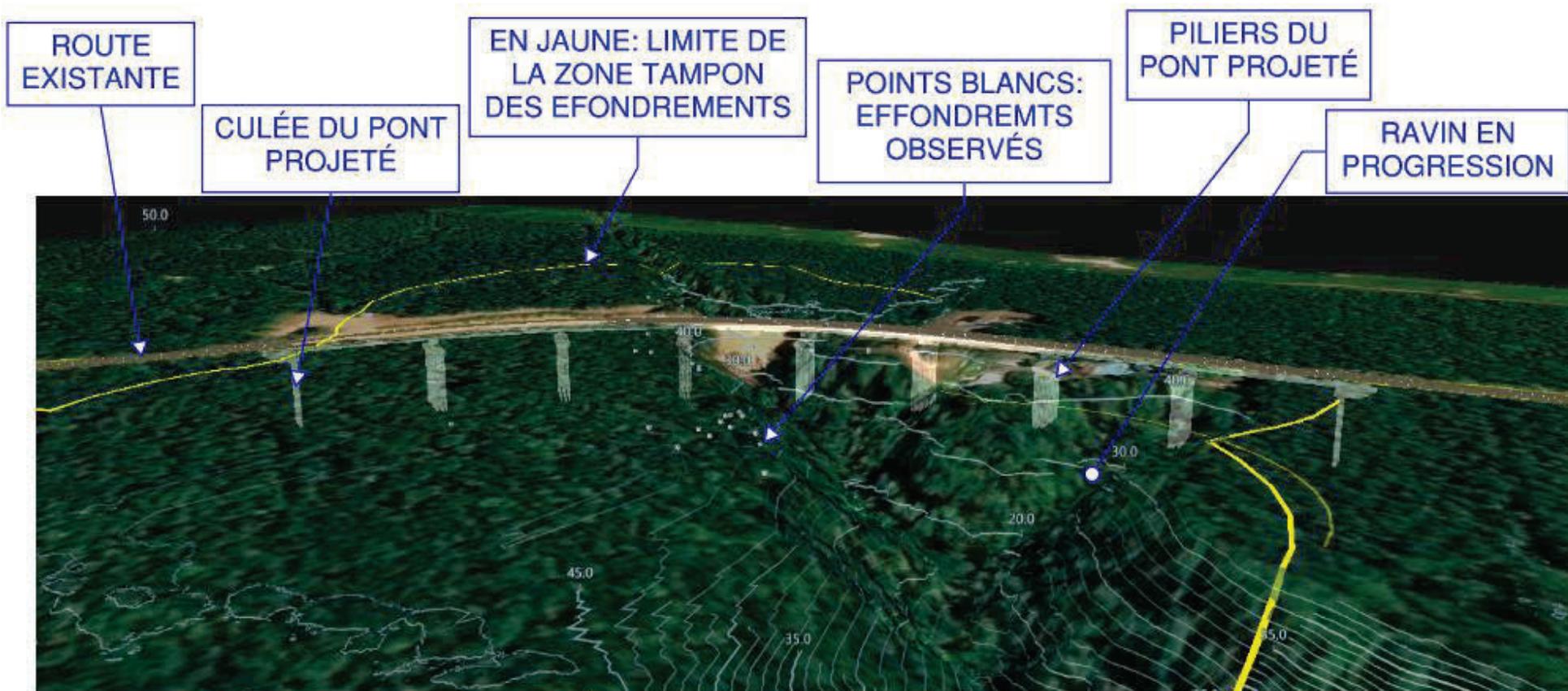


FIGURE 12: VUE 3D DE LA MODÉLISATION DU PONT PROJETÉ

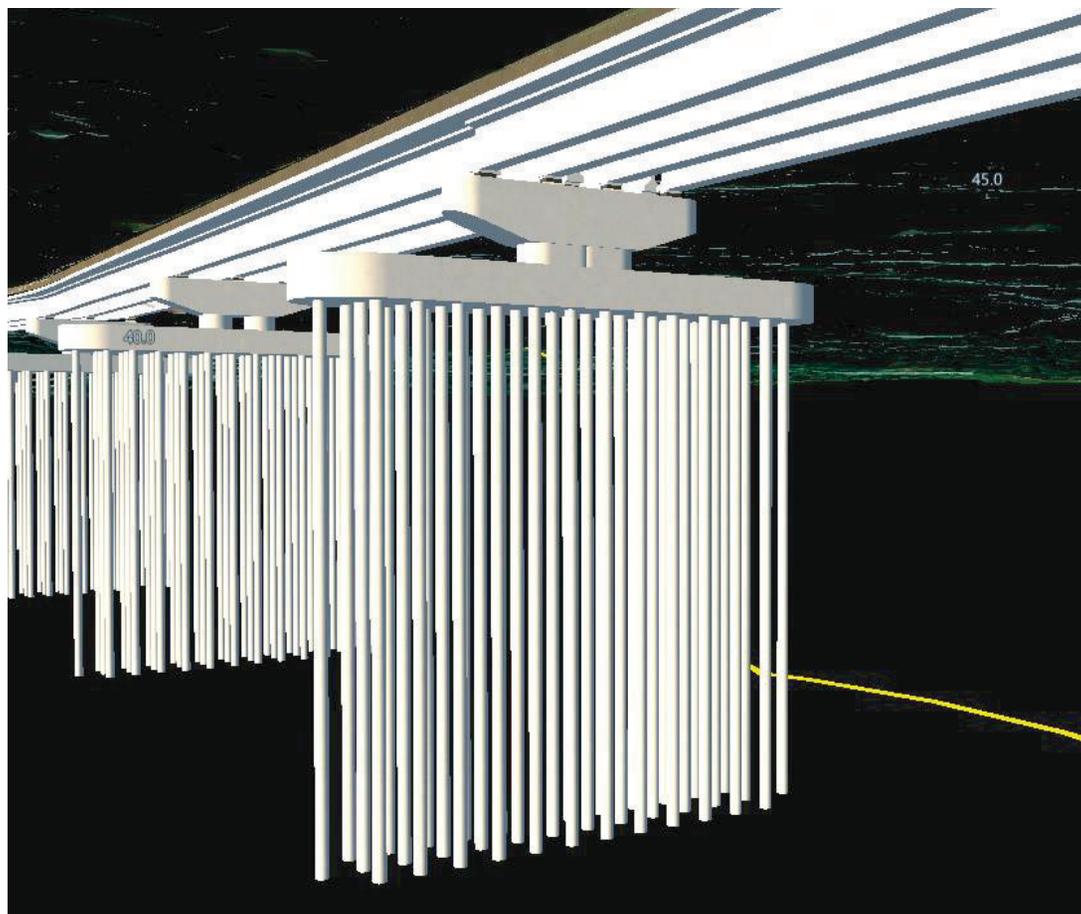


FIGURE 13: VUE 3D D'UNE DES PILES DU PONT PROJETÉ

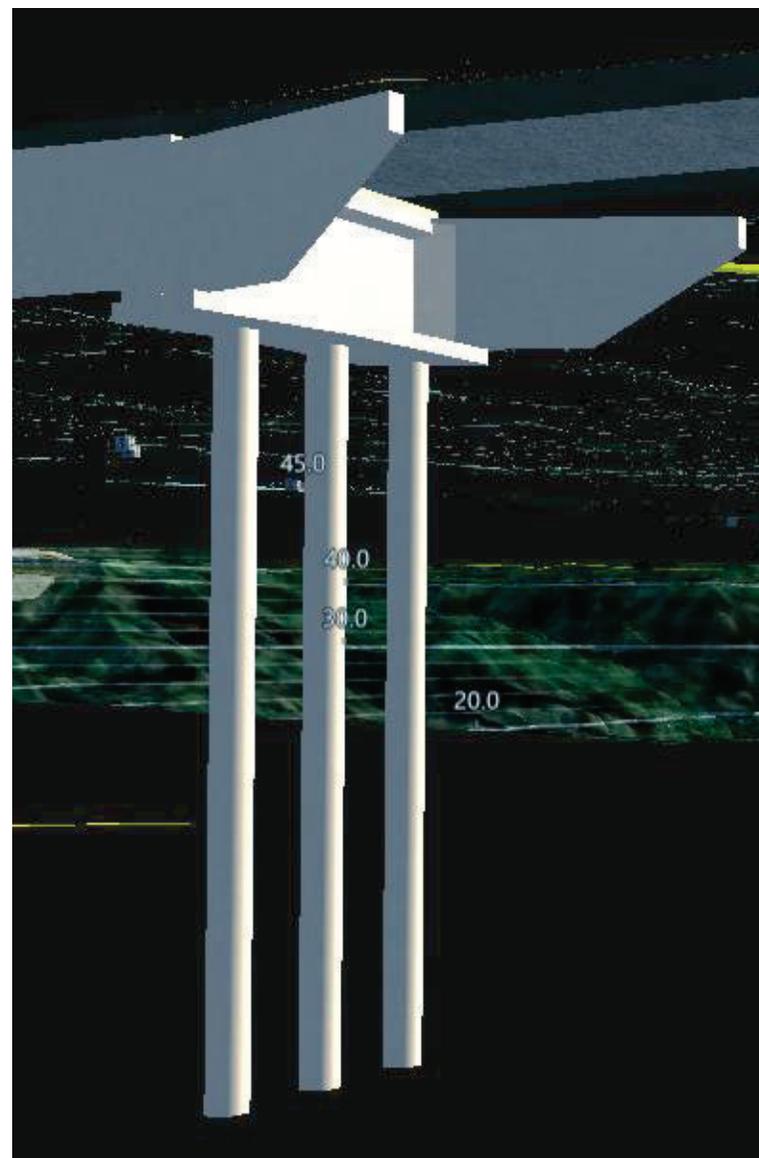


FIGURE 14: VUE 3D D'UNE DES CULÉES DU PONT PROJETÉ

ANNEXE 4**ESTIMATION FINANCIÈRE PRÉLIMINAIRE DE LA SOLUTION DU PONT SUR PIEUX**



ESTIMATION PRÉLIMINAIRE DU COÛT DES TRAVAUX (CLASSE D)



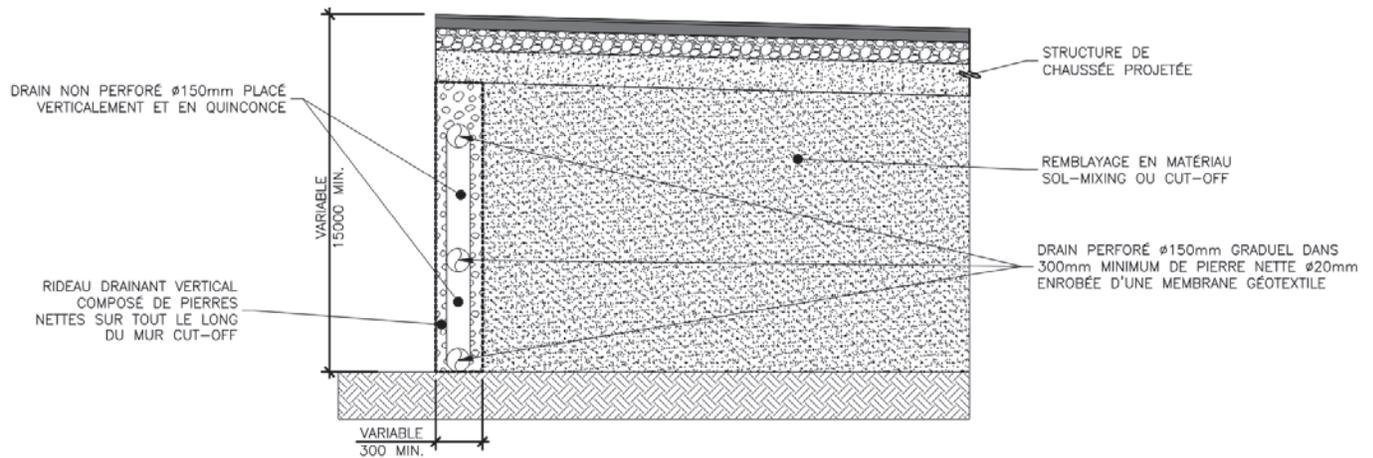
CONSTRUCTION D'UN PONT SUR PIEUX

Client :	Ville de Trois-Rivière - Direction de l'approvisionnement	Ref. V3R 6000-20-019
Projet :	RÉOUVERTURE DU CHEMIN DES PINS	Ref. EMS M22-041
		Date : Décembre 2022

Art.	Description	Nombre estimé	unité	Taux unitaire	Total avant TPS/TVQ
1	GÉNÉRALITÉS				
1.1	Organisation de chantier	1	Forf.	3 539 274.37 \$	3 539 274.37 \$
TOTAL SECTION 1					3 539 274 \$
2	TERRASEMENT				
2.1	Déboisement et essouchement	6 000	m ²	5.00 \$	30 000 \$
2.2	Déblais classe 2	6 000	m ³	17.00 \$	102 000 \$
TOTAL SECTION 2					132 000 \$
3	STRUCTURE DE CHAUSSEE				
3.1	Enrobé bitumineux ESG-14, ESG-14, PG 58-34 70mm ép.	710	t	113.00 \$	80 230 \$
3.2	Construction fondation 200mm ép. Pierre concassée MG-20	324	m ³	30.00 \$	9 720 \$
3.3	Construction sous-fondation 300mm ép. Pierre concassée MG-112	486	m ³	24.00 \$	11 664 \$
3.4	Matériau granulaire MG 20 pour accotements 600mm ép.	360	m ³	30.00 \$	10 800 \$
3.5	Remplacement du ponceau existant Ø1800 mm	30	m	4 200.00 \$	126 000 \$
3.6	Enrochement de protection ponceau 500-800mm et 1300m ép.	30	m ²	4 201.00 \$	126 030 \$
3.7	Enrochement de protection ponceau 100-200mm et 300m ép.	30	m ²	30.00 \$	900 \$
TOTAL SECTION 3					365 344 \$
4	PONT				
4.1	Pieux	1 818	m	3 000.00 \$	5 454 000 \$
4.2	Piles	1 678	m ³	1 100.00 \$	1 846 266 \$
4.3	Culée	102	m ³	1 000.00 \$	101 680 \$
4.4	Bloc d'assise	36	unité	900.00 \$	32 400 \$
4.5	Appareil d'appui	36	unité	5 000.00 \$	180 000 \$
4.6	Poutre	3 528 438	kg	6.20 \$	21 876 318 \$
4.7	Dalle	1 299	m ³	850.00 \$	1 103 895 \$
4.8	Chasse roue	100	m ³	1 200.00 \$	119 880 \$
4.9	Drain en acier	36	unité	500.00 \$	18 000 \$
4.10	Grillière de sécurité type 210A	760	m	500.00 \$	380 000 \$
4.11	Membrane d'étanchéité	2 000	m ²	50.00 \$	100 000 \$
4.12	Remblai d'approche	1 872	m ³	30.00 \$	56 160 \$
4.13	Protection talus (100-200mm)	500	m ²	60.00 \$	30 000 \$
4.14	Arpentage et vérification chantier	1	Global	20 000.00 \$	20 000 \$
4.15	Terre végétale et engazonnement	200	m ²	25.00 \$	5 000 \$
4.16	Démolition existant	1	Global	3 398 000.00 \$	3 398 000 \$
4.17	Signalisation et marquage	3 000	m	5.00 \$	15 000 \$
TOTAL SECTION 4					34 736 600 \$
5	RÉFECTION DE TERRAINS PRIVÉS				
5.1	Terre végétale, 150 mm ép.	1 000	m ²	3.00 \$	3 000 \$
5.2	Ensemencement hydraulique H1	1 500	m ²	5.00 \$	7 500 \$
5.3	Ensemencement hydraulique avec paille H3	3 000	m ²	12.00 \$	36 000 \$
TOTAL SECTION 5					46 500 \$
6	DÉPLACEMENT DES SERVICES PUBLICS				
6.1	Câbles poteaux HQ	800	m	8.00 \$	6 400 \$
6.2	Luminaire de poteau électrique	7	unité	3 700.00 \$	25 900 \$
6.3	Câbles téléphoniques Bell	800	m	100.00 \$	80 000 \$
TOTAL SECTION 6					112 300 \$
TOTAL DES SECTIONS					38 932 018 \$
TOTAL DE L'ESTIMATION FINANCIÈRE					
					Imprévus (20%) = 7 786 404 \$
					Total des travaux = 46 718 422 \$
					Aquisition de 2 maisons et terrains = 1 475 000 \$
					TOTAL DES TRAVAUX AVANT TAXES : = 48 193 422 \$
Préparé par: Guy Francis Kiniffo					
2022-12-02					
Page 1 de 1					

ANNEXE 5

COUPE TYPE MUR *CUT-OFF*



NOTES :

1. LA CONCEPTION DU MUR REVIENT ENTIÈREMENT AU FOURNISSEUR DU MUR.
2. LES SPÉCIFICATIONS DU REMBLAYAGE DU MUR DOIVENT ÊTRE COORDONNÉES AVEC LE DESSIN D'ATELIER DU FOURNISSEUR.
3. LES SPÉCIFICATIONS DES GÉOGRILLES, SI REQUISES, DOIVENT ÊTRE FOURNIS PAR LE FOURNISSEUR DU MUR.

COUPE TYPE – MUR CUT-OFF
ÉCHELLE : AUCUNE

FIGURE 15: COUPE TYPE DU MUR *CUT-OFF*

ANNEXE 6**ESTIMATION FINANCIÈRE PRÉLIMINAIRE DE LA SOLUTION DU MUR *CUT-OFF***



ESTIMATION PRÉLIMINAIRE DU COÛT DES TRAVAUX (CLASSE D)

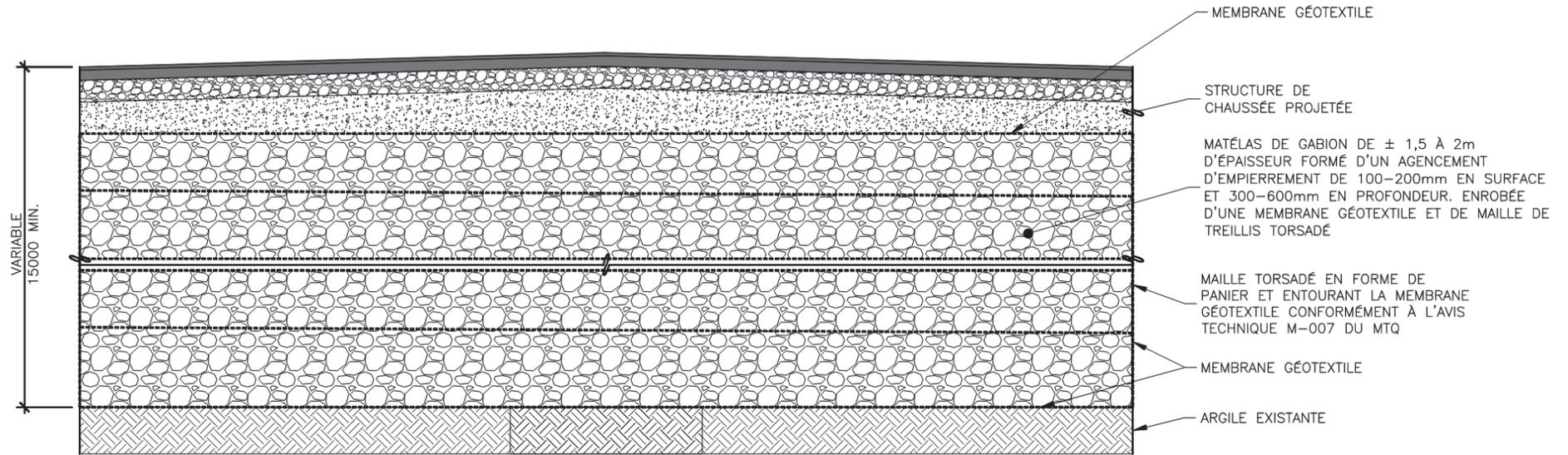
CONSTRUCTION D'UN MUR CUT-OFF



Client : Ville de Trois-Rivière - Direction de l'approvisionnement		Réf. V3R 6000-20-019			
Projet : RÉOUVERTURE DU CHEMIN DES PINS		Réf. EMS M22-041			
		Date : Décembre 2022			
Art.	Description	Nombre estimé	unité	Taux unitaire	Total avant TPS/TVQ
1	GÉNÉRALITÉS				
1.1	Organisation de chantier	1	Forf.	1 255 758.00 \$	1 255 758.00 \$
TOTAL SECTION 1					1 255 758 \$
2	TERRASEMENT				
2.1	Déboisement	2 000	m²	5.00 \$	10 000 \$
2.2	déblais classe 2	2 000	m³	17.00 \$	34 000 \$
TOTAL SECTION 2					44 000 \$
3	VOIRIE				
3.1	Enrobé bitumineux ESG-14, ESG-14, PG 58-34 70mm ép.	710	t	113.00 \$	80 230 \$
3.2	Construction fondation 200mm ép. Pierre concassée MG-20	865	m³	30.00 \$	25 950 \$
3.3	Construction sous-fondation 300mm ép. Pierre concassée MG-112	1 300	m³	24.00 \$	31 200 \$
3.4	Matériau granulaire MG 20 pour accotements 600mm ép.	960	m³	30.00 \$	28 800 \$
3.5	Glissière de sécurité	760	m	100.00 \$	76 000 \$
TOTAL SECTION 3					242 180 \$
4	MUR CUT-OFF				
4.1	bloc muret 35m x 5m x 15m	10	unité	1 200 000.00 \$	12 000 000 \$
4.2	Matériau granulaire MG 20 pour filtre drainant 300 mm ép.	2 220	m³	30.00 \$	66 600 \$
4.3	Matériau granulaire MG 20 revêtement protection 300 mm ép.	20	m³	30.00 \$	600 \$
4.4	Drains	840	m	35.00 \$	29 400 \$
4.5	Géotextile	8 000	m²	2.00 \$	16 000 \$
TOTAL SECTION 4					12 112 600 \$
5	RÉFECTION DE TERRAINS PRIVÉS				
5.1	Terre végétale, 150 mm ép.	1 000	m²	3.00 \$	3 000 \$
5.2	Ensemencement hydraulique H1	1 500	m²	5.00 \$	7 500 \$
5.3	Ensemencement hydraulique avec paille H3	3 000	m²	12.00 \$	36 000 \$
TOTAL SECTION 5					46 500 \$
6	DÉPLACEMENT DES SERVICES PUBLICS				
6.1	Câbles poteaux HQ	800	m	8.00 \$	6 400 \$
6.2	Luminaire de poteau électrique	7	unité	3 700.00 \$	25 900 \$
6.3	Câbles téléphoniques Bell	800	m	100.00 \$	80 000 \$
TOTAL SECTION 6					112 300 \$
TOTAL DES SECTIONS					13 813 338 \$
TOTAL DE L'ESTIMATION FINANCIÈRE					
Imprévus (20%)					2 762 668 \$
Total des travaux					16 576 006 \$
TOTAL DES TRAVAUX AVANT TAXES :					16 576 006 \$
Préparé par: Guy Francis Kiniffo					2022-12-02
					Page 1 de 1

ANNEXE 7

COUPE TYE DE LA ROUTE AVEC MATELAS DE GABIONS



COUPE TYPE – ROUTE AVEC MATÉLAS DE GABION
ÉCHELLE : AUCUNE

FIGURE 16: COUPE TYPE DE LA RÉFECTION DE LA ROUTE AVEC MATELAS DE GABIONS

ANNEXE 8**ESTIMATION FINANCIÈRE PRÉLIMINAIRE DE LA SOLUTION DES MATELAS DE GABIONS**



ESTIMATION PRÉLIMINAIRE DU COÛT DES TRAVAUX (CLASSE D)

CONSTRUCTION D'UNE ROUTE AVEC MATELAS DE GABIONS



Client : Ville de Trois-Rivière - Direction de l'approvisionnement		Réf. V3R 6000-20-019			
Projet : RÉOUVERTURE DU CHEMIN DES PINS		Réf. EMS M22-041			
		Date : Décembre 2022			
Art.	Description	Nombre estimé	unité	Taux unitaire	Total avant TPS/TVQ
1	GÉNÉRALITÉS				
1.1	Organisation de chantier	1	Forf.	858 898.00 \$	858 898.00 \$
TOTAL SECTION 1					858 898 \$
2	TERRASEMENT				
2.1	Déboisement	2 000	m²	5.00 \$	10 000 \$
2.2	déblais classe 2	2 000	m³	17.00 \$	34 000 \$
TOTAL SECTION 2					44 000 \$
3	VOIRIE				
3.1	Enrobé bitumineux ESG-14, ESG-14, PG 58-34 70mm ép.	710	t	113.00 \$	80 230 \$
3.2	Construction fondation 200mm ép. Pierre concassée MG-20	865	m²	30.00 \$	25 950 \$
3.3	Construction sous-fondation 300mm ép. Pierre concassée MG-112	1 300	m²	24.00 \$	31 200 \$
3.4	Matériau granulaire MG 20 pour accotements 600mm ép.	960	m³	30.00 \$	28 800 \$
3.5	Glissière de sécurité	760	m	100.00 \$	76 000 \$
TOTAL SECTION 3					242 180 \$
4	Matelas de gabions				
4.1	Excavation du sable lâche	87 000	m³	12.00 \$	1 044 000 \$
4.2	Matelas de gabions	87 000	m³	80.00 \$	6 960 000 \$
4.3	Géotextile	70 000	m²	2.00 \$	140 000 \$
TOTAL SECTION 4					8 144 000 \$
5	RÉFECTION DE TERRAINS PRIVÉS				
5.1	Terre végétale, 150 mm ép.	1 000	m²	3.00 \$	3 000 \$
5.2	Ensemencement hydraulique H1	1 500	m²	5.00 \$	7 500 \$
5.3	Ensemencement hydraulique avec paille H3	3 000	m²	12.00 \$	36 000 \$
TOTAL SECTION 5					46 500 \$
6	DÉPLACEMENT DES SERVICES PUBLICS				
6.1	Câbles poteaux HQ	800	m	8.00 \$	6 400 \$
6.2	Luminaire de poteau électrique	7	unité	3 700.00 \$	25 900 \$
6.3	Câbles téléphoniques Bell	800	m	100.00 \$	80 000 \$
TOTAL SECTION 6					112 300 \$
TOTAL DES SECTIONS					9 447 878 \$
TOTAL DE L'ESTIMATION FINANCIÈRE					
Imprévis (20%)					1 889 576 \$
Total des travaux					11 337 454 \$
TOTAL DES TRAVAUX AVANT TAXES :					11 337 454 \$
Préparé par: Guy Francis Kiniffo					2022-12-02

ANNEXE 9**AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS SUCCINCT DES SOLUTIONS PROPOSÉES**

SOLUTION	AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Pont avec fondation profonde sur pieux	<ul style="list-style-type: none"> - Phénomènes de dolines pratiquement sans effet sur l'ensemble du pont et des pieux (à confirmer par l'étude géotechnique); - Durée de vie nominale longue de 75 ans au moins; - Structure solide et facile à construire (vs pont suspendu, en arc, à hauban...); - Large choix dans les matériaux de construction (acier, béton, aluminium); - Pratiquement pas de vibration; - Peu d'entretien et fermeture partielle si entretien. 	<ul style="list-style-type: none"> - Nombreuses études multidisciplinaires complètes requises; - Délais d'exécution des travaux très longs; - Coût des travaux <u>très</u> élevé; - Expropriation nécessaire de certaines résidences; - Reconstruction du ponceau existant et déplacement des services publics; - Auscultation périodique du pont et vérification régulière des points d'appui; - Portée limitée à la résistance des poutres.
Mur cut-off ou deep soil mixing	<ul style="list-style-type: none"> - Phénomène de doline sans effet sur l'infrastructure de la chaussée; - Méthode peu invasive selon les caractéristiques souhaitées; - Durable à court et moyen terme, l'effet à long terme doit être déterminé par les études hydrogéologique et géotechnique; - Délai d'exécution raccourci. 	<ul style="list-style-type: none"> - Études hydraulique, hydrogéologique et géotechnique complètes requises; - Coût de travaux élevé;- - Mobilisation d'équipements importants et imposants «batching plant» (outils de malaxage, tarières, lames, tête rotative, etc.); - Nombreux essais de contrôle et protocole sur site pour les travaux d'injection en cours; - Reconstruction du ponceau existant et déplacement des services publics, - Tassement différentiel possible à long terme; - Risque de déplacer le problème ailleurs, études complémentaires requises.
Matelas de gabion	<ul style="list-style-type: none"> - Phénomène de doline sans effet sur l'infrastructure de la chaussée, - Durable à court et moyen terme 	<ul style="list-style-type: none"> - Étude hydraulique, hydrogéologique et géotechnique complète requise; - Délai d'exécution élevé; - Coût de travaux élevé; - Reconstruction du ponceau existant et déplacement des services publics, - Auscultation périodique requise, - Tassement différentiel possible à long terme, - Les phénomènes de doline peuvent affecter les terrains voisins et probablement à long terme la chaussée elle-même, - Méthode d'excavation très invasive avec mobilisation d'énormes quantités de roche

ANNEXE 10

ÉTUDE DE LA DGG (MTQ)– AVIS TECHNIQUES



Direction de la géotechnique et de la géologie

PAR COURRIEL

Québec, 4 juin 2019

Monsieur Claude Lebeux
Service des programmes d'aide financière
et des municipalités
Direction du rétablissement
Ministère de la Sécurité publique
455, rue du Marais, bureau 100
Québec (Québec) G1M 3A2

OBJET : Avis technique préliminaire
Évènement : Effondrements de terrain
Localisation : Chemins des Pins,
Municipalité : Trois-Rivières
N/Dossier : MT.04.37067.18.01

Monsieur,

Cet avis technique préliminaire répond à une demande d'expertise envoyée par le Centre des opérations gouvernementales de votre ministère, le 2 mai 2019, concernant des effondrements qui ont été observés à plusieurs endroits aux abords du chemin des Pins, dans le secteur du ponceau du ruisseau Bellemare. Les lieux ont été inspectés une première fois le 3 mai 2019 par l'ingénieure Catherine Thibault et le soussigné, en compagnie de Mme Catherine Chamberland, conseillère en sécurité civile pour la région. Deux représentants de la ville étaient également présents lors de la visite de terrain, soit la technicienne en environnement Mme Marie-Pascale Munger et l'ingénieur Maxime Boisvert.

Une seconde visite des lieux a été effectuée le 27 mai dernier par l'ingénieur Pascal Locat et le soussigné, accompagnés par monsieur Jean Côté, professeur à l'université Laval.

... 2

Section des mouvements de terrain
2700, rue Einstein, Bloc F
Québec (Québec) G1P 3W8

M. Claude Lebeux

2

Le mandat confié à la Direction de la géotechnique et de la géologie (DGG) par le ministère de la Sécurité publique consiste à évaluer si la route municipale et ses éléments constituants ont été touchés par le mouvement de terrain, à donner un avis technique sur la situation et à recommander, le cas échéant, les mesures à prendre afin d'assurer la sécurité des lieux à court terme.

Cet avis constitue une évaluation géotechnique de la situation, laquelle est basée sur les données et les informations recueillies sur le terrain, sur l'information d'archives (sondages, forages, levés par lidar, photographies aériennes, rapports géologiques ou géotechniques, dossiers de glissements de terrain à proximité, etc.) ainsi que sur l'expertise de la DGG dans le domaine des mouvements de terrain. Aucun calcul du coefficient de sécurité du talus n'a été réalisé dans le cadre du présent mandat.

Le présent avis complète le courriel de retour de visite qui vous a été envoyé le 3 mai 2019. Il comprend une description des lieux et des observations de terrain, une évaluation de la situation et des recommandations. Les figures mentionnées dans le texte sont présentées à la fin du document. Il est à noter que les distances mentionnées dans le présent avis ont été relevées sur le terrain à l'aide d'un ruban à mesurer ou d'un télémètre, et que les hauteurs et les inclinaisons des pentes ont été obtenues à l'aide d'un clinomètre de poche. Certaines mesures peuvent néanmoins avoir été obtenues ou validées à l'aide d'un modèle numérique de terrain réalisé à partir d'un relevé lidar qui a été effectué dans la région en 2008.

Le site a été visité l'année dernière par la DGG, alors que la ville avait signalé l'apparition d'effondrements sur la route au-dessus du ponceau. L'analyse de la situation l'an passé, avait conduit à indiquer que les cavités sur la route étaient causées par des déformations majeures sur le ponceau du ruisseau Bellemare et que celui-ci devait être remplacé afin de corriger la situation. Des travaux ont ainsi été réalisés à l'été dernier pour remplacer le ponceau et reconstruire le remblai de la route.

Il y a quelques semaines, les représentants de la ville de Trois-Rivières ont observé de nouvelles déformations aux abords de la route, lesquelles se sont récemment détériorées. Au moment de la visite des lieux, le 3 mai dernier, plusieurs effondrements de plusieurs mètres de diamètre et atteignant 2 mètres de profondeur ont été observés à de nombreux endroits sur le site (figure 1). Quelques-uns d'entre eux se trouvent dans les pentes de remblai des deux côtés

... 3

M. Claude Lebeux

3

de la route (figure 2). Un autre trou de près de 4 mètres de diamètre s'est produit sur la chaussée sur la voie en direction nord du chemin des Pins (figure 3). Enfin, deux autres trous ont été observés dans les sols naturels, c'est-à-dire à l'extérieur du remblai de la route. La visite du 27 mai a permis de constater plusieurs autres effondrements au sommet des talus. Bien que la plupart de ceux-ci ne soient pas récents, quelques-uns d'entre eux sont apparus cette année.

Les observations de terrain et l'analyse de la situation indiquent que la route est touchée par un phénomène d'effondrements de terrain et qu'il est possible que d'autres trous se développent. Il est également possible que des cavités soient déjà présentes sous la surface et qu'elles puissent causer un effondrement à tout moment.

Par ailleurs, considérant l'état neuf du ponceau et du remblai sus-jacent (figure 4), et considérant également la disposition des effondrements et leur présence à la fois dans les sols de remblai de la route et dans les sols naturels adjacents, il est possible d'affirmer que le phénomène est d'origine naturelle et n'est pas associé à un vice au niveau de l'ouvrage.

Toutefois, des investigations supplémentaires seront réalisées dans les prochaines semaines par la DGG afin de statuer sur l'origine exacte des déformations et recommander les mesures appropriées pour corriger la situation.

... 4

M. Claude Lebeux

4

Entre temps, nous recommandons de conserver le chemin des Pins fermé jusqu'à ce que l'origine des effondrements soit identifiée et que des mesures soient prises pour corriger la situation.

En espérant que le tout sera à votre convenance, nous demeurons à votre disposition pour toute information complémentaire ou pour tout soutien technique additionnel concernant ce dossier.

Thomas Fournier, ing.
N°OIQ : 5004394

- c. c. M. Claude Martel, chef du Service des programmes, Direction du rétablissement, ministère de la Sécurité publique
- M^{me} Gilla Huet, Service de l'aide financière aux particuliers et aux entreprises, Direction du rétablissement
- M^{me} Janelle Potvin, directrice par intérim
Direction de la géotechnique et de la géologie
- M. Denis Demers, chef d'équipe, section des mouvements de terrain,
Direction de la géotechnique et de la géologie

... 5

M. Claude Lebeux

5



Figure 1 : Croquis de la situation indiquant l'emplacement des effondrements observés sur le terrain

... 6

M. Claude Lebeux

6



Figure 2: Effondrement observé dans la pente de remblai en bordure de la route.

... 7

M. Claude Lebeux

7



Figure 3 : Effondrement observé sur la chaussée de la route.

... 8

M. Claude Lebeux

8



Figure 4 : Ponceau en béton mis en place à l'été 2018 par la ville.



Direction de la géotechnique et de la géologie

PAR COURRIEL

Québec, le 14 février 2020

Monsieur Claude Lebeux
Service des programmes d'aide financière
et des municipalités
Direction du rétablissement
Ministère de la Sécurité publique
455, rue du Marais, bureau 100
Québec (Québec) G1M 3A2

OBJET : Premier avis technique

Évènement : Ravin de suffosion
Localisation : chemin des Pins
Municipalité : Trois-Rivières
N/Dossier : MT.04.37067.19.04

Monsieur,

Cet avis technique constitue un compte rendu de visite qui vise principalement à consigner par écrit certaines de nos observations de terrain ainsi que les recommandations émises sur place par rapport à une demande d'expertise envoyée par le Centre des opérations gouvernementales (COG) de votre ministère, le 10 février 2020. Cette demande concerne l'évolution du phénomène de ravinement par suffosion

Les lieux ont été inspectés, le 11 février 2020, par l'ingénieure Catherine Thibault et le soussigné. Cette visite a été réalisée en compagnie de M^{me} Catherine Chamberland, conseillère en sécurité civile pour la région, ainsi que de M. Martin Désilets, agent en sécurité civile à la ville de Trois-Rivières.

Le site a fait l'objet de deux autres demandes d'assistance technique du COG en 2019. La première demande a été envoyée le 2 mai 2019 concernant des effondrements (cavités) et des glissements de terrain survenus sur la propriété. Le site avait alors été visité par les ingénieurs Thomas Fournier et Catherine Thibault, à la suite de quoi un compte rendu de visite vous a été transmis par courriel le 25 juin 2019. La seconde demande a été envoyée le 28 novembre 2019, cette dernière concernait l'apparition d'un ravin de suffosion. Le site avait alors été visité par l'ingénieure Catherine Thibault et le soussigné et un compte rendu de visite vous a été transmis par courriel le 29 novembre 2019.

Rappelons que le mandat confié à la Direction de la géotechnique et de la géologie (DGG) consiste à évaluer si la situation présente des signes de danger imminent de mouvement de terrain pour la résidence et ses biens essentiels (chemin d'accès, fosse septique, puits) à donner un avis technique sur la situation et à recommander, le cas échéant, les mesures à prendre afin d'assurer la sécurité des lieux à court terme.

Cet avis constitue une évaluation géotechnique de la situation. Cette évaluation est basée sur les données et les informations recueillies sur le terrain, sur des données d'investigations géotechniques réalisées en décembre 2019, sur des relevés photographiques et vidéo, sur des données d'archives (sondages, forages, levés par lidar, photographies aériennes, rapports géologiques ou géotechniques, dossiers de glissements de terrain à proximité, etc.) ainsi que sur l'expertise de la DGG dans le domaine des mouvements de terrain. Aucun calcul du coefficient de sécurité du talus n'a été réalisé dans le cadre du présent mandat.

Le présent avis comprend une description des désordres récents et des observations de terrain, une évaluation de la situation et des recommandations. Les figures mentionnées dans le texte sont présentées à la fin du document. Il est à noter que les distances rapportées ci-après ont été relevées sur le terrain à l'aide d'un ruban à mesurer ou d'un télémètre, et que les hauteurs et les inclinaisons des pentes ont été obtenues à l'aide d'un clinomètre de poche. Certaines mesures peuvent néanmoins avoir été obtenues ou validées à l'aide d'un modèle numérique de terrain (MNT) réalisé à partir d'un relevé lidar qui a été effectué dans la région en mai 2019.

DÉSORDRES RÉCENTS ET OBSERVATIONS DE TERRAIN

Le 7 février 2020, des masses importantes de sols ont été emportées de façon subite au pourtour des escarpements du ravin de suffosion qui était initialement apparu en novembre 2019, en bordure du ruisseau Bellemare

En sommet de talus, les pertes de terrain supplémentaires

les plus grandes subies lors de cet événement ont été estimées à environ 7 m, et ce, dans l'axe du puits d'approvisionnement en eau potable. Lors de la plus récente visite de terrain, la distance entre ce dernier et les sols en porte-à-faux surplombant l'escarpement arrière du ravin a été mesurée à 5 m. La partie saillante est située en sommet de talus et s'avance sur des distances pouvant atteindre jusqu'à 2 m de l'escarpement arrière (figure 2).

La distance entre le garage et l'escarpement latéral du ravin s'est également rétrécie d'environ 1 m depuis la visite précédente. Elle a été estimée à environ 15 m au moment de notre récente visite des lieux. Des fissures présentes derrière un des piquets repères installés en novembre 2019 dans l'axe du garage afin de suivre l'évolution du ravin indiquent que l'escarpement latéral du ravin pourrait s'élargir d'environ 2 m supplémentaires à très court terme dans cette direction.

De plus, des photographies montrant l'escarpement arrière du ravin de suffosion ont été prises toutes les heures durant les périodes d'ensoleillement du 2 décembre 2019 au 11 février 2020 à l'aide d'une caméra fixe à relais cellulaire installée par la DGG. Ces images ont notamment permis de constater que le phénomène de ravinement s'est poursuivi graduellement au cours des mois de décembre, de janvier et de février jusqu'à l'agrandissement plus soudain du ravin, qui s'est traduit par d'importantes pertes de terrain en sommet, en février 2020. Un survol du site par drone a également été réalisé par les techniciens de la DGG le 11 février 2020 afin de mieux apprécier l'ampleur du phénomène et les caractéristiques du ravin.

Au moment de la visite, de fortes venues d'eau s'écoulaient toujours au fond du ravin de suffosion et le phénomène continuait d'emporter d'autres tranches de sols de façon sporadique, de la même manière que lors de la visite précédente.

ÉVALUATION DE LA SITUATION ET RECOMMANDATIONS

En somme, il a été constaté que le ravin de suffosion poursuit sa progression en direction du puits d'approvisionnement en eau potable de la résidence. Bien que nous sommes présentement en période d'étiage, le débit des venues d'eau ne semble pas avoir diminué de façon significative depuis novembre dernier. Par ailleurs, les redoux hivernaux ainsi que l'arrivée de la période printanière pourraient accentuer le débit de ces venues d'eau dans les mois qui suivent et ainsi, accélérer la progression du phénomène.

Considérant la direction préférentielle empruntée par le ravin de suffosion, le rythme auquel ce dernier évolue déjà, ainsi que distance de plus en plus faible qui le sépare du puits d'approvisionnement en eau potable, tout porte à croire que ce dernier pourrait être déchaussé par le phénomène à très court terme.

Par ailleurs, si l'on considère la géométrie actuelle des lieux (figure 2), l'escarpement arrière du ravin est trop raide pour être stable. Toujours selon la configuration actuelle des lieux, cet escarpement, qui est subvertical sur une hauteur d'environ 7 m, s'ajustera de manière à tendre vers l'angle de repos des matériaux sableux qui le constituent, qui est de l'ordre de 33°. Ainsi, outre les éventuelles pertes de terrains associées à la progression du phénomène de ravinement, d'autres pertes de terrains supplémentaires sont donc à prévoir en lien avec l'ajustement de l'escarpement. Or, comme l'illustre le croquis de la figure 2, celles-ci sont déjà à elles seules suffisantes pour toucher le puits.

De surcroît, la DGG a été informée lors d'un entretien téléphonique tenu hier en fin de journée avec votre conseillère en sécurité civile, M^{me} Catherine Chamberland, que le puits a cessé de fonctionner le 13 février 2020.

Le tarissement du puits est fort probablement dû à la progression du ravin de suffosion. Par conséquent, pour cette raison et les raisons mentionnées précédemment, **on considère que le puits est touché par le phénomène de suffosion.**

Rappelons aussi que le site est également affecté par une problématique de formation de cavités, qui sont aussi dues aussi au phénomène de suffosion. Ces cavités résultent d'effondrements de la surface du terrain, formant subitement des dépressions pouvant atteindre jusqu'à 4 m de diamètre et 4 m de profondeur. À cet égard, l'analyse des données recueillies dans le cadre des investigations géotechniques réalisées sur le site en décembre 2019 est présentement en cours. Selon nos connaissances actuelles des conditions de terrain, plusieurs talus qui bordent la propriété à l'étude présentent une stratigraphie propice au développement de désordres causés par suffosion (cavités et ravinements). D'autres phénomènes similaires à ceux qui sont survenus en 2019 et 2020 pourraient donc se produire ailleurs et ce de manière imprévisible. À ce sujet, nous vous informons qu'à la lumière des connaissances présentement acquises et de notre évaluation de la situation, il est d'ores et déjà possible d'affirmer que la majeure partie du terrain pourrait subir d'autres affaissements subit, menaçant ainsi la sécurité des personnes y circulant.

Lors de la plus récente visite de terrain, il a été recommandé de déplacer le périmètre de sécurité à une distance de 10 m au pourtour du ravin de suffosion. La ville de Trois-Rivières a procédé à l'application de cette recommandation immédiatement.

Nous recommandons toutefois de procéder avec prudence (c.-à-d. : ne pas s'approcher du ravin, de cavités ou de toutes autres formes de dépressions circulaires susceptibles d'être repérées sur le terrain), tout en limitant le plus possible le temps d'exposition ou autres intervenants à cet aléa.

En raison de la complexité, de l'étendue et de l'imprévisibilité des phénomènes il est difficile d'envisager des travaux de stabilisation ou de mitigation pouvant permettre de contrer ces phénomènes tout en garantissant la sécurité à long terme. De plus, ce genre d'intervention nécessiterait la réalisation de travaux qui seraient assurément plus onéreux

Un avis technique plus détaillé comprenant entre autres un résumé des observations de terrain, les résultats de nos campagnes d'investigation géotechnique, une analyse plus détaillée du phénomène, ainsi qu'un rappel des recommandations émises concernant la sécurité des lieux, vous sera transmis ultérieurement.

En espérant que le tout sera à votre convenance, nous demeurons à votre disposition pour toute information complémentaire ou pour tout soutien technique additionnel concernant ce dossier.

Hubert Michaud, ing. M.Sc.
N°OIQ : 5078479

- c. c. M. Alfred Yameogo, chef par intérim du Service des programmes,
Direction du rétablissement
- M^{me} Gilla Huet, Service de l'aide financière aux particuliers, Direction
du rétablissement
- M^{me} Janelle Potvin, directrice par intérim
Direction de la géotechnique et de la géologie
- M. Denis Demers, chef d'équipe, Section des mouvements de terrain,
Direction de la géotechnique et de la géologie

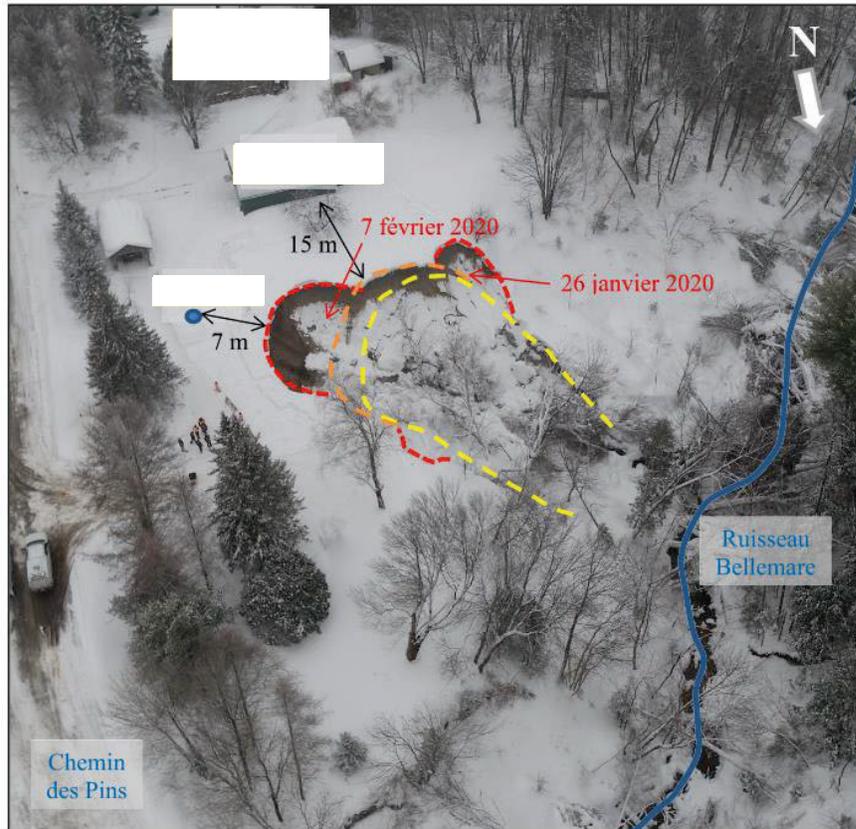


Figure 1 : Vue d'ensemble du phénomène de ravinement par suffosion prise par drone le 11 février 2020.

Légende

Trait jaune en pointillés :	approximation du pourtour du ravin en date du 2 décembre 2020.
Trait orange en pointillés :	progression graduelle du ravin entre 2 décembre 2019 et le 11 février 2020.
Traits rouges en pointillés :	pourtour des agrandissements soudains du ravin survenus entre le 2 décembre 2019 et le 11 février 2020.

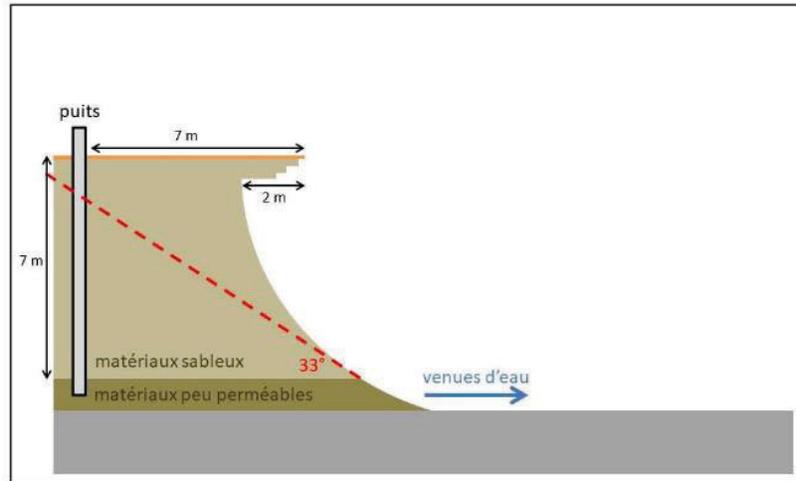


Figure 2 : Croquis approximatif de l'escarpement arrière du ravin de suffosion dans l'axe du puits d'approvisionnement en eau potable.



Direction de la géotechnique et de la géologie

PAR COURRIEL

Québec, le 12 mars 2020

Monsieur Claude Lebeux, analyste
Service du soutien aux opérations et au rétablissement
Direction du rétablissement
Ministère de la Sécurité publique
455, rue du Marais, bureau 100
Québec (Québec) G1M 3A2

OBJET : Avis technique
Évènement : Effondrements de terrain
Localisation : Chemins des Pins
Municipalité : Trois-Rivières
N/Dossier : MT.04.37067.18.01

Monsieur,

Cet avis technique préliminaire répond à une demande d'expertise envoyée par le Centre des opérations gouvernementales de votre ministère, le 2 mai 2019, concernant des effondrements qui ont été observés à plusieurs endroits aux abords du chemin des Pins, dans le secteur du ruisseau Bellemare (figure 1). Les lieux ont été inspectés le 3 mai 2019 par l'ingénieure Catherine Thibault et le soussigné, en compagnie de Mme Catherine Chamberland, conseillère en sécurité civile de votre ministère pour la région. Deux représentants de la ville étaient également présents lors de la visite de terrain, soit la technicienne en environnement Mme Marie-Pascale Munger et l'ingénieur Maxime Boisvert.

Plusieurs autres visites des lieux ont été effectuées en mai, juillet, août, novembre et décembre 2019, ainsi qu'en février et mars 2020, par plusieurs ingénieurs de la DGG, incluant le soussigné. Monsieur Jean Côté, professeur en génie civil à l'université Laval, a également été consulté à quelques reprises pour la compréhension du phénomène. Enfin, M. Michel Lamothe, professeur en géomorphologie à l'Université du Québec à Montréal, a été rencontré lors d'une des visites de terrain en août dernier.

Section des mouvements de terrain
2700, rue Einstein, Bloc F
Québec (Québec) G1P 3W8

1

Le mandat confié à la Direction de la géotechnique et de la géologie (DGG) par le ministère de la Sécurité publique consiste à évaluer si la route municipale et ses éléments constitutifs ont été touchés par le mouvement de terrain, à donner un avis technique sur la situation et à recommander, le cas échéant, les mesures à prendre afin d'assurer la sécurité des lieux à court terme.

Cet avis constitue une évaluation géotechnique de la situation, laquelle est basée sur les données et les informations recueillies sur le terrain, sur l'information d'archives (sondages, forages, levés par lidar, photographies aériennes, rapports géologiques ou géotechniques, dossiers de glissements de terrain à proximité, etc.) ainsi que sur l'expertise de la DGG dans le domaine des mouvements de terrain. La collaboration de professeurs spécialisés dans des domaines connexes a également été utile pour l'analyse et la compréhension du phénomène. Aucun calcul du coefficient de sécurité du talus n'a été réalisé dans le cadre du présent mandat.

Le présent avis complète le courriel de retour de visite et l'avis technique préliminaire qui vous ont été envoyés le 3 mai et le 4 juin 2019. Il comprend une description des lieux et des observations de terrain, une évaluation de la situation et des recommandations. Les figures mentionnées dans le texte sont présentées à la fin du document. Il est à noter que les distances mentionnées dans le présent avis ont été relevées sur le terrain à l'aide d'un ruban à mesurer ou d'un télémètre, et que les hauteurs et les inclinaisons des pentes ont été obtenues à l'aide d'un clinomètre de poche. Certaines mesures peuvent néanmoins avoir été obtenues ou validées à l'aide d'un modèle numérique de terrain réalisé à partir des relevés lidar qui ont été effectués dans la région en 2011 et en 2019.

Description générale des lieux

Le ruisseau Bellemare est un affluent de la rivière Saint-Maurice qui prend sa source environ 2,5 kilomètres en amont de son embouchure, dans les terres boisées au nord-est du chemin des Pins. Sur la majeure partie de cette longueur, en amont du chemin des Pins, sa linéarité indique qu'il résulte du creusement d'un canal artificiel, probablement pour le drainage des terres. Ce tracé rectiligne est déjà bien visible sur des photographies aériennes de 1948. À partir de son extrémité amont au niveau de la rue des Marguerites (figure 1), le cours d'eau a une profondeur d'environ 2 mètres sur une distance de 2 kilomètres. Il se creuse ensuite rapidement, à compter d'environ 100 mètres en amont du ponceau du chemin des Pins, mais particulièrement à partir de sa sortie du ponceau du chemin des Pins jusqu'à son embouchure. Sur ce segment d'environ 300 mètres, le cours d'eau présente une dénivellée d'environ 22 mètres. Dans le secteur du chemin des Pins, les berges du cours d'eau ont une hauteur de 10 à 15 mètres juste en aval du ponceau, mais seulement 8 mètres environ en aval.

D'un point de vue géomorphologique, le secteur à l'étude est situé au sein d'un ancien delta associé à la rivière Saint-Maurice. Les sols qui y sont rencontrés en surface sont donc des dépôts deltaïques sableux. L'analyse des données de topographie obtenues à partir du lidar permet de constater la présence de nombreux chenaux de rivière abandonnés associés à ce delta (figure 2). Le chemin des Pins, qui longe la rivière Saint-Maurice sur la rive *est*, traverse quelques-uns de ces anciens chenaux.

La stratigraphie des sols dans le secteur est complexe et a fait l'objet de plusieurs études géomorphologiques exhaustives¹. Les études disponibles, combinées aux observations de terrains et aux données de forages réalisés dans la région, permettent d'établir la séquence typique qui forme les berges du ruisseau Bellemare (figure 3). Celle-ci a d'ailleurs pu être observée sur le terrain lors la visite réalisée avec le professeur Michel Lamothe, qui a une excellente connaissance de la stratigraphie locale. Sous les dépôts sableux deltaïques en surface, des sols plus fins sont observés de façon discontinue sur des épaisseurs généralement très faibles : une couche d'argile marine de la mer de Champlain et un till de granulométrie variable. Sur la rive droite du ruisseau Bellemare, ces unités n'ont toutefois pas été observées, de sorte que le sable deltaïque repose directement sur une autre unité de sable, beaucoup plus dense et d'origine préglaciaire.

Étant donné la prédominance de sols sableux, les glissements de terrain qui surviennent le plus fréquemment sur les berges du ruisseau Bellemare et de la rivière Saint-Maurice sont ceux de nature superficielle (figure 4). Cependant, l'analyse du modèle numérique de terrain révèle la présence de plusieurs cicatrices de mouvements de terrain de plus grandes dimensions dans la région. Celles-ci présentent la plupart du temps une forme « perchée » dans la partie supérieure du talus, avec des distances de recul qui peuvent parfois atteindre plusieurs dizaines de mètres en sommet de talus (figure 5). Ces évènements dans la forme des cicatrices en sommet de talus seraient survenus essentiellement dans des sols sableux.

Par ailleurs, le contexte stratigraphique du secteur à l'étude est propice au phénomène de suffosion et à l'apparition de dolines. Lorsqu'une unité de sol perméable comme le sable repose sur des sols beaucoup moins perméables, comme l'argile, l'eau souterraine peut difficilement pénétrer dans l'argile et circule donc dans les sols immédiatement au-dessus du contact stratigraphique. Si ce contact affleure dans une pente, l'eau ressurgit à la surface, formant une

¹Serge Occhietti, *Le quaternaire de la région de Trois-Rivières-Shawinigan, Québec. Contribution à la paléogéographie de la vallée moyenne du Saint-Laurent et corrélations stratigraphiques*, Université du Québec à Montréal, Paléo-Québec, 1980.

venue d'eau qui peut emporter des particules de sol et ainsi créer du ravinement et des cavités dans le flanc des talus. Ainsi, les cavités qui se forment sont appelées « renards », tandis que le phénomène qui mène à leur formation est appelé « suffosion ». Si le phénomène se poursuit, les cavités peuvent ensuite progresser vers l'intérieur du massif sableux et provoquer l'apparition de dolines, qui correspondent à l'effondrement du toit d'une cavité, lorsque ce dernier est trop mince.

Historique de la situation

Une première demande d'expertise a été transmise à la DGG en 2018, alors que la ville de Trois-Rivières avait signalé l'apparition d'effondrements sur le chemin des Pins, au-dessus du ponceau du ruisseau Bellemare (figure 6). Lors de la visite de terrain, plusieurs dolines plus ou moins récentes avaient été soumises à l'attention de la DGG. Ces dolines, localisées dans le terrain naturel sur la rive droite du ruisseau Bellemare, à près de 40 mètres en aval du chemin des Pins, étaient trop éloignées de ce dernier pour avoir un lien avec les désordres au niveau de la route. De plus, des déformations majeures observées sur le ponceau du ruisseau Bellemare (figures 8 et 9) laissaient plutôt présager que les désordres sur la route étaient liés au mauvais état du ponceau et que celui-ci devait être remplacé afin de corriger la situation. Des travaux ont ainsi été réalisés par la ville à l'été dernier pour remplacer le ponceau et reconstruire le remblai de la route. Au printemps 2019, de nouvelles déformations ont été observées aux abords de la route. Plusieurs dolines de plusieurs mètres de diamètre et atteignant 2 mètres de profondeur ont été observées à de nombreux endroits sur le site. Quelques-unes d'entre elles se trouvaient dans les pentes de remblai des deux côtés de la route (figure 10). Un autre effondrement de près de 4 mètres de diamètre s'est produit sur la chaussée sur la voie en direction nord du chemin des Pins (figure 11). Enfin, plusieurs autres effondrements sont survenus dans les sols naturels, à l'extérieur du remblai de la route, au cours de l'année 2019.

Dans l'avis technique transmis en juin 2019, il était indiqué que l'analyse préliminaire de la situation permettait de déterminer que les effondrements récents étaient d'origine naturelle et qu'ils n'étaient pas ultimement liés à un vice au niveau du ponceau. L'avis mentionnait également que des investigations supplémentaires étaient nécessaires afin d'identifier correctement la problématique et l'origine exacte des déformations et ainsi fournir les recommandations appropriées pour la sécurisation de la route. Il a été recommandé de maintenir le chemin des Pins fermé jusqu'à ce que la situation soit analysée plus en détail par la DGG.

Observations de terrain et investigations complémentaires

Un levé lidar aéroporté a été réalisé au printemps 2019 afin de pouvoir localiser avec précision les dolines observées lors des visites de terrain et d'en détecter possiblement de nouvelles. À cette fin, le territoire couvert par le levé a été déterminé de façon à inclure le ruisseau Bellemare jusqu'à la rivière Saint-Maurice ainsi qu'un autre ravin de taille légèrement inférieure localisé environ 200 mètres au nord-ouest. Le levé a été réalisé avec une résolution suffisamment élevée pour permettre d'identifier des effondrements de petites dimensions. Il a permis d'en localiser une cinquantaine environ en bordure des deux cours d'eau. Les dolines sont généralement regroupées par grappes ou localisées selon un alignement particulier. La grande majorité est située à une distance inférieure à 30 mètres des sommets de talus (figure 12), avec une plus forte concentration à l'intérieur d'une bande de 15 mètres du sommet. Certaines dolines, cependant, sont isolées ou peuvent être situées à une distance plus importante des talus. L'une d'entre elles, notamment, est située approximativement à mi-chemin entre le ruisseau Bellemare et le ravin voisin, à environ 75 mètres du sommet de talus le plus près (figure 12).

L'examen des données lidar des environs a aussi permis de constater l'existence d'autres dolines similaires ailleurs le long de la rivière Saint-Maurice, dont certaines sont localisées jusqu'à des distances de près de 100 mètres des talus les plus près. La formation de cavités naturelles dans les dépôts de sable semble donc un phénomène courant dans ce secteur. Bien qu'on ne connaisse pas le moment où elles se sont formées, certaines datent d'au moins plusieurs années, car elles sont visibles sur les données lidar de 2011.

Un sondage au piézocône (28229) avait déjà été réalisé en 2013 en bordure du chemin des Pins (localisation, figure 13 et profil, figure 14). Afin de compléter les informations obtenues par ce sondage, une campagne d'investigation géotechnique a été réalisée au cours de l'automne 2019. D'abord, un forage et l'installation d'un nid de piézomètres (28299) ont été réalisés à proximité du sondage de 2013. Trois nouveaux sites ont également été retenus (28297, 28298 et 28300, figure 13) pour la réalisation de sondages au piézocône, de forages avec échantillons prélevés à la cuillère fendue et d'installations de nid de piézomètres afin de mieux caractériser les sites propices à la formation de dolines. Les sondages ont tous été réalisés en sommet de talus, à une distance de moins de 30 mètres de la berge du ruisseau Bellemare. Deux d'entre eux ont été réalisés sur la rive gauche, (28297 et 28300), et les deux autres sur la rive droite; l'un directement en bordure de la route (28299) et l'autre à une centaine de mètres en aval (28298).

Les sondages au piézocône mettent en évidence l'unité de sable deltaïque qui constitue les premiers mètres des dépôts de surface. Cette couche, lâche et très drainante, a été interceptée dans chacun des sondages. Elle est caractérisée par des valeurs de résistance à l'enfoncement, q_t , entre 5 000 et 10 000 kPa en moyenne. Son épaisseur est de 7 à 10 mètres dans les sondages 28297, 28298 et 28300 (figure 15), tandis qu'elle semble atteindre près de 15 mètres au niveau du sondage 28229/28299 réalisé en bordure du chemin des Pins (figure 14). Près de la base de cette unité, une mince couche d'argile semble être interceptée dans les piézocône 28229 et 28300. Lorsque le piézocône atteint la couche de sable préglaciaire, les valeurs de résistance augmentent de façon significative, jusqu'au refus à l'enfoncement et à l'arrêt de l'essai.

Les résultats des forages sont cohérents avec les profils de résistance obtenus avec le piézocône. En effet, les valeurs d'indice N sont inférieures à 10 dans l'unité de sable deltaïque en surface et augmente à plus de 50 lorsque la couche sous-jacente est atteinte. Dans les forages 28299 (réalisé à proximité du 28229) et 28300, une mince couche d'argile a été échantillonnée entre les deux unités sableuses.

Plusieurs visites de terrain ont été réalisées entre mai et décembre 2019. Les visites ont permis d'observer des venues d'eau significatives à plusieurs endroits dans les talus qui bordent le ruisseau Bellemare (figure 16). L'élévation où elles ont été observées correspond approximativement à celle de la base de la couche de sable lâche en surface. Certaines d'entre elles avaient un débit important, même en période d'étiage, et entraînaient des particules de sol. Ces résurgences d'eau souterraine ont d'ailleurs provoqué des renards par endroits dans les pentes (figure 17).

Évaluation de la situation

Les investigations réalisées par la DGG ont permis de déterminer que les effondrements sont associés à un phénomène de suffosion dans les sols sableux qui sont présents sur les berges du ruisseau Bellemare. Ces problèmes sont liés à la stratigraphie particulière de la région, qui permet la formation de venues d'eau dans les berges du ravin. En effet, les couches d'argile et de till, dont la granulométrie est très fine, possèdent une perméabilité très faible, qui contraste fortement avec le sable sus-jacent très perméable.

Tel qu'indiqué dans l'avis technique de juin 2019, d'autres dolines sont susceptibles de se développer à tout moment. En effet, le processus de suffosion à l'origine des effondrements peut se poursuivre et former des cavités souterraines qui ne sont pas visibles tant qu'elles n'atteignent pas la surface. Il

est fort probable que des cavités soient déjà présentes sous la surface et qu'elles puissent causer un effondrement à tout moment.

Les terrains qui sont susceptibles d'être affectés par de nouveaux effondrements sont ceux situés au sommet ou dans les pentes où le contact à la base de l'unité de sable deltaïque affleure. En effet, si le ravin ne s'est pas creusé sous cette élévation, il ne peut pas y avoir formation de renards et enclenchement du processus de suffosion. Cela explique l'absence de doline dans la partie amont du ruisseau Bellemare. D'autre part, à la lumière des données disponibles, la probabilité qu'une doline se forme semble décroître en fonction de la distance du sommet de talus, puisque le phénomène de suffosion se forme à partir de renards dans les pentes du ravin. Tel qu'indiqué précédemment, la plupart des dolines observées sur le relevé lidar se trouvent à moins de 30 mètres d'un sommet de talus.

Dans le même ordre d'idée, elles sont davantage susceptibles de se former à proximité d'une autre doline, puisque celle-ci indique la présence de cavités en formation. Leur distribution sur le relevé lidar semble d'ailleurs confirmer cette hypothèse.

Par ailleurs, le phénomène de suffosion peut se manifester autrement que par la formation de dolines. Si l'écoulement de l'eau souterraine est assez important, l'entraînement de particules peut être suffisant pour mener à la formation d'un nouveau ravin à partir du flanc d'un cours d'eau principal. Un tel ravin s'est développé rapidement en 3 phases à l'automne 2019 et à l'hiver 2020

Ces étapes de formation ont entraîné un recul total de la tête du ravin sur une distance d'environ 30 mètres, sur une profondeur d'environ 7 mètres et une largeur d'environ 15 mètres.

Conclusion et recommandations

L'analyse de la situation révèle donc que le Chemin des Pins est susceptible d'être affecté de façon naturelle par de nouveaux effondrements imprévisibles dans le futur. De plus, le ravin actuellement en cours de formation

pourrait éventuellement atteindre la route, qui n'était plus qu'à 8 mètres de distance lors de notre dernière visite des lieux le 5 mars dernier. Considérant la forte activité de suffosion dans ce secteur, il est possible que d'autres ravins, similaires à celui en cours de formation, se développent dans le futur et puissent affecter la route.

Afin de prévenir l'apparition de nouveaux problèmes sur le chemin des Pins liés à l'activité de suffosion, deux solutions semblent envisageables. La première option consisterait à déplacer la route à l'extérieur de la zone susceptible d'être

affectée par les effondrements et la formation de nouveaux ravins. Cette solution nécessite la construction d'un tronçon de route d'une longueur de plusieurs centaines de mètres et l'acquisition des terrains visés par le nouveau tracé. Un tracé préliminaire, qui ne tient notamment pas compte des critères géométriques de conception routière, est présenté à la figure 19 à titre indicatif. Il représente la construction d'un tronçon de route d'environ 600 mètres de longueur au minimum. Le nouveau tracé devrait traverser le cours d'eau plus en amont, là où la hauteur des pentes est plus faible, de l'ordre de 5 mètres. De plus, cette solution devrait comprendre l'enrochement du cours d'eau sur une certaine distance en aval du nouveau tracé (figure 19), afin d'éviter que le cours d'eau ne se creuse davantage et que de nouveaux problèmes n'apparaissent.

La deuxième solution consiste à abaisser le profil de la route de manière à ce que l'élévation de ce dernier soit située sous le niveau du contact stratigraphique problématique (figure 20), c'est-à-dire un rabaissement d'environ 15 mètres en considérant le profil du piézocône 28229 et les données du forage 28299. L'abaissement du profil sous ce niveau devrait minimalement être réalisé sur une bande de terrain d'une largeur de 30 mètres du sommet des talus de part et d'autre du ponceau du ruisseau Bellemare. Au-delà de cette zone, le profil devrait rejoindre progressivement le profil actuel selon une inclinaison appropriée pour le trafic routier. L'aménagement de fossés de drainage et de pentes de déblai stables de part et d'autre de la route serait nécessaire et nécessiterait l'acquisition de terrains en bordure de la route, particulièrement où le profil sera rabaisé à son niveau minimum. De plus, les pentes de déblais devraient probablement être recouvertes de tapis drainant afin de gérer les venues d'eau au niveau du contact stratigraphique problématique qui y affleurerait. Cette solution posséderait l'avantage de conserver le tracé actuel du chemin des Pins. Elle ne permet pas cependant de garantir que la route ne serait plus du tout exposée au danger d'effondrements. En effet, le concept permet de protéger la route sur une bande de 30 mètres de part et d'autre des rives du cours d'eau, ce qui correspond à la bande de terrain où la probabilité d'apparition d'effondrement est la plus élevée. Toutefois, de nouveaux effondrements pourraient en théorie se former au-delà de ces bandes de terrain puisque certains ont été observés jusqu'à une distance de 75 mètres des berges dans ce secteur.

Une alternative à ces solutions serait de fermer le chemin des Pins de part et d'autre du ruisseau Bellemare, à partir d'une distance minimale de 30 mètres du sommet du ravin, mais idéalement de 110 mètres, afin de tenir compte des plus grandes distances dans la région où des dolines ont été observées.

En attendant la mise en place d'une des solutions énumérées précédemment, nous recommandons de conserver le chemin des Pins fermé.

En espérant que le tout sera à votre convenance, nous demeurons à votre disposition pour toute information complémentaire ou pour tout soutien technique additionnel concernant ce dossier.

Thomas Fournier, ing.
N°OIQ : 5004394

- c. c. M. Josée Bilodeau, chef, Service du soutien aux opérations et au rétablissement, Direction du rétablissement, MSP
M^{me} Gilla Huet, Service du soutien aux opérations et au rétablissement, Direction du rétablissement, MSP
M Simon Lemay, chef d'équipe par intérim
Direction du rétablissement, MSP
M^{me} Janelle Potvin, directrice par intérim
Direction de la géotechnique et de la géologie, MTQ
M. Denis Demers, chef d'équipe, section des mouvements de terrain,
Direction de la géotechnique et de la géologie, MTQ

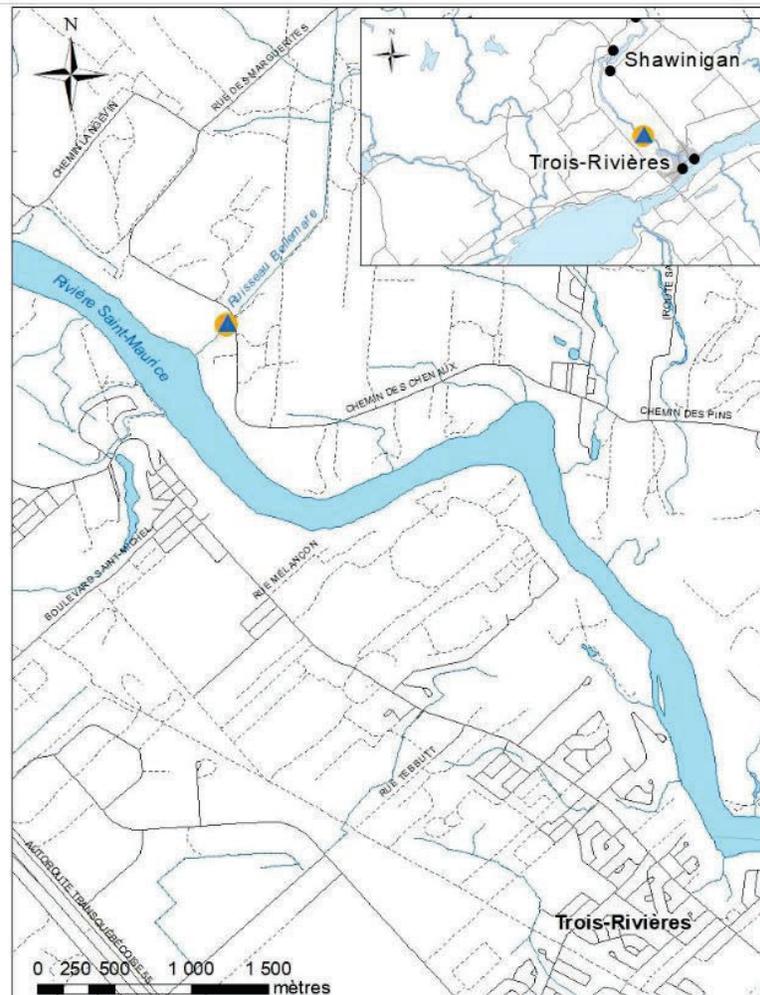


Figure 1: Localisation générale du site à l'étude.

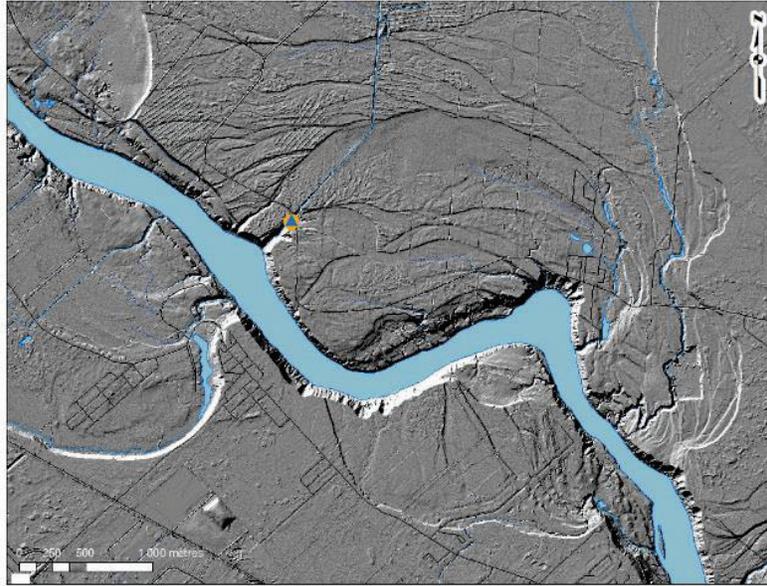


Figure 2 : Carte du secteur avec relief ombragé tiré du lidar réalisé en 2011 par la ville de Trois-Rivières mettant en évidence les anciens chenaux de la rivière Saint-Maurice.

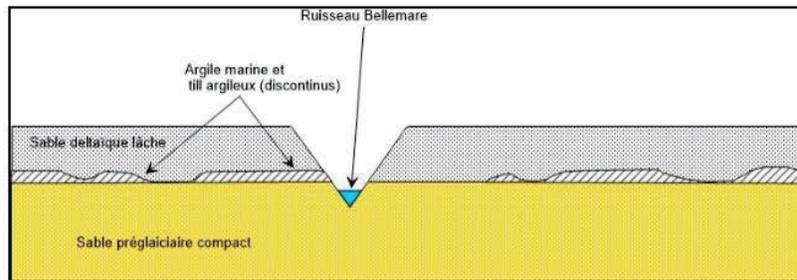


Figure 3: Stratigraphie des berges du ruisseau Bellemare dans le secteur du chemin des Pins



Figure 4: Glissement superficiel visible sur la rive droite du ruisseau Bellemare.

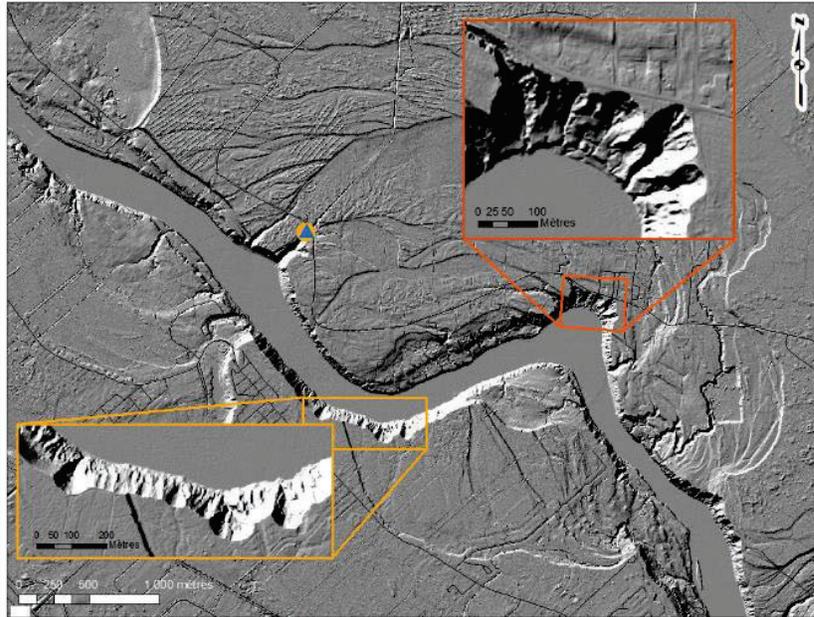


Figure 5 : Cicatrices de ravinement visibles dans la région.



Figure 6 : Effondrements survenus sur le chemin des Pins au-dessus du ponceau du ruisseau Bellemare en 2018.



Figure 7 : Doline observée en 2018 dans les sols naturels, en sommet de talus sur la rive droite du ruisseau Bellemare.



Figure 8 : Déformations majeures visibles à l'extrémité amont du ponceau du ruisseau Bellemare sous le chemin des Pins en 2018.



Figure 9 : Extrémité aval du ponceau du ruisseau Bellemare sous le chemin des Pins en 2018.



Figure 10: Effondrement observé dans la pente de remblai en bordure de la route en mai 2019.



Figure 11: Effondrement observé sur la chaussée de la route en mai 2019.

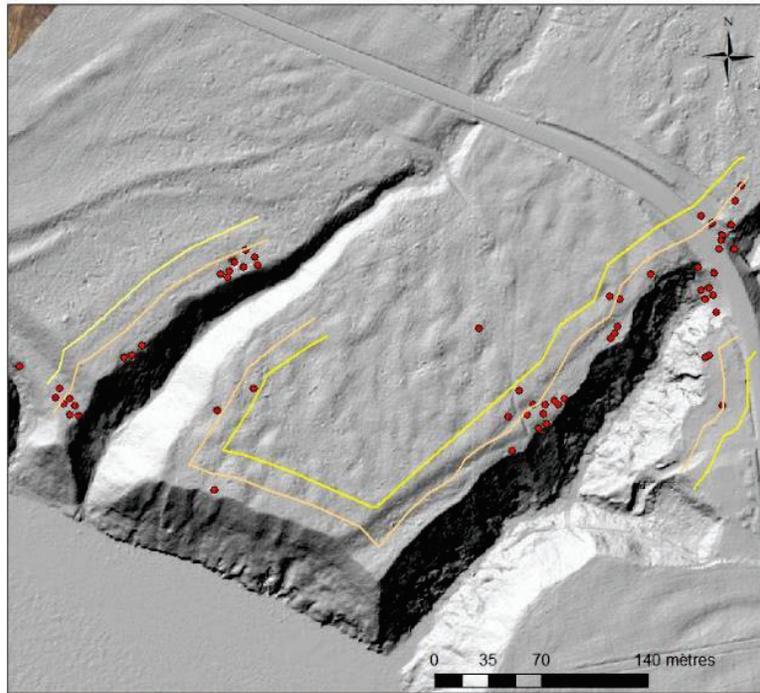


Figure 12 : Modèle numérique de terrain provenant du relevé lidar réalisé en 2011. Les dolines identifiées sont indiquées en rouge. Les traits orange et jaune sont tracés approximativement à 15 et 30 mètres du rebord des talus.



Figure 13 : Emplacement des sondages réalisés par la DGG au site à l'étude.

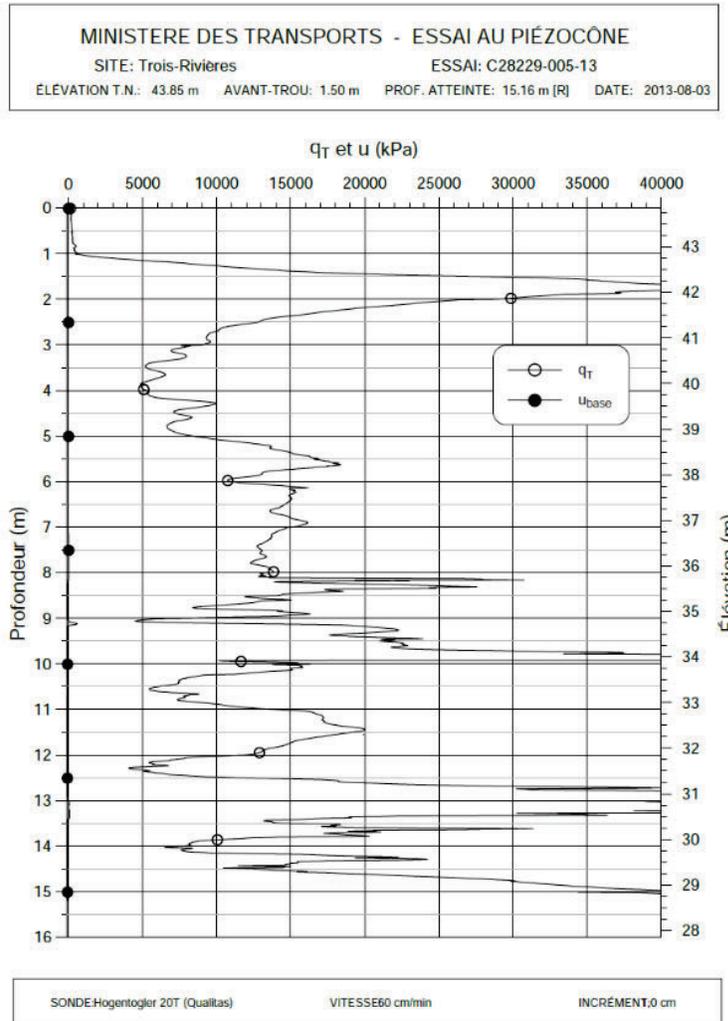
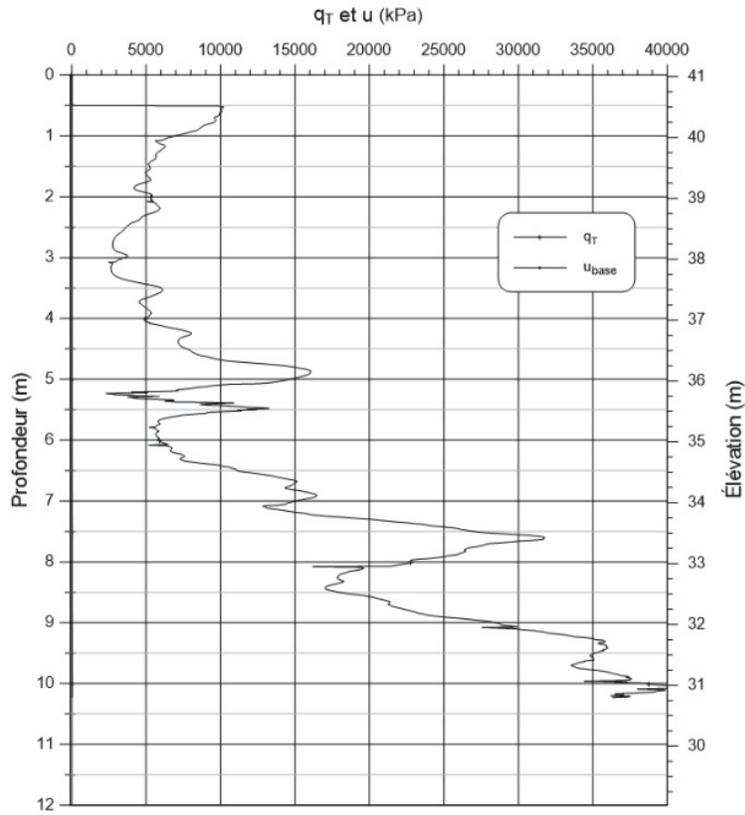


Figure 14 : Profil du sondage au piézocône C28229 réalisé en bordure de la route.

MINISTÈRE DES TRANSPORTS - ESSAI AU PIÉZOCÔNE
 SITE: Trois-Rivières ESSAI: C28297-19
 ÉLÉVATION T.N.: 41.028 m AVANT-TROU: 0.50 m PROF. ATTEINTE: 10.23 m [R] DATE: 2019-09-11 ?



SONDE: Hogentogler 20T (Qualitas) VITESSE: 60 cm/min INCREMENT: 1,0 cm

Figure 15 : Profil du sondage au piézocône C28297



Figure 16 : Venue d'eau observée dans la pente lors de la visite de terrain du 27 novembre 2019.



Figure 17: Renard en formation (rouge) observé au niveau d'une venue d'eau (flèche noire) dans un talus

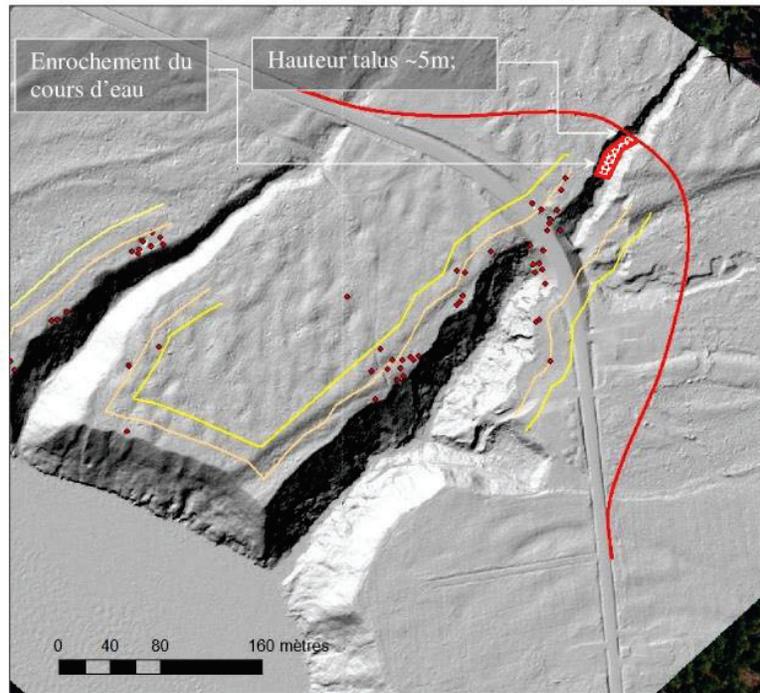


Figure 19: Exemple de tracé de contournement (rouge) de la zone exposée au danger d'effondrement. À titre indicatif seulement.

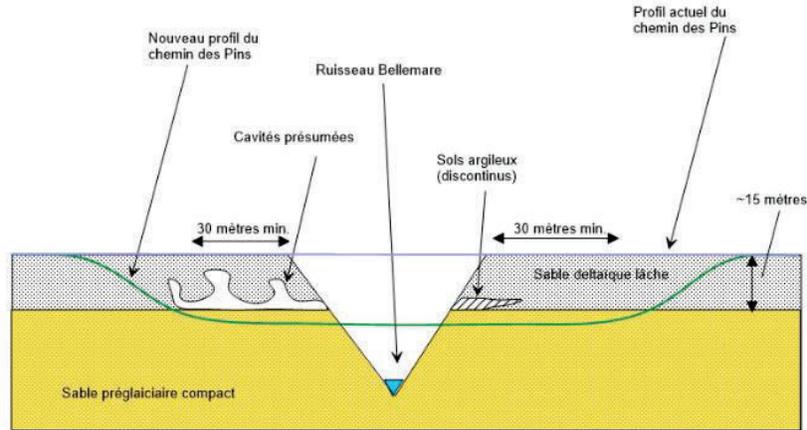


Figure 20: Schéma de la solution par rabaissement du profil de la route.