

**ANALYSE DE FAISABILITÉ ET DE RISQUES TECHNIQUES LIÉS
AUX VARIANTES SOUTERRAINES DU REM DE L'EST
AU CENTRE-VILLE DE MONTRÉAL**

VERSION FINALE



TABLE DES MATIÈRES

1. SOMMAIRE EXECUTIF	1
2. PREAMBULE	1
3. EXPERTISE DE GEOCONTROL	4
4. ANALYSE DE L'INFORMATION	5
4.1. CARACTÉRISTIQUES DES CORRIDORS ÉTUDIÉS.....	5
4.1.1. <i>Corridor René-Levesque</i>	5
4.1.2. <i>Corridor Saint-Antoine</i>	6
4.2. VOIES DU CANADIAN PACIFIC.....	7
4.3. MODÈLE NUMÉRIQUE DE LA ZONE À L'ÉTUDE.....	8
5. IDENTIFICATION ET EVALUATION DES CONTRAINTES DU SITE	11
5.1. CONDITIONS GÉOTECHNIQUES.....	11
5.2. LIGNES DE MÉTRO EXISTANTES.....	13
5.2.1. <i>Ligne Orange</i>	15
5.2.2. <i>Ligne Jaune</i>	16
5.3. ÉGOUTS ET AQUEDUCS.....	17
6. IDENTIFICATION ET ÉVALUATION DES ENJEUX TECHNIQUES	17
6.1. EXCAVATION.....	17
6.1.1. <i>Excavation dans les sols</i>	17
6.1.2. <i>Excavation dans la roche</i>	18
6.1.3. <i>Conclusions par rapport à l'excavabilité des schistes calcaires de Montréal</i>	18
6.2. PRÉSENCE DE LA NAPPE PHRÉATIQUE.....	18
6.3. CONSTRUCTION DES STATIONS.....	20
6.4. CONSTRUCTION DES TUNNELS.....	21
6.5. CROISEMENT AVEC DES INFRASTRUCTURES EXISTANTES.....	24
7. ALTERNATIVES ETUDIÉES	24
7.1. ALTERNATIVES SOUS LE BOULEVARD RENÉ-LÉVESQUE.....	24
7.1.1. <i>Solutions pour croiser les lignes de métro</i>	24
7.1.1.1. Croisement entre les lignes de métro.....	25
7.1.1.2. Croisement en-dessous de la ligne Jaune.....	31
7.1.2. <i>Solutions pour placer la transition aérienne-souterraine</i>	32
7.1.2.1. Transition à l'ouest du Pont Jacques-Cartier.....	32
7.1.2.2. Transition à l'est du Pont Jacques-Cartier.....	34
7.1.2.3. Transition à l'est des voies de Canadian Pacific.....	34
7.1.2.4. Transition à l'ouest des lignes de métro.....	34
7.1.3. <i>Alternatives possibles sous le boulevard René-Levesque</i>	38
7.2. ALTERNATIVE SOUS LA RUE SAINT-ANTOINE.....	42
7.3. FACTEURS DE RISQUE PLUS SIGNIFICATIFS.....	45
7.4. ÉVALUATION QUALITATIVE DES FACTEURS DE RISQUE LIÉS AUX ALTERNATIVES POSSIBLES.....	46
7.4.1. <i>Croisement entre les lignes de métro et transition à l'est des voies du CP</i>	46
7.4.2. <i>Croisement en-dessous de la ligne Jaune et transition à l'est des voies du Canadian Pacific</i> 48	
7.4.3. <i>Transition à l'ouest des lignes de métro</i>	50
7.4.4. <i>Alternative recommandée</i>	50
8. ANALYSE DE L'ALTERNATIVE RECOMMANDÉE	52
8.1. TYPOLOGIE DE LA GARE ROBERT-BOURASSA.....	52
8.2. CONSTRUCTION DE LA GARE ROBERT-BOURASSA.....	52
8.3. LIAISON GARE ROBERT-BOURASSA-RÉSEAU SOUTERRAIN DE MONTRÉAL.....	54
8.4. TRANSITION AÉRIENNE-SOUTERRAINE.....	55
8.5. ORGANISATION PRÉLIMINAIRE DE LA CONSTRUCTION ET ÉCHANCHIER PRÉALABLE.....	55
9. CONCLUSIONS	56
10. BIBLIOGRAPHIE	57

ANALYSE DE FAISABILITÉ ET DE RISQUES TECHNIQUES LIÉS AUX VARIANTES SOUTERRAINES DU REM DE L'EST AU CENTRE-VILLE DE MONTRÉAL

1. SOMMAIRE EXECUTIF

Ce rapport technique comprend les résultats de l'analyse comparative de quatre alternatives conceptuelles pour l'intégration du REM de l'Est au centre-ville de Montréal, soit trois alternatives avec un tracé en-dessous du boulevard René-Levesque et une sous la rue Saint-Antoine. Cette analyse a été réalisée par Geocontrol, une firme de génie-conseil indépendante avec experts internationaux en ouvrages souterrains.

La structure du rapport est construite comme suit :

- Après les sections introductives, les sections 3, 4 et 5 présentent les contraintes et enjeux techniques présents dans la zone d'étude.
- La section 6 présente les alternatives évaluées et l'évaluation qualitative de chacune, en fonction des principaux facteurs de risques documentés aux sections précédentes, soit les caractéristiques du terrain excavé, la présence d'eau, les conflits avec les infrastructures existantes et le croisement avec des voies ferrées ou lignes de métro.
- La section 7 détaille la solution recommandée.

Ainsi, au terme de cette analyse, la solution sous le corridor Saint-Antoine est considérée comme non recommandable en raison de sa difficulté constructive élevée ainsi que la perte d'achalandage en comparaison aux alternatives sous le boulevard René-Levesque.

La solution recommandée est celle sur René-Lévesque avec une transition aérienne-souterraine à l'ouest des lignes de métro orange et jaune. Cette solution permet l'arrivée souterraine du REM de l'Est dans une portion du centre-ville de Montréal, dans le secteur de la gare terminale Robert-Bourassa, sans les contraintes et risques importants liés aux autres variantes analysées. Ces variantes comportaient respectivement un passage entre les lignes Orange et Jaune du métro ainsi que sous la ligne jaune du métro, avec une zone de transition à l'est des voies du Canadian Pacific.

2. PREAMBULE

Sur la base des grandes orientations soumises par le gouvernement du Québec, CDPQ Infra a initié en mai 2019 l'étude d'un système de transport collectif électrique pour relier l'est de Montréal et le secteur du Cégep Marie-Victorin au centre-ville de Montréal.

La solution développée par CDPQ Infra consiste à construire un nouveau réseau de métro léger automatisé dans l'est et le nord-est de Montréal, dit le Réseau express métropolitain (REM) de l'Est. Ce nouveau réseau compte 32 km et se déploie sur deux antennes et un tronçon commun, comme présenté dans la **Figure 2.a**.



Figure 2.a.- Carte du projet REM de l'Est (Source: CDPQ Infra).

La solution retenue par CDPQ Infra pour insérer le REM au centre-ville de Montréal est constituée d'une structure aérienne placée au centre du boulevard René-Levesque et le long du boulevard Notre-Dame-Est. Bien que cette solution présente plusieurs avantages techniques, elle doit résoudre le défi d'une intégration urbaine et architecturale réussie.

Geocontrol SA, une firme experte en ouvrages souterrains, a été mandatée par CDPQ Infra pour la réalisation d'une analyse technique et des risques associés aux variantes de tracé souterrains au centre-ville de Montréal dans deux corridors, soit le boulevard René-Levesque et la rue Saint-Antoine.

La **Figure 2.b** présente l'emplacement des deux corridors à étudier.

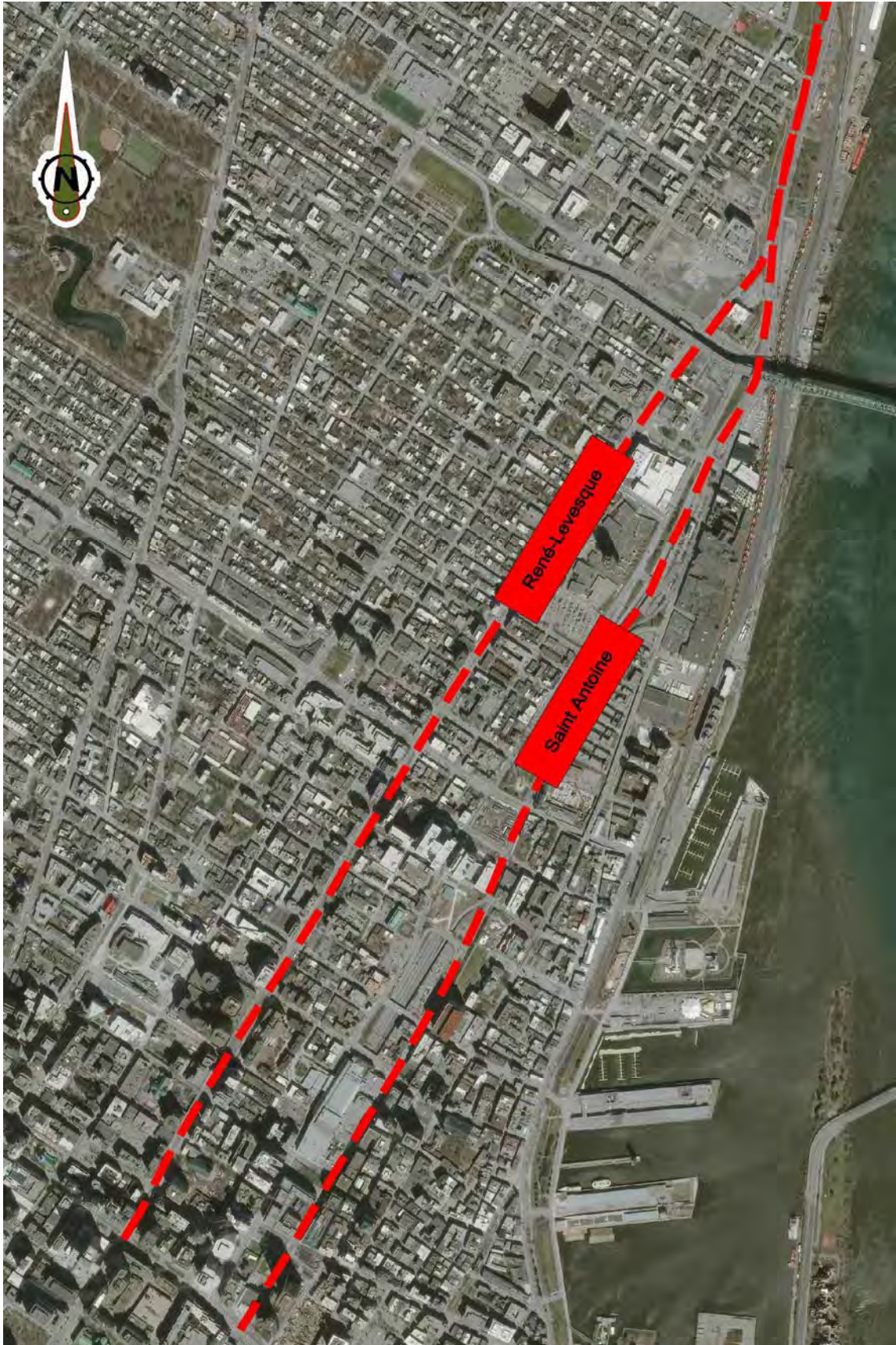


Figure 2.b.- Corridors envisagés pour le REM de l'Est (Source: Geocontrol).

3. EXPERTISE DE GEOCONTROL

Geocontrol est une firme de génie-conseil indépendante qui fournit des solutions techniques innovantes dans le domaine des ouvrages souterrains (tunnels, puits et cavernes).

Depuis 1982, Geocontrol a participé à plus de 600 projets pour la conception d'environ 1600 km de tunnels de tout genre (routiers, métro, ferroviaires et autres). De plus, Geocontrol a supervisé la construction ou réfection de presque 900 km de tunnels.

Entre 2011 et 2012, Geocontrol a participé activement au projet de construction des gares et tunnels de la Ligne 6 du Métro de Santiago du Chili, en partenariat avec l'entreprise chilienne Zañartu. Cette ligne a une longueur de 15,5 km et a été inaugurée en 2017.

Parmi les derniers projets réalisés par Geocontrol, on peut mentionner les projets suivants :

- ◆ Ouvrages civils de la Ligne 2 du Métro de Lima (Pérou), en partenariat avec TEC-4 EUROESTUDIOS avec une longueur de 22,4 km.
- ◆ Projet de la Ligne 7 du Métro de Santiago du Chili, avec une longueur de 27,5 km, avec l'entreprise WSP.
- ◆ Projet d'exécution de la Section A de la Ligne 7, avec longueur de 8,5 km et excavé avec un tunnelier à bouclier EPB.

En résumé, il est à noter que **Geocontrol a complété la conception préliminaire de 49,9 km de lignes de métro et la conception détaillée de 24 km au cours des dernières années.**

La **Photographie 3.a** présente une vue de la Ligne 6 du Metro de Santiago de Chili, la journée de son inauguration.



Photographie 3.a.- Ligne 6 du Metro de Santiago de Chili.

M. Jorge Picón Couselo, ingénieur civil de plus de 18 ans d'expérience et membre de l'Ordre des Ingénieurs du Québec (OIQ), a coordonné la rédaction de ce rapport technique avec l'aide de ses collaborateurs clés:

- ◆ **Benjamín Celada Tamames**, Dr. ingénieur de mines, avec 51 ans d'expérience, à titre d'expert dans la conception des ouvrages souterrains.
- ◆ **Pablo Cortacans Muner**, ingénieur civil, avec 29 ans d'expérience, à titre d'expert en projets de métro.
- ◆ **Javier Puente Bushell**, géologue, avec 26 ans d'expérience, à titre d'expert en géologie et géotechnique.

4. ANALYSE DE L'INFORMATION

4.1. CARACTÉRISTIQUES DES CORRIDORS ÉTUDIÉS

L'insertion du REM de l'Est au centre-ville de Montréal doit assurer l'arrivée des usagers au cœur du secteur d'activité économique de la ville, ce qui permettra un achalandage quotidien élevé de la future infrastructure. Deux corridors pour insérer l'infrastructure au centre-ville ont été identifiés par CDPQ Infra pour cette analyse, soit le corridor sur l'axe du boulevard René-Levesque et celui sur la rue Saint-Antoine.

4.1.1. Corridor René-Levesque

Le boulevard René-Levesque représente la principale voie d'accès au quartier financier et d'affaires de Montréal. En effet, les principaux bâtiments de bureaux se trouvent tout au long de ce boulevard, comme le Complexe Ville-Marie, le Complexe Desjardins, le Complexe Guy-Favreau et le siège social d'Hydro-Québec. De nombreux bureaux gouvernementaux ont choisi aussi ce boulevard (Revenu Canada, le complexe Guy-Favreau (Service Canada)), ainsi que plusieurs hôtels (Courtyard Marriot, AC Montréal). Il faut aussi mentionner que le nouveau méga-complexe hospitalier du CHUM se situe aussi le long de cette avenue.

Également, le corridor traverse le secteur des Faubourgs, qui fait l'objet d'une importante démarche de planification urbaine. L'ancien site de Radio Canada, ainsi que celui de la brasserie Molson plus au sud, seront transformés pour accueillir un nouveau quartier résidentiel, conformément au Programme Particulier d'Urbanisme (PPU) adopté par la Ville de Montréal.

Compte tenu des importants générateurs de déplacements ci-haut mentionnés et du fait que le boulevard se localise entre les lignes verte et orange de métro, les études d'achalandage de CDPQ Infra ont démontré que le boulevard René-Levesque est le corridor privilégié pour insérer le REM de l'Est au centre-ville de Montréal.

Du point de vue physique, ce corridor possède les caractéristiques suivantes:

- ◆ Nombre de voies de circulation: 3+3 ou 4+4. Places de stationnement disponibles.

- ◆ Largeur moyenne du terre-plein central: 1-2,5 m.
- ◆ Largeur totale de chaussée: 25-31 m.
- ◆ Largeur totale (inclut les trottoirs): 38-45 m.
- ◆ Longueur (de Robert Bourassa à Notre-Dame-Est) : 3,1km approx.

4.1.2. Corridor Saint-Antoine

Le corridor Saint-Antoine est moins intéressant que le corridor René-Levesque du point de vue de l'achalandage; mais il offre l'avantage de simplifier le croisement avec les lignes de métro, car seule la ligne jaune traverse ce corridor.

La rue Saint-Antoine se situe juste au sud de l'autoroute Ville-Marie, une infrastructure routière partiellement souterraine qui représente une frontière entre le Vieux-Montréal et le centre-ville financier.

Bien que ce corridor possède moins de générateurs de déplacements que René-Lévesque, il faut remarquer aussi que des centres d'affaires et des organismes gouvernementaux se trouvent le long de cette rue ou assez proches, tels que:

- ◆ Le Palais de Congrès de Montréal.
- ◆ La Tour de la Bourse et autres bâtiments de bureaux autour de la Place Victoria.
- ◆ La Cour Supérieure de Justice.
- ◆ Le Centre de Recherche du CHUM.
- ◆ L'édifice de la Caisse de Dépôt et placement du Québec.

En raison de la nature de son emplacement et du fait que la ligne orange de métro se trouve juste de l'autre côté de l'autoroute Ville-Marie, l'achalandage attendu pour le tracé du REM de l'Est à travers de ce corridor est inférieur à celui du corridor René-Levesque.

Le corridor de la rue Saint-Antoine possède les caractéristiques suivantes:

- ◆ Nombre de voies de circulation: 2 à 3 (sens unique, généralement). Places de stationnement et piste cyclable disponibles.
- ◆ Largeur totale de chaussée: 14-15 m. généralement. (min. 8 m).
- ◆ Largeur totale (inclue les trottoirs): 17-24 m généralement. (min. 12 m.).
- ◆ Longueur (de R. Bourassa à la rampe d'accès de l'autoroute Ville-Marie): 2,1 km approx.

Ce corridor est plus étroit que le boulevard René-Lévesque.

4.2. VOIES DU CANADIAN PACIFIC

Les deux corridors envisagés confluent à l'est du pont Jacques-Cartier, en occupant la bande verte du côté nord de la rue Notre-Dame Est. Le corridor unifié traverse un des accès ferroviaires principaux du Port de Montréal. Le Canadian Pacific (CP) est le propriétaire et gestionnaire de ces voies ferrées. Le croisement entre le corridor du REM de l'Est et cet accès ferroviaire se trouve juste à l'ouest du terminal 3 du Port de Montréal. Il faut traverser 3 voies ferrées, sur une distance d'environ 50 m, avec un angle d'environ 30 degrés; tel que montré sur la **Photographie 4.2.a.**

Cet accès ferroviaire est une infrastructure critique pour le Port et le CP, c'est pourquoi la continuité et la sécurité du trafic ferroviaire devront être garanties pendant la construction du REM de l'Est. Un des enjeux propres à une insertion souterraine dans ce secteur est le contrôle très serré des affaissements pendant les travaux, avec des tolérances minimales et un niveau de risque plus élevé pour l'excavation dans le sol.

La conception de l'ouvrage souterrain sous les voies du CP devra tenir compte de ces limitations. Il faudra concevoir les ouvrages en prévoyant l'utilisation de mesures préventives, telles qu'une voute parapluie lourde, et la mise en place de la surveillance nécessaire pour s'assurer que le risque pendant la construction est modéré. Il faut aussi tenir compte que ces mesures auront un impact sur le coût et l'échéancier du projet.



Photographie 4.2.a.- Voies du Canadian Pacific à traverser par le REM de l'Est.

4.3. MODÈLE NUMÉRIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

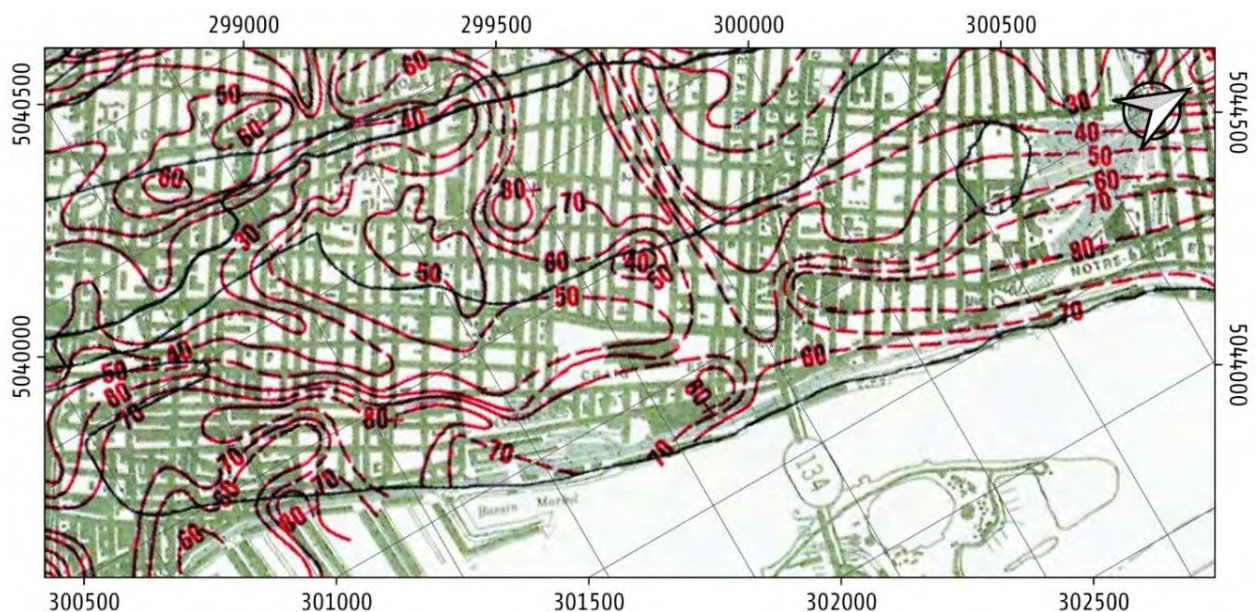
Dans le but d'organiser toute l'information liée à la zone d'étude, Geocontrol a créé un modèle numérique tridimensionnel avec les données suivantes:

- ◆ Surface du terrain naturel.
- ◆ Surface de contact sol-roche.
- ◆ Lignes de métro existantes.
- ◆ Infrastructures municipales (aqueducs et égouts).

L'information disponible a été intégrée dans le logiciel QGIS et par la suite traitée dans le logiciel Leapfrog pour obtenir le modèle 3D définitif du terrain.

Ensuite, l'information de ce modèle numérique 3D a été exportée au logiciel CIVIL3D afin de faciliter l'accès via AUTODESK.

L'information liée à la surface de contact sol-roche a été obtenue à partir de la carte «*Courbes de l'épaisseur des dépôts*» (CGC, 1975), montrée à la **Figure 4.3.a**.



**Figure 4.3.a.- Courbes de l'épaisseur des dépôts meubles (en pieds).
Commission Géologique du Canada, 1975.**

Finalement, la surface a été ajustée de façon plus précise en utilisant l'information géotechnique incluse dans les dessins «Tel-Que-Construits» (TQCs) du pont Jacques Cartier (1930), les fondations de la Gare Centrale (Canadian National Railways, 1939) et les dessins des lignes de métro Jaune et Orange construites dans les années 60. La **Figure 4.3.b** présente l'emplacement des forages utilisés par rapport aux corridors étudiés.

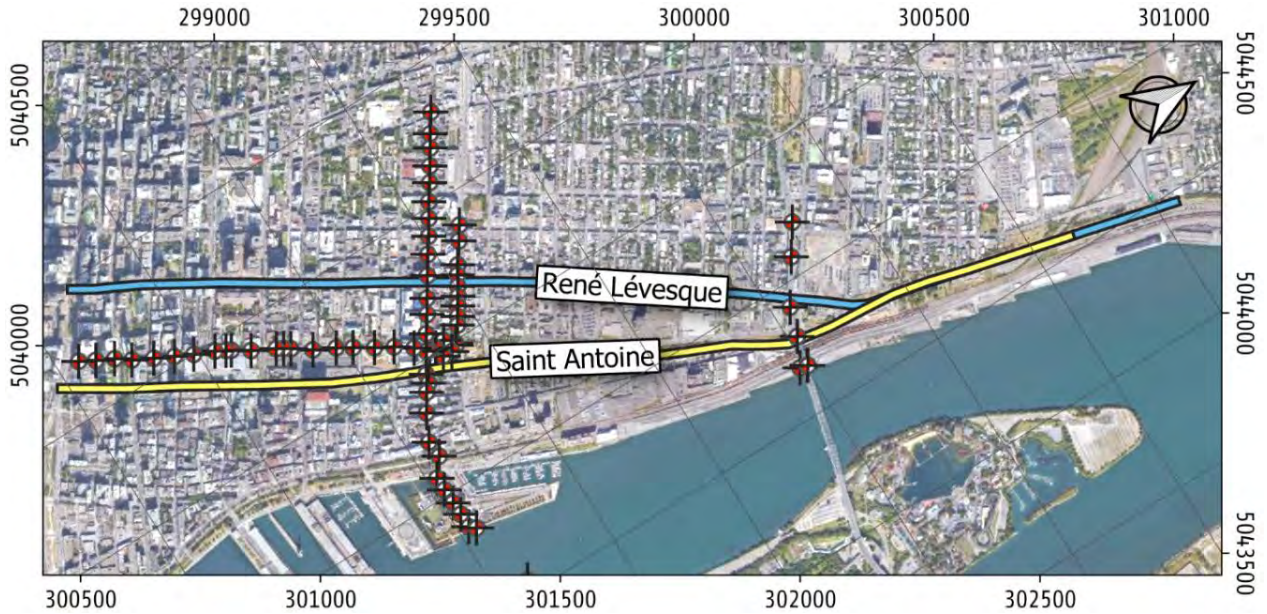


Figure 4.3.b.- Vue en plan des forages géotechniques utilisés.
Source : Geocontrol.

Geocontrol a aussi intégré dans le modèle 3D les deux lignes existantes de métro dans la zone d'étude. La vue en plan du tracé de chaque ligne est montrée dans la **Figure 4.3.c.**

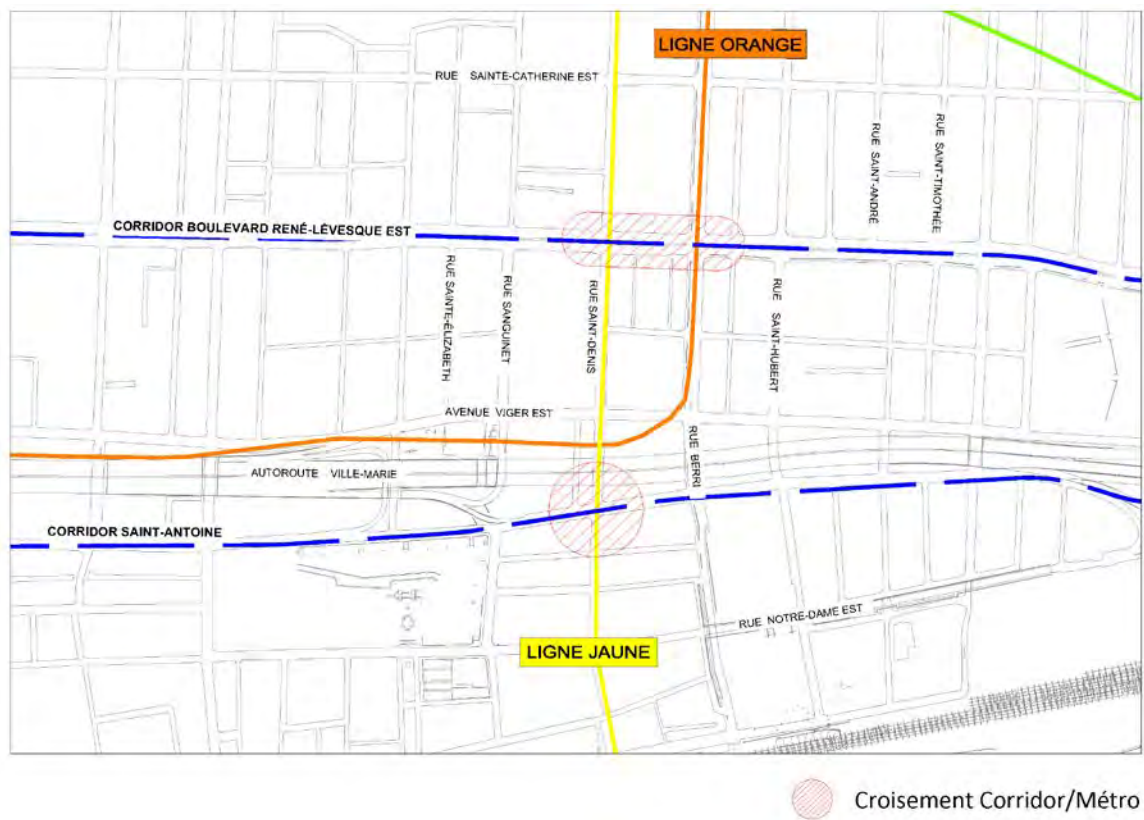


Figure 4.3.c.- Lignes de métro dans la zone d'intérêt
Source: Geocontrol.

Ci-dessous, la **Figure 4.3.d** montre l'emplacement des aqueducs et égouts principaux à l'est du pont Jacques-Cartier. Il y a plusieurs réseaux très anciens et de très grandes dimensions. Toute l'information liée à ces conduites est incluse dans le modèle 3D.

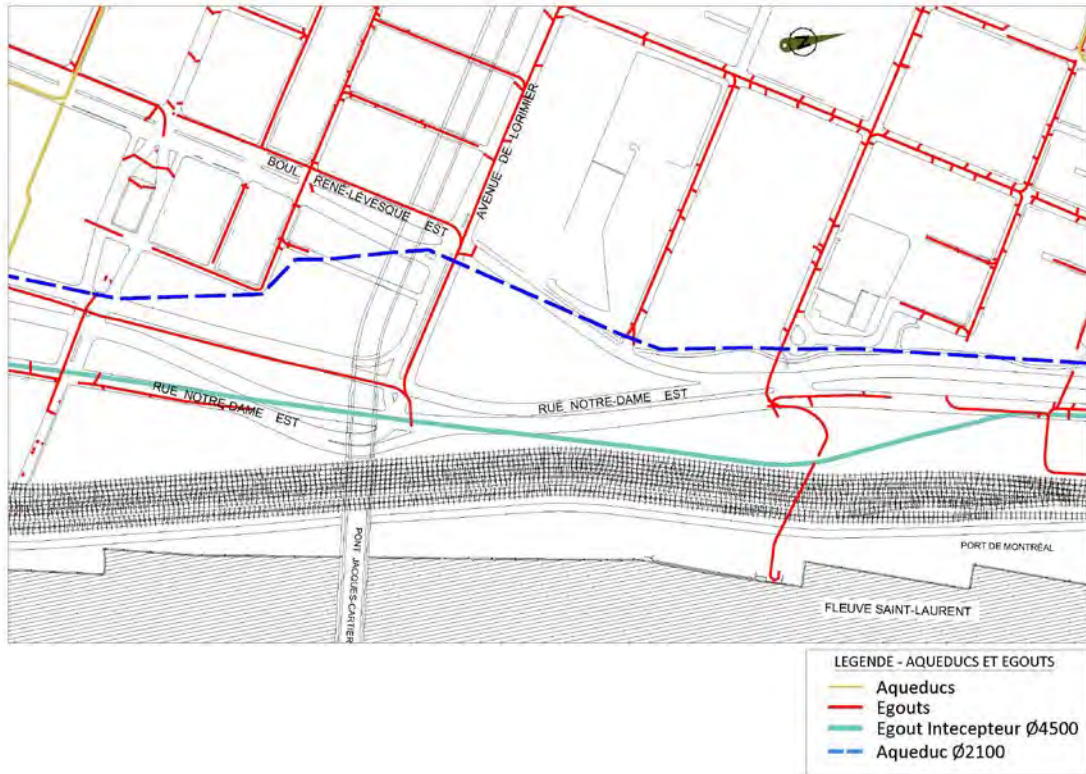


Figure 4.3.d.- Principaux aqueducs et égouts à l'est du pont Jacques-Cartier.
Source: Geocontrol.

Dans la **Figure 4.3.e** on montre une vue générale du modèle 3D, avec la surface de contact sol-roche (en jaune), les lignes de métro existantes (en gris) et les forages géotechniques disponibles.

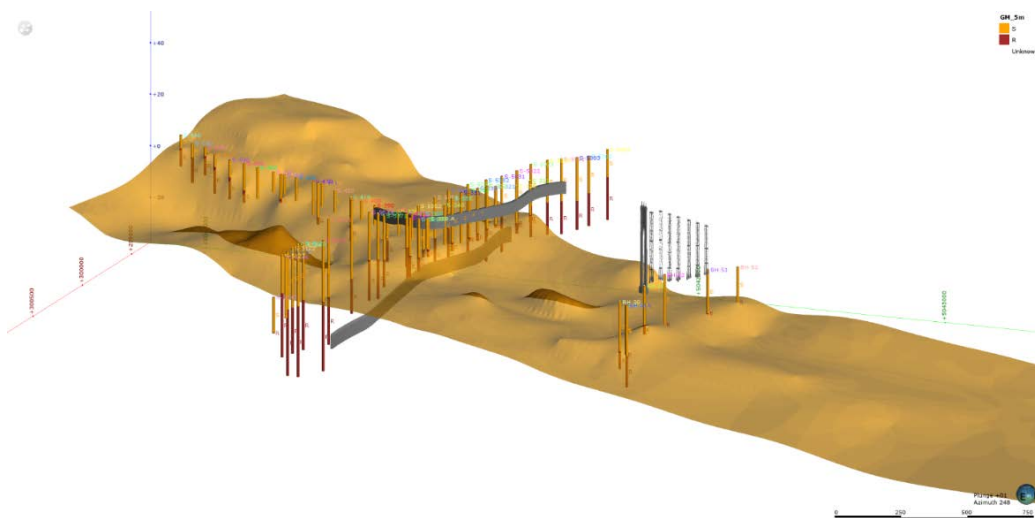


Figure 4.3.e.- Vue générale du modèle 3D.

Le modèle 3D a un bon niveau de précision de la localisation du point de contact sol-roche grâce aux forages des lignes Jaune et Orange à l'ouest, et ceux du pont Jacques-Cartier à l'est.

5. IDENTIFICATION ET EVALUATION DES CONTRAINTES DU SITE

Ce chapitre présente une analyse des contraintes pour le développement des variantes du tracé souterrain au centre-ville.

5.1. CONDITIONS GÉOTECHNIQUES

Sous la surface de la Ville de Montréal, on peut trouver six types de sols différents selon les six cycles de sédimentation; trois de l'ère glaciaire et les trois autres d'origine fluviale, des lacs et de la mer, tel que montré dans **Figure 5.1.a.**

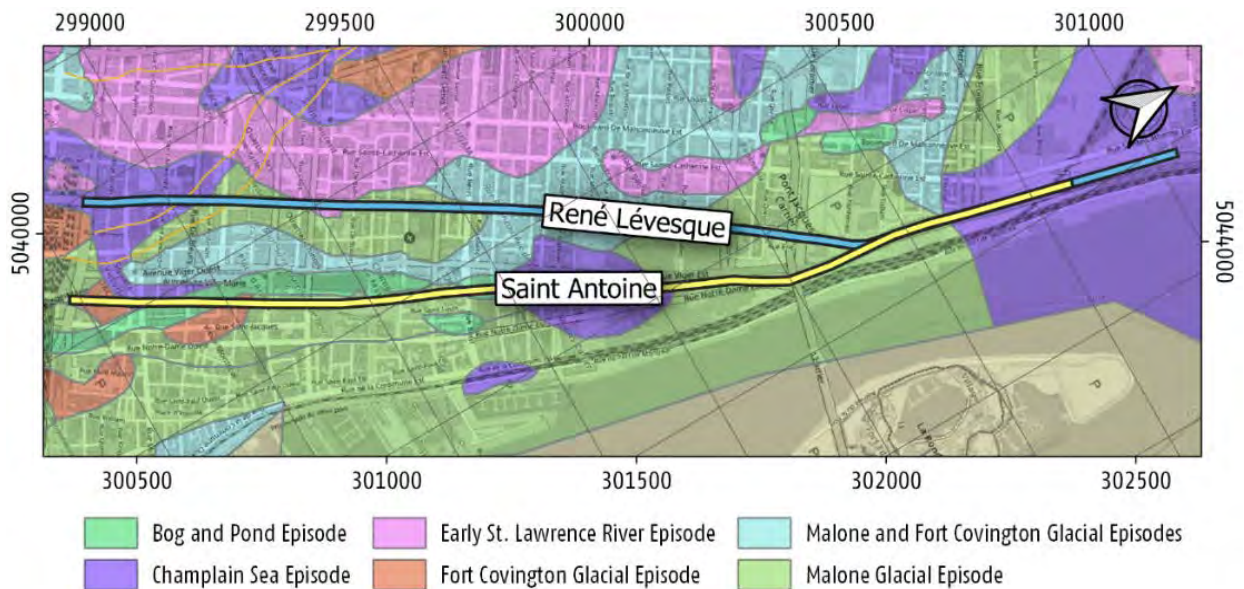
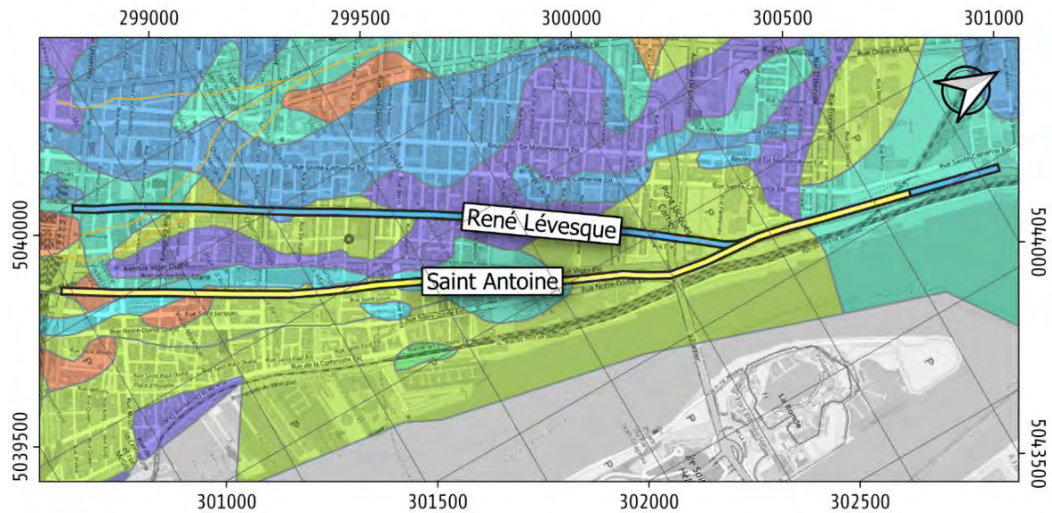


Figure 5.1.a.- Épisodes sédimentaires dans la zone d'intérêt.
Source: Commission Géologique du Canada, Plan 1426.

Les sols sont composés de matériaux sablo limoneux et peuvent présenter certains niveaux de tourbe et niveaux carbonatés. Dans la partie à l'est des corridors, il y a certains niveaux de sable avec des graviers, comme on le voit dans la **Figure 5.1.b.**













-  Clay-silt till: locally sandy and/or stony where directly overlying gravels,
-  Dense, stony, silt-sand till: commonly bouldery; generally 5 feet or more
-  Middle till complex (deposits related to Malone ice and its meltwater), Middle till complex (deposits related to Malone ice and its meltwater) Glacial
-  Nearshore (shallow-water) sediments. Sand, gravel: commonly with marine shells
-  Offshore (deep-water) sediments. Clay, silt: calcareous; locally with marine
-  peat, marl (clayey). Marl: here refers to a calcareous, fresh-water shell
-  Peat, muck, sapropel. Muck: a black, earthy mixture of completely decomposed
-  Sand, minor gravel: rare fresh-water shells. 7a, less than 3 feet thick. Sand, minor gravel: rare fresh-water shells. Surficial deposits are mapped only
-  Sandstone, shale, limestone, dolomite (Early Paleozoic age).
-  Undifferentiated till deposits. Surficial deposits are mapped only where 3 feet, Undifferentiated tills and other Malone drift. (Limited information on

Figure 5.1.b.- Type de sols dans la zone d'intérêt.
Source: Commission Géologique du Canada, Plan 1426 A.

Dans les sols d'origine glaciaire, on peut trouver fréquemment des blocs rocheux erratiques de grande dimension, comme on peut voir dans la **Photographie 5.1.c**, qui augmentent le risque de l'excavation avec tunnelier.



Photographie 5.1.c.- Blocs erratiques de grande taille dans le sol type Malone.
Source: Commission Géologique du Canada, en Prest & Hode-Keyser (1977).

Les lithologies qui constituent les graviers et les blocs rocheux sont majoritairement calcaires et dolomies, cependant il y a aussi des roches ignées ou métamorphiques de grande résistance.

L'épaisseur des sols dans la zone d'étude du projet varie entre 15 et 25 mètres, comme il est montré dans la précédente Figure 4.3.a.

Les matériaux présents dans le socle rocheux sont formés de schistes avec inter-lits de roc calcaire des formations de Nicolet et d'ardoise d'Utica, de l'Ordovicien supérieur. La structure correspond au flanc d'un synclinal, ainsi les couches du terrain sont presque horizontales et inclinées vers l'est.

Il faut souligner la présence de deux failles de déplacement normal au nord du tracé des deux corridors; la première est très proche du parc du village au Pied-du-Courant, et la deuxième, située à côté du croisement des voies du Canadian Pacific, comme le montre la **Figure 5.1.d**.

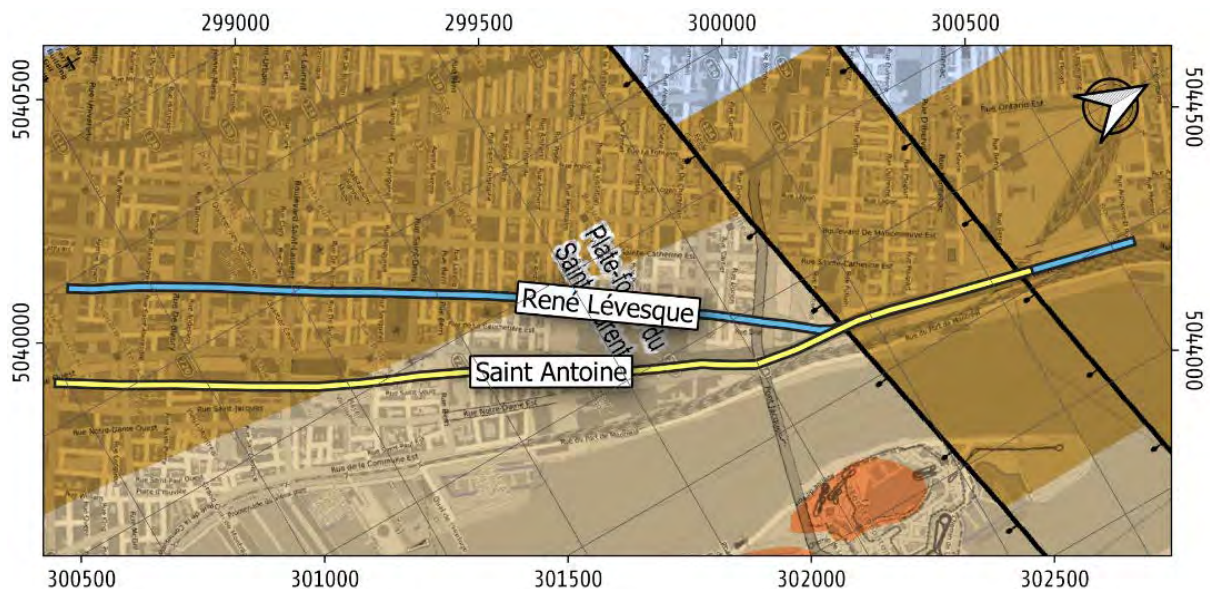


Figure 5.1.d.- Failles géologiques dans la zone d'intérêt.

5.2. LIGNES DE MÉTRO EXISTANTES

La zone d'étude croise deux lignes existantes du métro de Montréal: la ligne Orange sous la rue Berri et la ligne Jaune sous la rue Saint-Denis. Voir **Figure 5.2.a**.



**Figure 5.2.a.- Croisements des corridors à étudier avec les lignes de métro existantes.
(Source: Geocontrol).**

Les caractéristiques principales de la ligne Orange et Jaune sont décrites dans les chapitres suivants.

5.2.1. Ligne Orange

La Ligne Orange (Ligne 2) est l'une des plus anciennes lignes du métro de Montréal. Elle a été inaugurée en octobre 1966. La ligne Orange a été construite en tranchée couverte dans les sols tout au long du tracé, avec la section transversale montrée à la **Figure 5.2.1.a.**

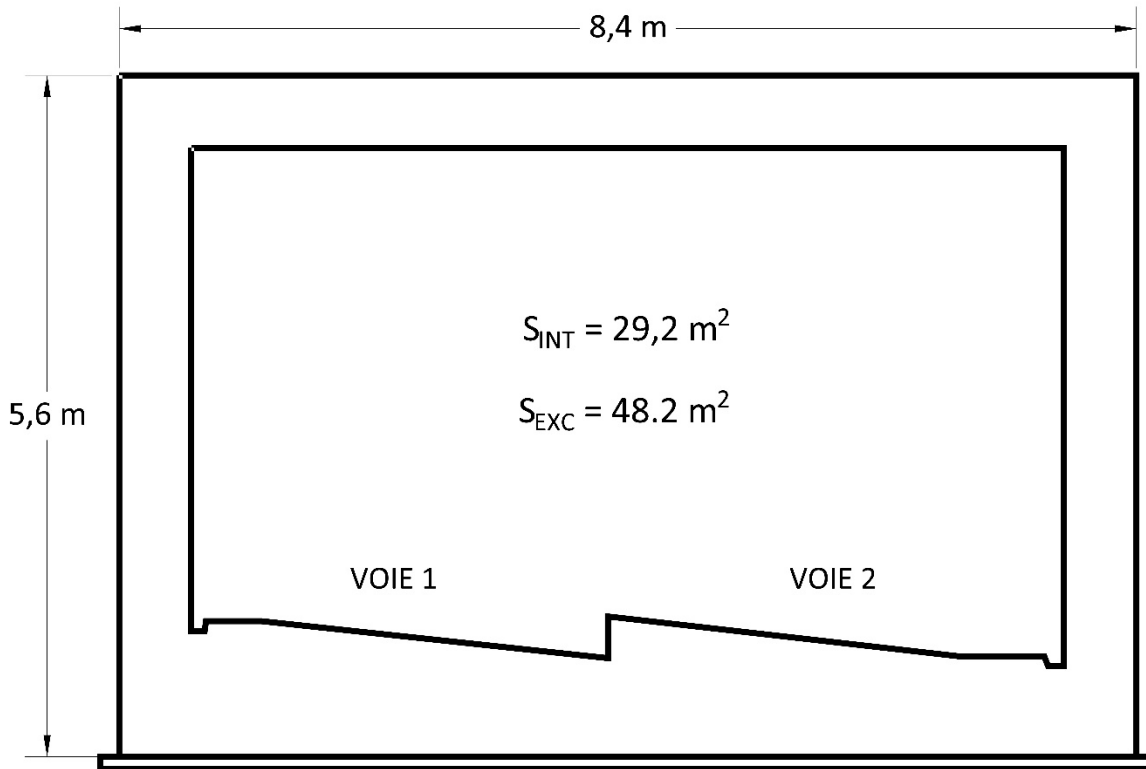


Figure 5.2.1.a.- Coupe type transversale de la Ligne Orange (L-2).

Source: Geocontrol.

La surface d'excavation de la section type de la ligne Orange est de $48,2 \text{ m}^2$, avec une largeur totale de 8,4 m et une hauteur maximale égale à 5,6 m.

Au niveau du croisement de la ligne Orange avec le boulevard René-Lévesque, la section transversale est notamment modifiée, car la hauteur augmente de 5,6 m à 6,3 m. Par rapport à sa largeur, elle augmente aussi de 8,4 m à 14,8 m. Voir **Figure 5.2.1.b.**

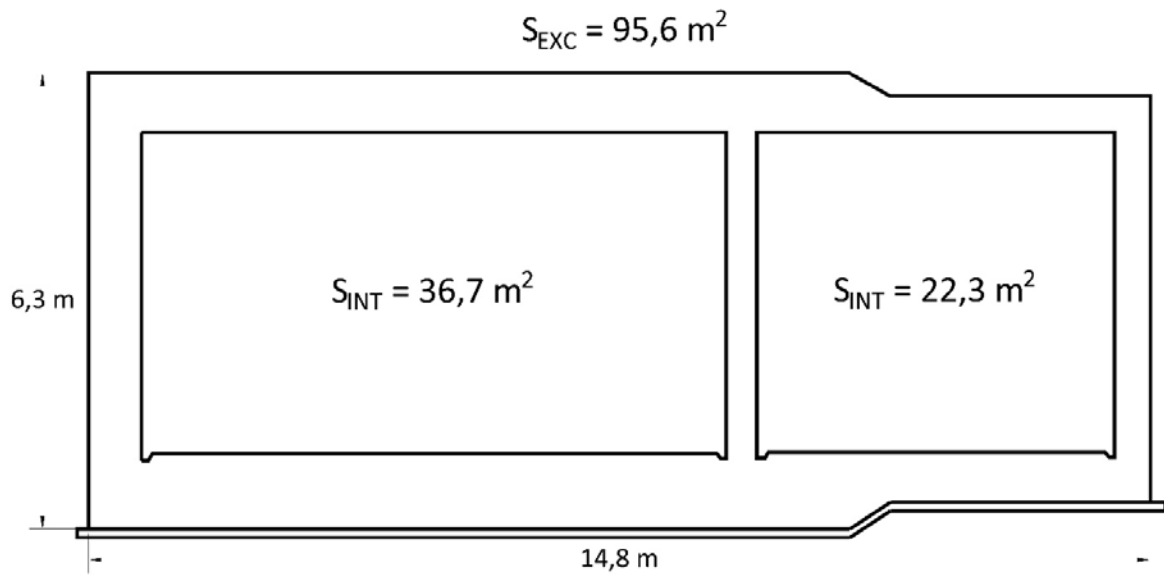


Figure 5.2.1.b.- Section du croisement de la ligne Orange avec le boulevard René-Lévesque.
Source: Geocontrol.

5.2.2. Ligne Jaune

La Ligne Jaune (Ligne 4) a été inaugurée en 1967. Le tracé de cette infrastructure a été excavé entièrement dans le roc. En fait, la ligne Jaune est plus profonde (7,5 m de différence) que la ligne Orange.

La **Figure 5.2.2.a** montre la section type transversale de la Ligne Jaune; avec une surface d'excavation égale à 43,6 m², une largeur de 8,4 m et une hauteur de 5,6 m.

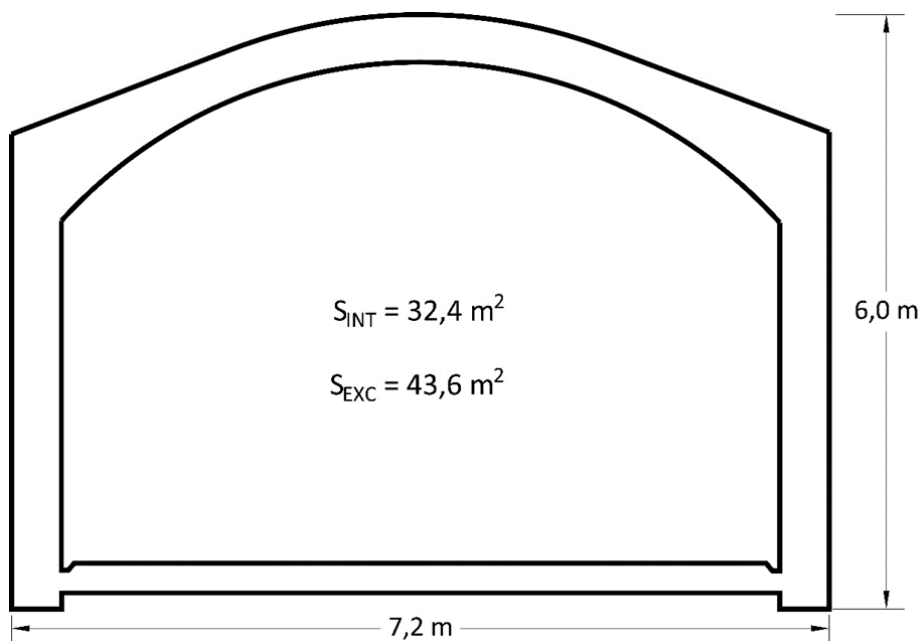


Figure 5.2.2.a.- Section type transversale de la Ligne Jaune (L-4).
Source: Geocontrol.

5.3. ÉGOUTS ET AQUEDUCS

CDPQ Infra a obtenu de la Ville de Montréal l'emplacement et les caractéristiques des principaux aqueducs et égouts existants dans la zone d'intérêt. La plupart de ces éléments vont croiser quasi perpendiculairement les corridors à étudier, comme présenté précédemment sur la Figure 4.3.d. Il y a aussi des conduits parallèles à chacun des corridors, ce qui rend l'insertion urbaine des ouvrages d'entrée au tunnel très difficile.

Selon les informations reçues, il y a deux types d'égouts:

- ◆ Ceux construits en brique à la fin du XIX siècle.
- ◆ D'autres plus récents, normalement en béton.

La vaste majorité de ces conduites dirigent les eaux pluviales et sanitaires vers une conduite intercepteur longeant le fleuve Saint-Laurent. Autrement dit, ces conduites sont stratégiques pour le fonctionnement du réseau d'égout de la ville. La plupart de ces conduites datent des années 1800, raison pour laquelle il est très difficile d'avoir de l'information à propos de leur état. Ainsi, les variantes souterraines du tracé doivent éviter d'entrer en conflit avec les égouts ou produire des affaissements sous ces infrastructures municipales. Le déplacement et/ou réparation de ces conduites serait complexe, voire impossible dans plusieurs cas.

À noter également qu'il y a des aqueducs existants majeurs qui conduisent de l'eau potable à haute pression, et qui fournissent de l'eau à une grande partie de Montréal. Ces conduites ne peuvent pas être affectées par les tracés souterrains proposés.

6. IDENTIFICATION ET ÉVALUATION DES ENJEUX TECHNIQUES

6.1. EXCAVATION

Pour construire les futures ouvrages souterrains du REM de l'Est au centre-ville de Montréal, il faudra excaver deux types de terrain bien différents: des sols et de la roche. Les chapitres suivants décrivent les caractéristiques de chaque type de terrain.

6.1.1. Excavation dans les sols

L'origine des sols à Montréal est glaciaire, avec une typologie « moraine ». Les moraines se définissent par une granulométrie moyenne à fine avec grands fragments de calcaire et de basalte.

L'excavation dans ce type de sols est assez complexe pour un tunnelier. Dans le cas d'un tunnelier à pression de terres (bouclier type EPB), son convoyeur à vis hélicoïdal ne permet pas le passage des blocs de diamètre supérieur à 40 cm.

L'expérience montre que les blocs de grande dimension, plus de 1 m, pourraient être fragmentés par la tête du tunnelier s'il est équipé d'un disque pour creuser le roc, alors que les blocs d'une dimension variant entre 0,4-1,0 m seront normalement déplacés par la tête du tunnelier sans être fragmentés. Pour pouvoir transporter ces blocs à travers la vis hélicoïdale, il faudra un temps d'arrêt au tunnelier pour accéder à la chambre d'excavation et casser les blocs de roche. Dans ces circonstances, le rendement du tunnelier sera considérablement réduit.

Par contre, si l'excavation est faite avec des moyens conventionnels (plutôt qu'avec un tunnelier), les blocs de roche existants ne représentent pas un réel problème; cependant, l'excavation du tunnel devra être réalisée à l'abri d'une voûte-parapluie lourde pour contrôler la stabilité du front de l'excavation.

Conformément à ce qui précède, la construction des tunnels dans les sols de Montréal avec un tunnelier est faisable, mais avec des rendements qui dépendront de la présence de blocs de roc.

6.1.2. Excavation dans la roche

L'annexe 1 développe le calcul du **RME (Rock Mass Excavability)** pour les schistes calcaires de Montréal.

Ces calculs ont déterminé certains paramètres importants pour l'excavation de tunnel dans le schiste calcaire de Montréal:

- ◆ Rock Mass Rating (RMR) des schistes calcaires corrigé avec l'orientation du tunnel46 points.
- ◆ Indice de comportement élastique (ICE) pour un tunnel avec deux voies344 points.
- ◆ Rock Mass Excavability Index (RME) pour des schistes calcaires82 points.

6.1.3. Conclusions par rapport à l'excavabilité des schistes calcaires de Montréal

La valeur de 82 du RME pour les schistes calcaires de Montréal présentée au chapitre précédent permet d'anticiper des résultats compris entre « très bons » et « excellents » pour les systèmes d'excavation mécanique classiques (voir Annexe 1 pour le détail sur la classification). Les méthodes de construction envisageables sont expliquées au chapitre 5.4.

6.2. PRÉSENCE DE LA NAPPE PHRÉATIQUE

Montréal est complètement entourée d'eau. L'île se trouve à l'est de la confluence du fleuve Saint-Laurent et de la rivière Ottawa. Elle est délimitée par le fleuve Saint-Laurent au sud et à l'est, par la rivière des Prairies au nord, par le lac Saint-Louis au sud-ouest et le lac des Deux-Montagnes au nord-ouest.

La **Figure 6.2.a** présente un croquis du mouvement des eaux souterraines sous l'île de Montréal. Le flux régional avance de l'ouest vers l'est avec une recharge placée au centre de l'île.

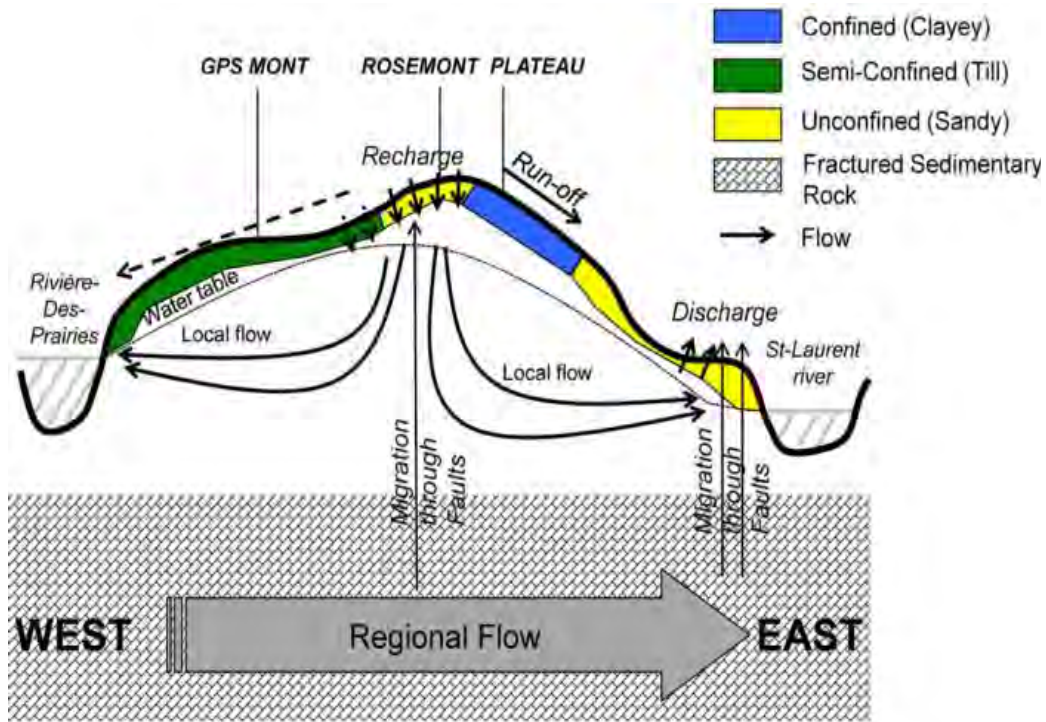


Figure 6.2.a.- Mouvement de l'eau souterraine sous l'île de Montréal.
Source: Norman and Essamm Heggy, 2015.

La **Figure 6.2.b** présente un extrait d'un plan hydrogéologique élaboré par le Ministère des Richesses Naturelles du Québec en 1978, qui correspond à la zone d'insertion du projet. La vue en plan montre que la position de la nappe phréatique descend de l'ouest vers l'est. De plus, on peut identifier l'emplacement des puits d'eau exploités à différentes époques jusqu'à 1978.

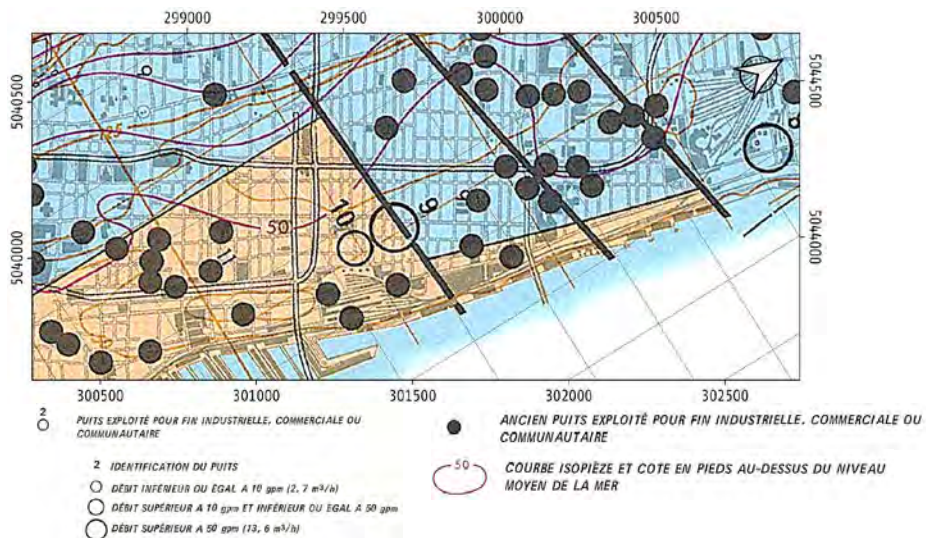


Figure 6.2.b.- Puits d'eau et position de la nappe phréatique dans la zone d'intérêt.
Source: Ministère des Richesses Naturelles de Québec, 1978.

À noter que l'information de la Figure 6.2.b date de 50 ans. Il faut donc la prendre à titre indicatif.

Puisque les données relatives à la position de la nappe phréatique dans la zone d'intérêt n'étaient pas disponibles au moment d'écrire ce rapport, on peut faire l'hypothèse suivante : étant donné que le niveau d'eau du fleuve Saint-Laurent est à 6 m au-dessus du niveau de la mer (m.s.n.m), la position estimée de la nappe phréatique dans cette zone d'étude sera à environ 7 m au-dessus du niveau de la mer.

Compte tenu des informations incluses au paragraphe 5.1, le comportement de l'eau dans la zone d'étude va dépendre de la position du terrain par rapport au niveau de la mer. S'il s'agit d'un sol, le débit dans les excavations serait assez élevé alors que, si on parle d'un roc, le débit serait très faible.

Sous ces hypothèses, il semble évident que le flux d'eau souterraine se concentre dans la surface de contact sol-roche et dans le sol. Là où la présence d'argiles est importante, on pourra trouver des petits aquifères confinés dans les sols, avec des débits variables; qui auront une influence faible sur les fronts excavés dans le roc, tenant compte de la faible perméabilité du roc face à la perméabilité du sol.

6.3. CONSTRUCTION DES STATIONS

De façon générale, il y a deux méthodes d'exécution possibles dans le domaine urbain pour la construction d'une gare souterraine:

- ◆ Méthode à ciel ouvert entre pieux sécants, murs berlinois ou parois moulées.
- ◆ Construction en caverne.

La construction à ciel ouvert est la solution la plus intéressante du point de vue économique par rapport à la méthode en caverne, tant que la profondeur de la station est inférieure à ± 25 m. Toutefois, son gros inconvénient est l'impact en surface sur les infrastructures municipales existantes et autres conduits, les bâtiments avoisinants, le trafic et les activités des citoyens.

La construction des gares de métro en caverne d'une largeur se situant entre 15 et 25 m de profondeur est une pratique courante dans le domaine des infrastructures souterraines de transport.

À l'aide d'un puits d'attaque, la construction d'une station de métro en caverne pourrait être complétée après un an et demi ou deux ans, au maximum. Le puits permet d'isoler la construction de la gare de celle du tunnel entre les stations.

La surface nécessaire pour construire le puits d'attaque d'une station devra être de l'ordre de 1500 à 2000 m². Dans la plupart des cas, le puits peut s'implanter sur l'espace public comme c'est le cas, par exemple, de la station Ines de Suarez de la ligne L-6 du métro de Santiago de Chili, montré à la **Photographie 6.3.a**. Dans ce cas-ci, le chantier pour l'exécution du puits d'attaque de cette station se trouve dans un parc public tout en préservant des arbres matures à proximité.



Photographie 6.3.a.- Site du chantier pour la construction de la station Inés de Suarez de la Ligne 6 du métro de Santiago du Chili.

En ce qui concerne les risques de construction, on peut affirmer que la construction des gares creusées dans le roc sera moins risquée que si celles-ci sont excavées dans le sol; particulièrement si l'excavation se fait sous la nappe phréatique.

6.4. CONSTRUCTION DES TUNNELS

Il y a deux principales méthodes pour construire les tunnels entre les stations souterraines, soit le tunnelier et la «méthode séquentielle (SEM)» (aussi appelée New Austrian Tunnelling Method (NATM)).

Afin de pouvoir choisir la méthode la plus adaptée à chaque projet, il faut d'abord faire une campagne exhaustive de reconnaissance géotechnique du terrain. Cette campagne permet d'atteindre les objectifs suivants :

- ◆ **L'obtention du profil géotechnique longitudinal** du tracé sélectionné en obtenant, avec une précision adéquate, la position des tronçons à excaver dans la roche et ceux des sols.
- ◆ **La détermination du niveau de la nappe phréatique** le long du profil de la solution sélectionnée.

- ◆ **Le calcul des paramètres géotechniques** pour identifier le comportement attendu des terrains à excaver.
- ◆ **L'évaluation de la probabilité de trouver des blocs** erratiques rocheux dans le terrain, avec des diamètres entre 0,4 m et 1,5 m.
- ◆ **La détermination des index RMR et RME** des schistes calcaires le long du tracé sélectionné.

De plus, il faudra établir avec une bonne précision la position des infrastructures existantes, en fixant leurs caractéristiques et emplacements. Ce point devient déterminant au moment de choisir la méthode d'exécution des ouvrages souterrains en milieu urbain.

Le choix entre la construction entièrement mécanisée (tunnelier) et la méthode d'excavation séquentielle avec une mécanisation partielle (haveuse/pelle) doit se faire en fonction du type de terrain (sol/roc), la présence de la nappe phréatique et la longueur du tunnel à construire.

La **Photographie 6.4.a** montre, à titre d'exemple, une haveuse type SANDVIK MT 520, qui a une puissance de 315 kW, à la tête d'excavation, et qui serait adéquate pour excaver les schistes calcaires de Montréal avec des cadences d'avancement assez bonnes.



Photographie 6.4.a.- Haveuse Sandvik MT 520.

L'emploi des tunneliers est devenu très commun grâce à ses grands rendements d'excavation. Pour accueillir 2 voies, le diamètre du tunnelier doit être d'environ 10m. La **Photographie 6.4.b** montre la roue d'excavation du tunnelier utilisé pour la construction de la ligne 9 du métro de Barcelone, en Espagne.



Photographie 6.4.b.- Roue de taille d'un tunnelier. Ligne 9 du métro de Barcelone (Espagne).

Pour les tronçons du tunnel excavés dans le roc on peut utiliser l'information fournie par l'Index de Comportement Élastique (ICE) selon les critères inclus dans le **Tableau 6.4.c.**

ICE	Comportement tenso-déformationnel	Difficulté constructive	Présence d'instabilités
>130	Élastique	Très faible	Non
70-130	Limite élasto-plastique	Faible	Décollements ponctuels et petits
40-69	Plastification modérée	Moyenne	Décollements petits Phénomène de fluage des terrains
15-39	Plastification forte	Haute	Décollements modérés
<15	Plastification très forte	Très haute	Risque réel d'effondrement du front de taille

Tableau 6.4.c.- Évaluation de la difficulté pour construire un tronçon de tunnel selon l'ICE.

Dans l'annexe de ce document, l'ICE d'un tunnel à deux voies percé dans les schistes calcaires a été estimé. La valeur ICE obtenue est égale à 344, le terrain excavé reste donc dans le domaine élastique donnant une faible difficulté d'exécution, selon les critères indiqués dans le tableau 6.4.c. Les deux méthodes (tunnelier et méthode d'excavation séquentielle) sont possibles dans ce type de terrain. Pour un tunnel long de plus de 3 km, comme c'est le cas pour certaines des options étudiées, le tunnelier serait préférable, compte tenu des rendements beaucoup plus élevés offerts par ce genre d'équipements. Cet avantage peut toutefois être grandement réduit dans les tronçons avec gros blocs de roc où le rendement du tunnelier deviendrait problématique, ce qui est le cas dans la portion Est du centre-ville de Montréal.

6.5. CROISEMENT AVEC DES INFRASTRUCTURES EXISTANTES

Dans la zone d'étude, on retrouve deux lignes de métro existantes, Jaune et Orange, certains aqueducs et de nombreux égouts qui feront obstacle à l'exécution des travaux.

La plupart de ces structures sont très difficiles ou impossibles à déplacer.

Il faudra donc analyser au cas par cas la faisabilité des relocalisations ainsi que les conditions pour bien gérer le croisement du tronçon souterrain du REM de l'Est avec chaque infrastructure existante.

Il faudra essayer d'éviter tout conflit avec ces infrastructures et respecter les critères de dégagement et de vibration imposés par les propriétaires de ces infrastructures.

Forte de sa vaste expérience en situations similaires, Geocontrol propose de prévoir une amélioration du terrain autour de chaque infrastructure au moyen des traitements de jet-grouting ou des injections chimiques.

Cette amélioration du terrain avoisinant aidera à réduire le risque d'avoir des sols affectés par le forage au moment de la construction des nouvelles infrastructures. De plus, cela permettra de concevoir le croisement à une distance minimale de l'infrastructure croisée, alternative toujours soumise à l'approbation du propriétaire de l'infrastructure.

7. ALTERNATIVES ETUDIÉES

Des alternatives pour l'insertion du REM de l'Est au centre-ville de Montréal sous le boulevard René-Lévesque et sur la rue Saint-Antoine ont été étudiées.

Les alternatives sous le boulevard René-Lévesque tiennent compte des solutions pour croiser les lignes Orange et Jaune et du positionnement de la transition entre le tronçon aérien et souterrain.

Dans les sections suivantes, les solutions pour croiser les lignes de métro et pour placer la transition aérienne-souterraine dans le corridor René-Lévesque sont analysées. Une alternative sous la rue Saint-Antoine est également analysée.

7.1. ALTERNATIVES SOUS LE BOULEVARD RENÉ-LÉVESQUE

Dans ce chapitre, on présente les solutions retenues pour croiser les lignes de métro et pour localiser la transition aérienne-souterraine dans le corridor René-Lévesque.

7.1.1. Solutions pour croiser les lignes de métro

Tel que mentionné au paragraphe 6.2.1, la ligne Orange fut construite à ciel ouvert avec la méthode en tranchée couverte. Ça signifie qu'il n'y a pas assez d'espace pour faire passer le tunnel du REM de l'Est au-dessus de la ligne Orange.

Par ailleurs, pour concevoir le possible croisement en souterrain du tunnel du REM de l'Est avec les lignes Orange et Jaune, il faut tenir des dégagements requis pour assurer l'intégrité des ouvrages existants selon l'article 154 de la Loi sur les Sociétés de Transport en Commun:

« Lors de travaux de construction souterrains, la Société de transport de Montréal devient, dès le début des travaux, sans formalité ni indemnité mais sous réserve d'un recours en dommage, propriétaire du volume occupé par le tunnel et d'une épaisseur de cinq mètres entourant la paroi intérieure bétonnée du tunnel du métro. De plus, la Société est réputée titulaire d'une servitude légale établie en faveur du volume occupé par le tunnel et limitant à 250 kilopascals la contrainte appliquée à la surface supérieure de ce volume. »

Deux options pour croiser les deux lignes de métro ont été étudiées; soit une qui passe entre les deux tunnels existants et l'autre en-dessous de la ligne Jaune.

7.1.1.1. Croisement entre les lignes de métro

L'analyse réalisée par l'équipe de Geocontrol nous amène à la conclusion suivante: il n'est pas possible de faire passer le tunnel du REM de l'Est entre les deux lignes de métro existantes en respectant la distance de protection minimale de 5m tel qu'exigée dans Loi sur les sociétés de transport en commun.

Cependant, en tenant compte que la ligne Jaune a été excavée dans le roc et considérant la raisonnable qualité de ce massif rocheux, une solution théorique a été analysée qui laisse respectivement 3,5 mètres et 2,5 mètres entre le tube du REM et les lignes Jaune et Orange. Cette solution nécessite une double dérogation à la loi citée préalablement.

Pour évaluer la faisabilité technique de cette solution, Geocontrol a fait une évaluation des contraintes et déplacements induits par la construction du tunnel du REM sur les lignes Orange et Jaune. Dans cette analyse, on a utilisé le modèle tridimensionnel montré dans la **Figure 7.1.1.1.a.**

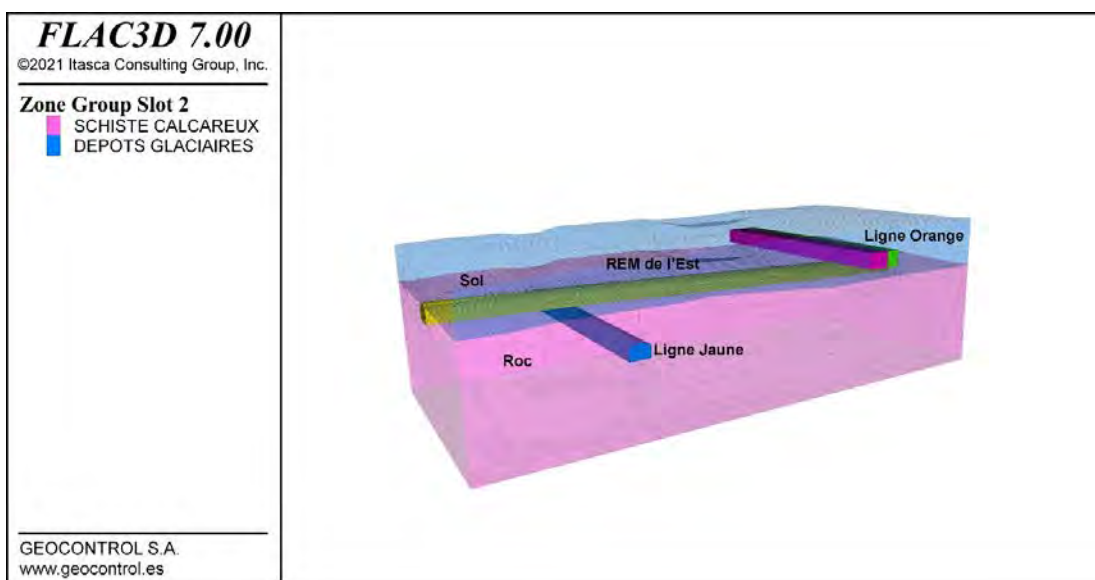


Figure 7.1.1.1.a.- Modèle pour l'étude du croisement entre les deux lignes.

Ce modèle a les dimensions suivantes: 220 m x 100 m x 65 m et il a 494.032 éléments.

La **Figure 7.1.1.1.b** montre les distances du tunnel du REM de l'Est aux lignes Orange et Jaune, adoptées pour cette analyse.

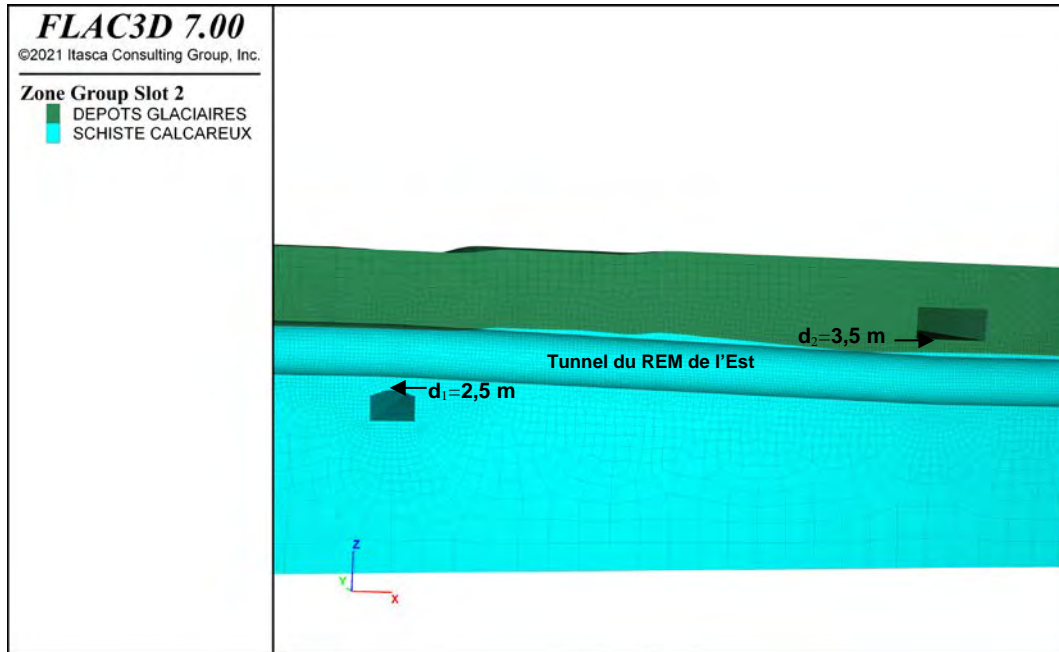


Figure 7.1.1.1.b.- Aperçu du model numérique utilisé pour étudier l'impact de la construction du tunnel du REM de l'Est entre les deux lignes de métro.

Avec l'aide du logiciel Rock Lab, les schistes calcaires ont été caractérisés avec un RMR= 46 et $\sigma_{ci}=45$ MPa. Pour caractériser les sols, l'équipe de Geocontrol a utilisé des paramètres bibliographiques. Le **Tableau 7.1.1.1.c** montre les paramètres considérés :

Paramètres	Terrains	
	Schistes calcaires	Sols
Cohésion (MPa)	0,33	0,05
Friction (°)	54,3	38,5
Module de Young (MPa)	4.298	20
Coefficient de Poisson	0,25	0,4

Tableau 7.1.1.1.c.- Paramètres adoptés.

Le processus des calculs a été le suivant:

1. Distribution des contraintes dans le terrain naturel.
2. Construction de la ligne Orange.
3. Construction de la ligne Jaune.
4. Construction du REM de l'Est entre les deux lignes.

La **Figure 7.1.1.1.d** montre la distribution des déformations unitaires au cisaillement du terrain, après la construction du tunnel de la Ligne Orange.

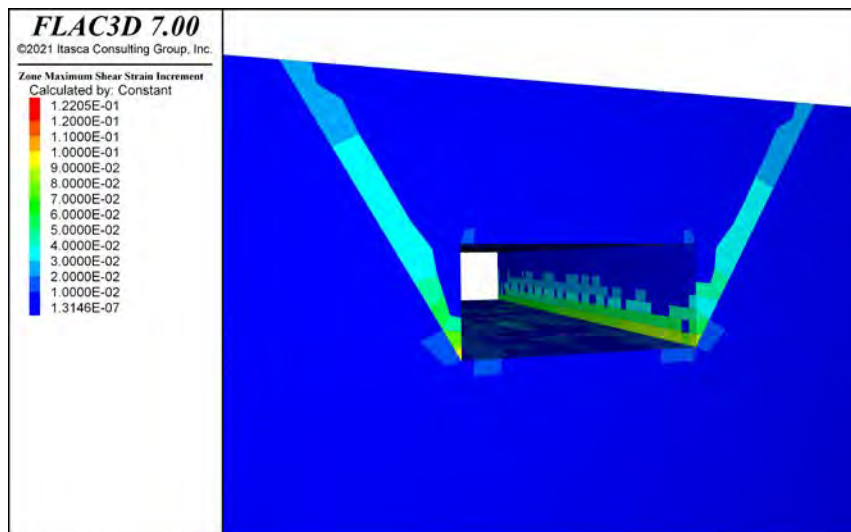


Figure 7.1.1.1.d.- Répartition des déformations unitaires au cisaillement du terrain après l'excavation de la Ligne Orange.

La figure démontre que la déformation unitaire maximale au cisaillement du terrain entourant la ligne Orange après son excavation est comprise entre 8 et 9%; et que ces valeurs se concentrent dans une zone limitée au pied des murs du tunnel.

La plupart du terrain adjacent à la ligne Orange est soumis à des déformations au cisaillement plus petites, de l'ordre de 2%.

Similairement, la **Figure 7.1.1.1.e** montre la répartition des déformations unitaires à la tension principale, qui produisent la compression sur le terrain, après l'excavation du tunnel de la Ligne Jaune.

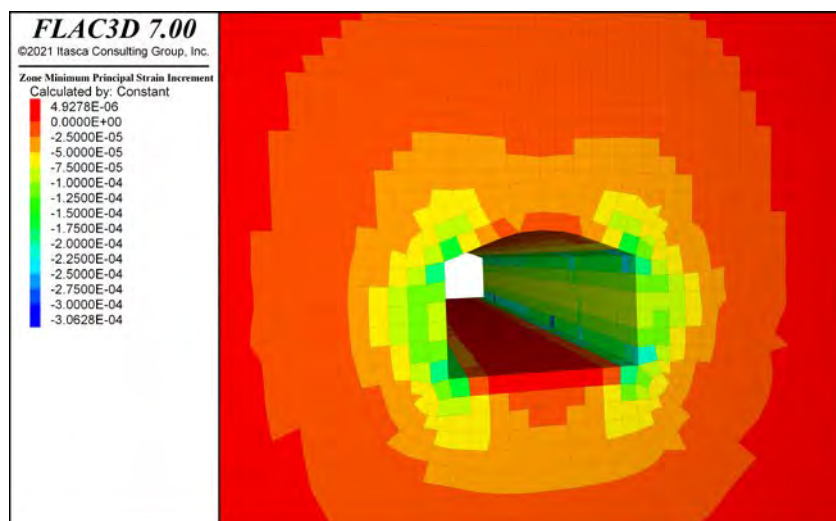


Figure 7.1.1.1.e.- Répartition des déformations unitaires dues à la tension principale après l'excavation de la Ligne Jaune.

La première conclusion qu'on obtient après l'analyse de la figure 7.1.1.1.e est que la construction de la ligne Jaune a induit des déformations très petites dans le terrain, de l'ordre de 0,02%.

Ces faibles déformations sont cohérentes avec la valeur du ICE = 420 points, obtenue à la section 5.1.2, ce qui démontre que l'excavation de la ligne Jaune a induit des tensions très basses par rapport à sa limite élastique, ce qui correspondrait à une valeur ICE autour de 100.

La ligne Jaune fut excavée par dynamitage. Ainsi, il faut considérer que le terrain du périmètre de l'excavation a subi une dégradation de sa résistance.

On peut considérer, de façon conservatrice, que le terrain altéré autour de la ligne Jaune a une épaisseur de 1,5 m, tel que montré à la **Figure 7.1.1.1.f**.

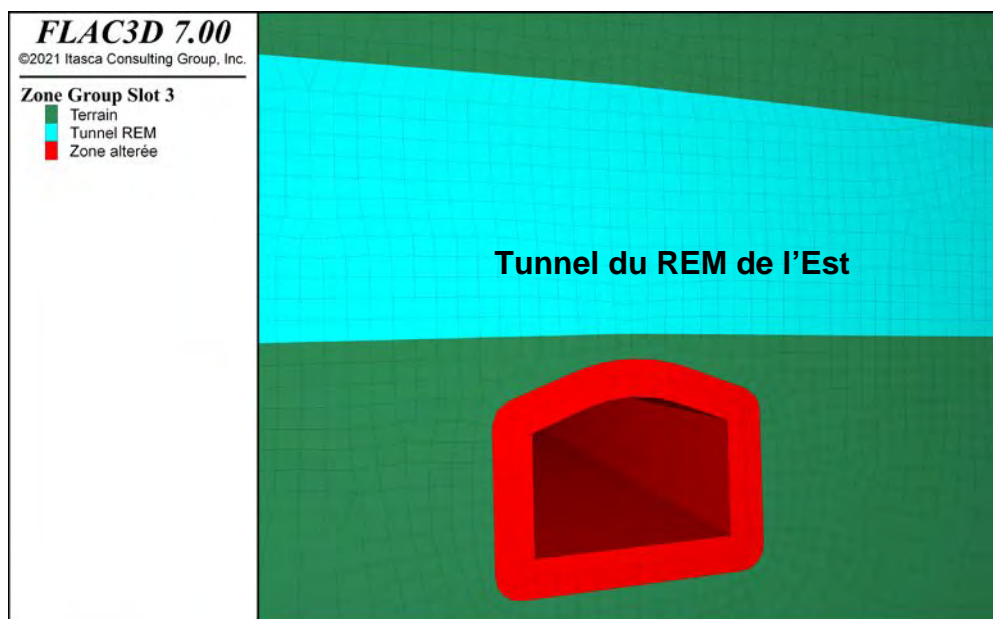


Figure 7.1.1.1.f.- Définition d'un anneau de 1,5 m d'épaisseur de terrain altéré à cause du dynamitage réalisé pour l'excavation de la ligne Jaune.

Pour évaluer la dégradation du terrain à cause du dynamitage, on peut utiliser le facteur D, introduit par HOEK. La description de son utilisation est détaillée dans le chapitre 8.5.1.4 "Modified Hoek-Brown model" du livre "Ground Characterization and Structural Analyses for tunnel design", Celada et Bieniawski (2020).

Pour ce cas-ci, la valeur du facteur D prise est de 0,5, en considérant que la qualité du dynamitage pour l'excavation était moyenne.

Les paramètres liés au comportement des schistes calcaires ont été calculés à l'aide du logiciel Rock Lab. Le **Tableau 7.1.1.1.g** montre les paramètres initialement calculés ainsi que les nouveaux paramètres ajustés.

Paramètres	Valeurs	
	Roc naturel	Roc altéré
Cohésion (MPa)	0,33	0,23
Friction (°)	54,3	49,96
Module de Young (MPa)	4.298	2.035

Tabla 7.1.1.1.g.- Paramètres naturels et dégradés pour les schistes calcaires.

En utilisant les nouveaux paramètres, qui tiennent compte de l'altération des caractéristiques mécaniques du roc due au dynamitage, l'équipe de Geocontrol a produit une nouvelle itération du modèle géomécanique. La **Figure 7.1.1.1.h** présente la répartition des déformations induites par la tension de compression sur le terrain, compte tenu des caractéristiques du roc altéré autour de l'excavation de la ligne Jaune.

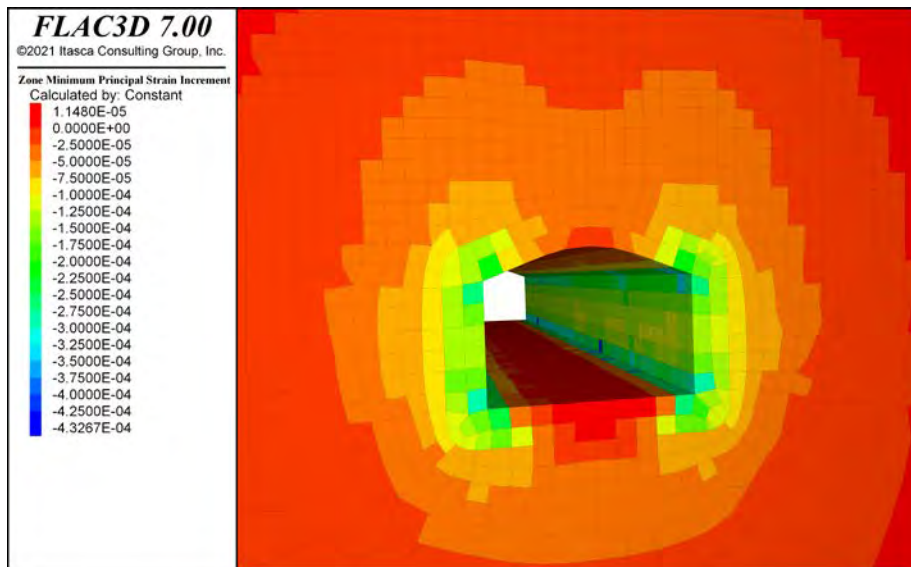


Figure 7.1.1.1.h.- Répartition des déformations unitaires dues à la tension principale de compression, en tenant compte des conditions du roc altéré.

Si on compare cette figure-ci avec la 7.1.1.1.e, on constate que la valeur absolue de la déformation maximale a augmenté de 0,030% à 0,043%. Il s'agit d'une variation négligeable.

Ainsi, l'état actuel des tunnels des lignes Orange et Jaune est défini par les distributions des déformations montrés par les figures 7.1.1.1.d et 7.1.1.1.h, respectivement.

Pour évaluer l'impact que la construction du tunnel du REM de l'Est aurait sur les tunnels existants, le modèle géomécanique a fait l'objet d'une nouvelle itération en considérant la distance montrée à la figure 7.1.1.1.a et les terrains altérés autour de la ligne Jaune.

La **Figure 7.1.1.1.i** présente la répartition des déformations unitaires au cisaillement autour de la ligne Orange après la construction du tunnel du REM de l'Est. Si on compare cette figure avec la 7.1.1.1.d, on constate qu'elles sont presque identiques, mais la figure 7.1.1.1.i montre le tunnel du REM de l'Est déjà construit. Ainsi, l'analyse montre que les affaissements produits par la construction du tunnel du REM de l'Est sur le sol entourant la ligne Orange seront très légers.

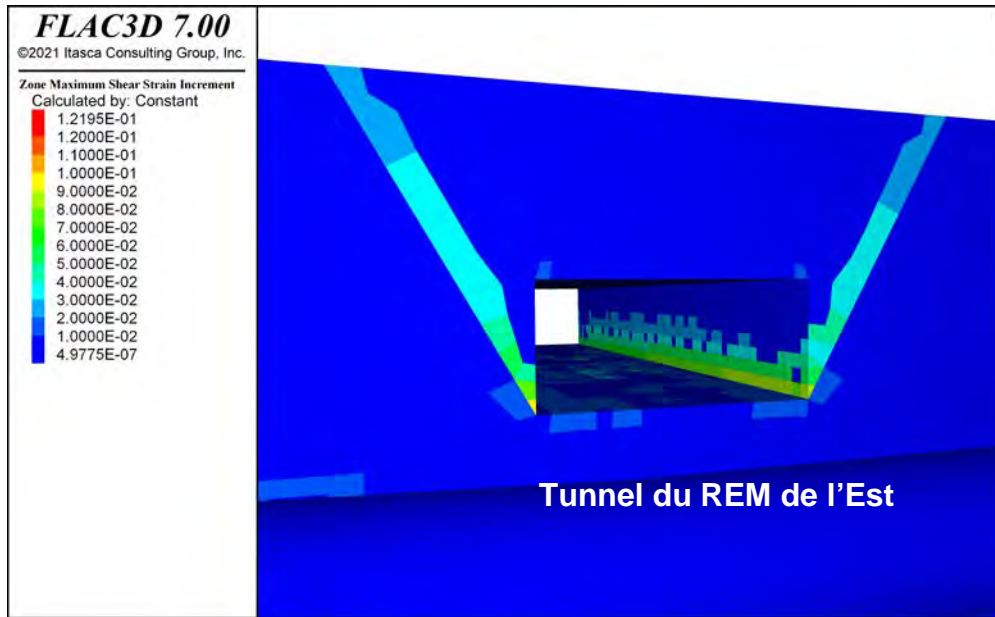


Figure 7.1.1.1.i.- Répartition des déformations unitaires au cisaillement autour de la ligne Orange, après la construction du tunnel du REM de l'Est.

Similairement, la **Figure 7.1.1.1.j** présente la distribution des déformations unitaires dues à la compression autour de la ligne Jaune, après avoir excavé le tunnel du REM de l'Est.

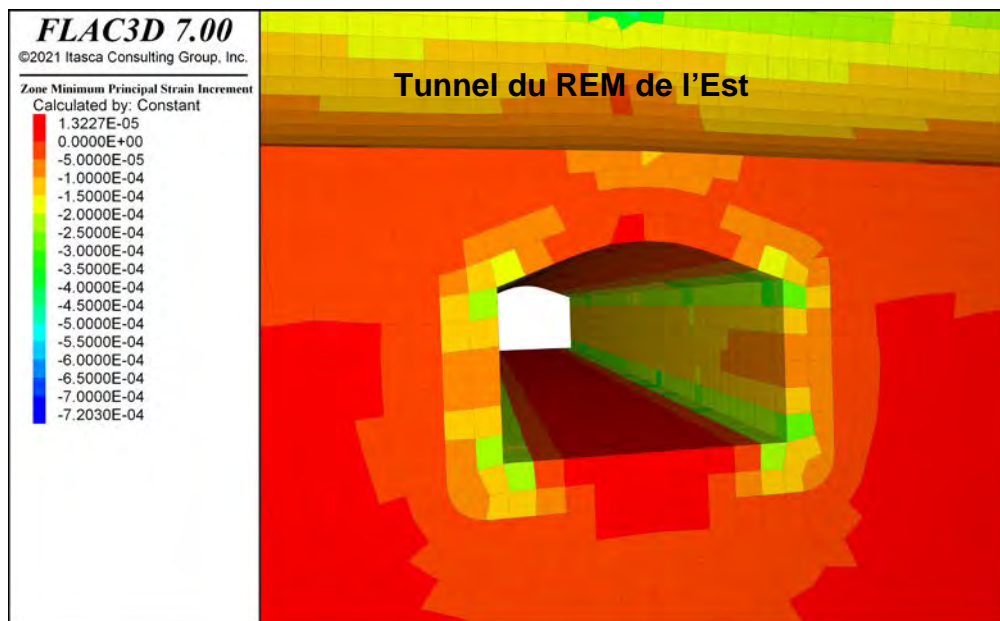


Figure 7.1.1.1.j.- Distribution des déformations unitaires en compression autour de la ligne Jaune, après la construction du REM de l'Est.

Si on compare cette figure avec la 7.1.1.1.e, on peut constater de nouveau que les deux sont presque identiques, bien que la figure 7.1.1.1.i tienne compte de la construction du tunnel du REM de l'Est. Également, l'analyse réalisée montre que les affaissements produits par la construction du tunnel du REM de l'Est sur le roc autour de la ligne Jaune seront très légers.

Cette simulation théorique simplifiée du comportement du terrain montre que la construction d'un tunnel de 10m de diamètre entre les deux lignes de métro est techniquement possible. Cependant, en tenant compte des conséquences majeures sur l'opération du métro en cas de problème, il est nécessaire de considérer les aspects techniques, opérationnels et juridiques aussi impliqués avant de pouvoir tirer une conclusion définitive.

En effet, il faut vérifier l'état de conservation des structures des lignes Orange et Jaune dans la zone du croisement avec le tracé du REM de l'Est, car plusieurs décennies ont passé depuis sa mise en service. Le degré et l'épaisseur d'altération du roc autour de la structure de la ligne Jaune doit être confirmée, ainsi que le niveau de dégradation du béton et de l'armature des structures. Ceci est spécialement important pour la ligne Orange, car elle se trouve plus proche de la surface, et donc, les sels de déglacage peuvent avoir exercé une influence notable sur l'acier de la structure.

C'est aussi nécessaire de prévoir l'existence de gros blocs de roc, au-dessus du contact sol-roc, qui peuvent ralentir considérablement l'opération du tunnelier, et même, l'arrêter pendant plusieurs jours ou semaines. Il est nécessaire d'envisager des mesures pertinentes pour éviter les défaillances dans le guidage du tunnelier, qui pourraient modifier substantiellement les distances établies vers les deux lignes de métro (2,5 m pour la Ligne Jaune, et 3,5 m pour la ligne Orange).

En période de construction, il faudra prévoir l'interruption du service sur chaque ligne lorsque le front du tunnel sera entre +25 m et -25 m de l'axe de chaque ligne afin de garantir la sécurité des usagers du métro. Cela signifie une interruption d'une semaine pour chaque ligne. En cas de problèmes, cette interruption pourrait devoir être prolongée pour une durée indéterminée. Pour mitiger les risques inhérents à ce genre de travaux, un traitement du sol avec des injections chimiques autour de la ligne Orange pourrait aider à rigidifier le terrain.

Finalement, il sera nécessaire d'obtenir la dérogation de l'article 154 de la Loi sur le Société de Transports en Commun pour pouvoir croiser à moins de 5m de chaque ligne.

D'après ce qui précède, la conclusion sur le passage en tunnel du REM de l'Est entre les deux lignes de métro est qu'il est techniquement possible, mais qu'il comporte des risques importants.

7.1.1.2. Croisement en-dessous de la ligne Jaune

Il est possible de faire passer le tunnel du REM de l'Est en-dessous de la ligne Jaune à une distance supérieure à 5 m; comme le montre la **Figure 7.1.1.2.a**.

Évidemment, ce tracé-ci est moins risqué que le passage entre les deux lignes, puisque le tunnel est excavé entièrement dans le roc et à une distance supérieure des infrastructures existantes.

Pour permettre au tunnelier de traverser sous la ligne Jaune en conditions sécuritaires, le service de métro devrait également être interrompu de façon temporaire.

Tel que montré dans la figure suivante, les stations de chaque côté des lignes de métro auraient une profondeur très élevée, ce qui pourrait affecter l'achalandage prévu.

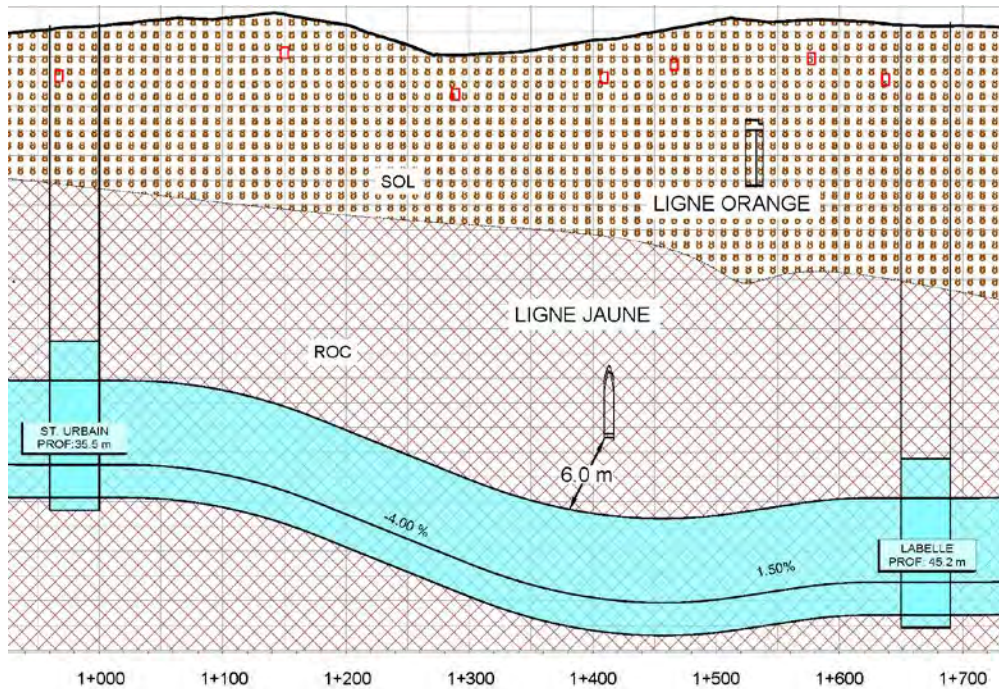


Figure 7.1.1.2.a.- Tracé du REM de l'Est pour passer sous la Ligne Jaune.

7.1.2. Solutions pour placer la transition aérienne-souterraine

Dans les sections suivantes on montre les solutions envisagées pour l'emplacement de la transition entre les tronçons aériens et souterrains du REM de l'Est.

7.1.2.1. Transition à l'ouest du Pont Jacques-Cartier

Dans cette section, on analyse la possibilité de localiser la transition aérienne-souterraine à l'ouest du pont Jacques-Cartier. Compte tenu que l'avenue Papineau ne peut être fermée à la circulation véhiculaire, car elle constitue une des principales routes d'accès au pont Jacques-Cartier, et du fait qu'il y a d'autres intersections à maintenir pour permettre au trafic de passer sans aucune restriction (Av. de Lorimier et Rue Cartier principalement), il faut placer la gare Cartier en aérien à une hauteur à environ 12 m.

Avec ces conditions géométriques, le profil longitudinal est présenté à la **Figure 7.1.2.1.a**. Le tracé entre Cartier (station aérienne) et Labelle (station souterraine) aurait une pente de 5%, une pente trop prononcée pour ce genre d'infrastructure, la pente maximale du tracé hors-sol étant de 4%. De plus, les ouvrages permanents au niveau de la chaussée créeront une barrière physique d'environ 500 m et empêcheront la circulation aux intersections situées entre les rues de la Visitation et Dalcourt. Également, l'excavation en tranchée entre aussi en conflit (impossible à éviter) avec un ancien égout sur la rue de la Visitation, ce qui serait difficile à résoudre dû à sa faible pente.

Pour toutes ces raisons, on considère cette solution non-envisageable.

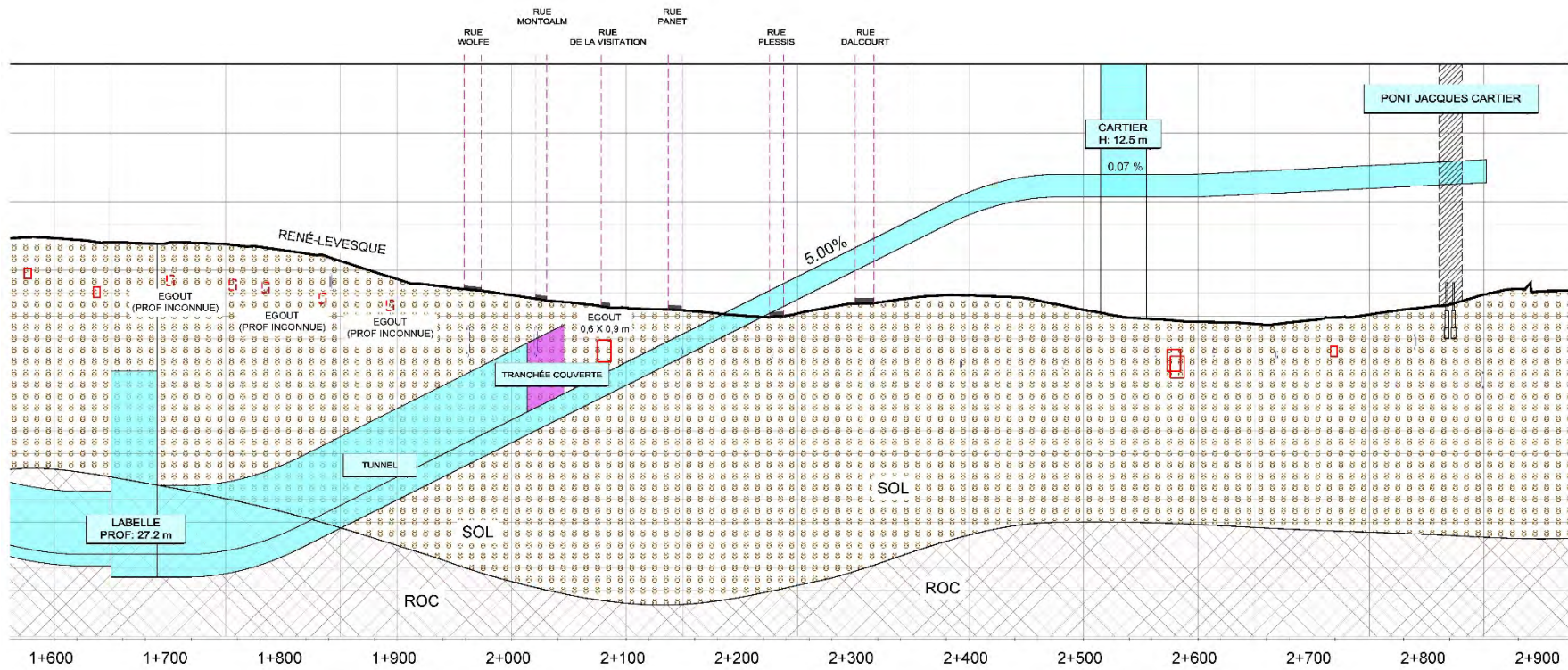


Figure 7.1.2.1.a.- Profil longitudinal de la solution avec la transition à l'Ouest du Pont Jacques Cartier.

7.1.2.2. Transition à l'est du Pont Jacques-Cartier

Si la transition aérienne-souterraine était placée à l'est du Pont Jacques-Cartier, la gare Dufresne devrait être aérienne (hauteur approx. 12 m.) alors que la gare Cartier sera souterraine. Dans le profil longitudinal proposé à la **Figure 7.1.2.2.a**, on présente un tracé qui commence à monter à partir de la station Labelle pour réduire la profondeur de la gare Cartier. Cela permet de sortir plus rapidement à la surface vers l'est. Pour ce faire, et en utilisant la pente maximale (4%), les ouvrages permanents de la transition aérienne-souterraine forceront l'interruption de la circulation aux intersections de René-Lévesque / De Lorimier et René-Lévesque / Parthenais, ce qui n'est pas envisageable. Aussi, la bretelle qui connecte la rue Notre-Dame-Est (direction Sud) et le boulevard René-Lévesque (direction Ouest) serait temporairement affectée par la construction de la partie en tranchée.

Quant aux impacts liés aux infrastructures publiques souterraines, malgré les nombreuses itérations du tracé réalisées, la transition proposée est toujours en conflit direct avec deux égouts très importants, avec des diamètres de 1,5 et 2,4 m. Ces égouts sont très anciens et ont une pente très faible, donc leur déplacement ou relocalisation serait très difficile, voire impossible. Aussi, à la hauteur de la rue Parthenais, le tracé croise un aqueduc de 2,1 m. Étant donné que le tracé aérien débute aussi à cet endroit, il semble qu'on pourrait éviter un conflit direct avec cette conduite stratégique. Toutefois, l'entretien de l'aqueduc pourrait être affecté, étant donné qu'une longueur d'environ 50 mètres resterait sous les ouvrages de transition (mur de terre armée ou similaire). Il faut donc conclure que cette option n'est pas faisable.

7.1.2.3. Transition à l'est des voies de Canadian Pacific

L'emplacement de la transition aérienne-souterraine à l'est des voies du Canadian Pacific oblige à prolonger le tunnel plus vers l'est. La gare Dufresne serait construite en souterrain avec la méthode en tranchée couverte, et le tunnel passerait sous les voies du CP, tel que montré dans la **Figure 7.1.2.3.a**.

Il faut remarquer qu'un des avantages de cette option est que le tracé traverse moins d'égouts et d'aqueducs par rapport aux autres options analysées. La solution proposée n'entre en conflit avec aucune infrastructure souterraine, égouts ou aqueducs, pas plus qu'avec des infrastructures routières existantes. Concluons que cette option est réalisable. Par contre, l'adoption de cette solution donnera une alternative plus longue, à un coût plus élevé, et évidemment, avec des risques de construction plus nombreux.

7.1.2.4. Transition à l'ouest des lignes de métro

Compte tenu des problématiques techniques identifiées préalablement, notamment le croisement des lignes de métro et les conditions géotechniques difficiles dans la portion est du centre-ville (forte épaisseur du mort-terrain, nappe phréatique élevée et présence de blocs erratiques), l'équipe de Geocontrol propose d'éviter ces secteurs à risque en plaçant cette transition à l'ouest des lignes de métro.

De plus, cette solution permet de profiter de l'importante pente du boulevard René-Lévesque à l'est de la gare Robert-Bourassa, ce qui permet une transition très courte, et, conséquemment une insertion urbaine plus facile; tel qu'on le montre sur la **Figure 7.1.2.4.a**.

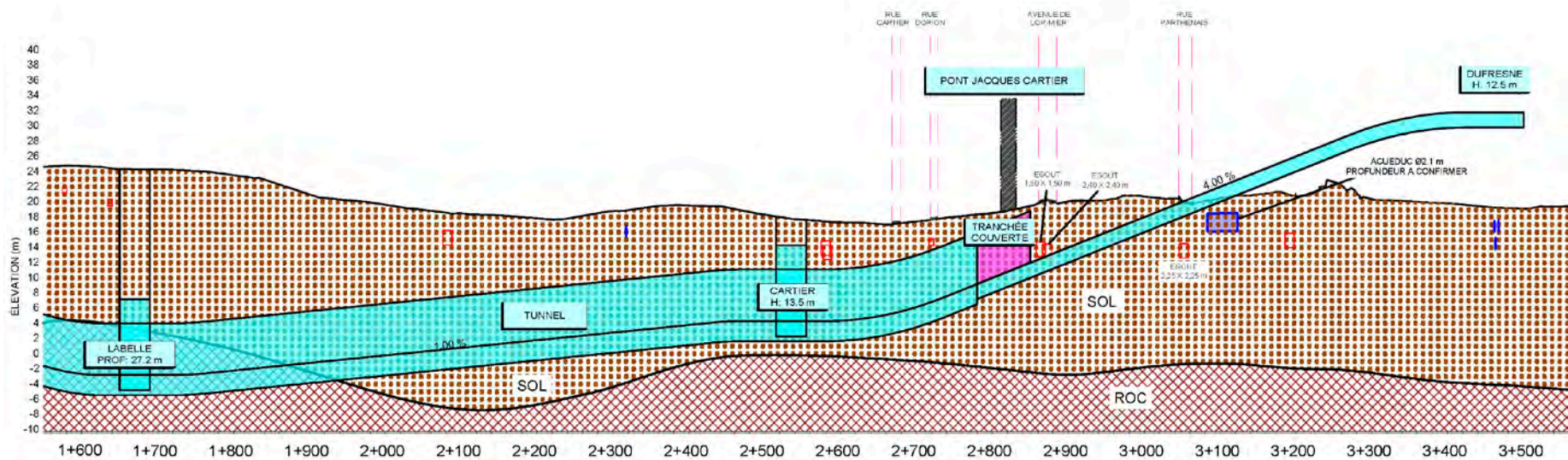


Figure 7.1.2.2.a.- Solution avec la transition aérienne-souterraine à l'est du Pont Jacques-Cartier.

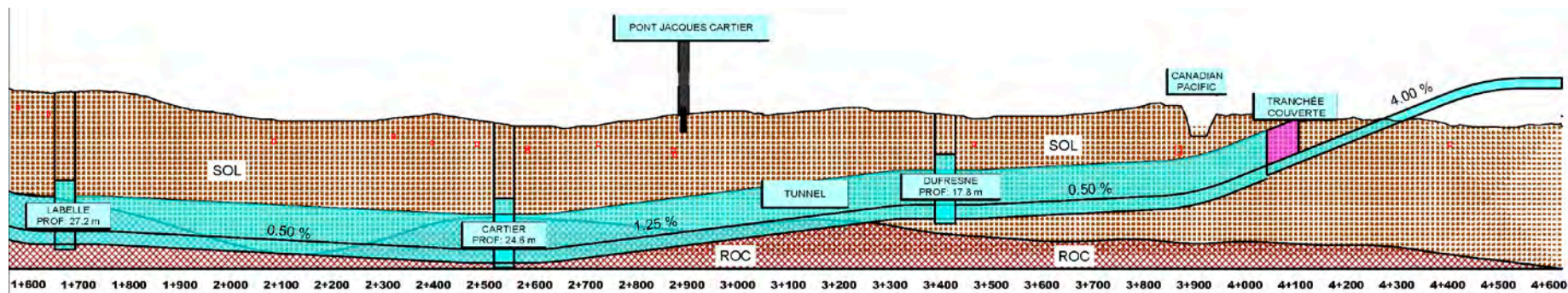


Figure 7.1.2.3.a.- Solution avec la transition aérienne-souterraine à l'est des voies du Canadian Pacific.

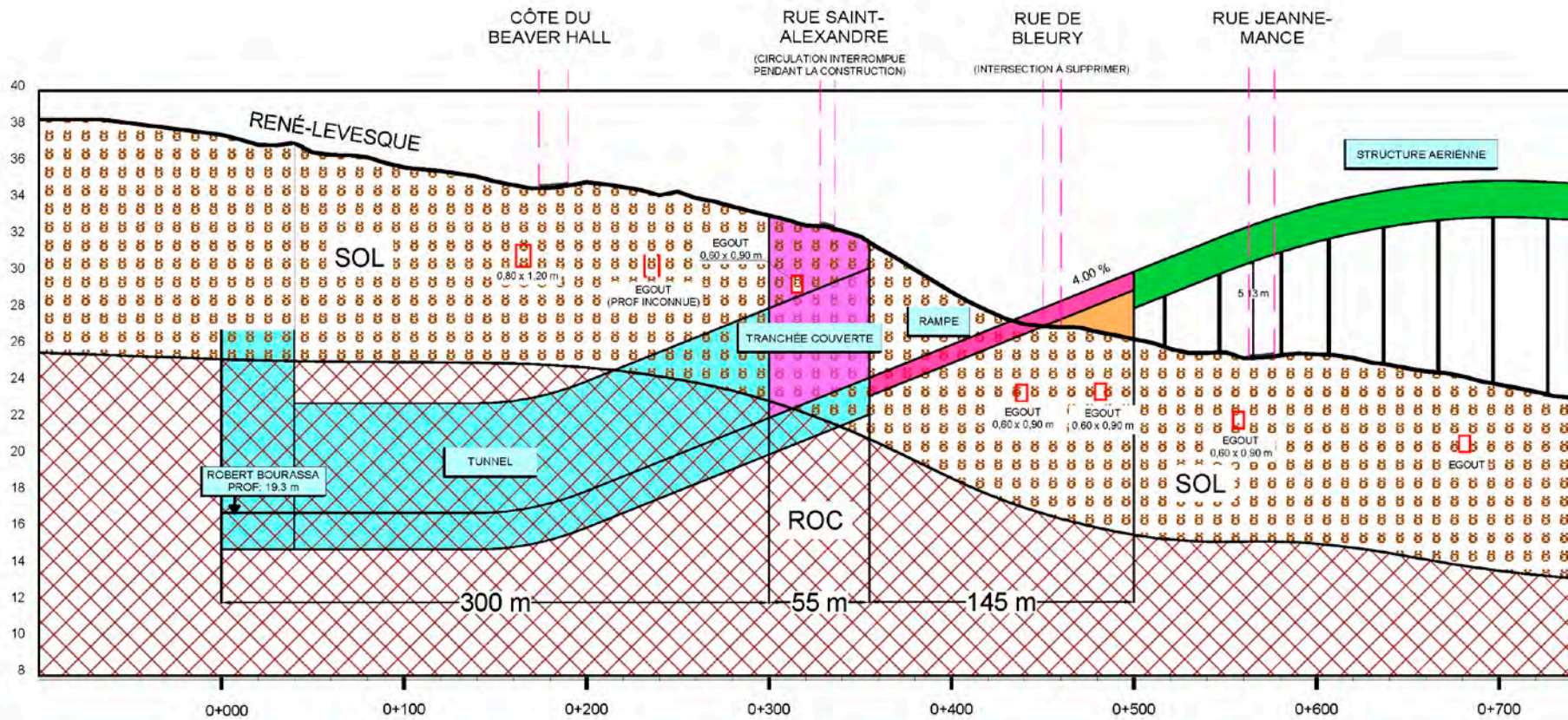


Figure 7.1.2.4.a.- Profil pour la transition à l'ouest des lignes de Métro.

Avec cette solution, la portion souterraine aurait une longueur totale de seulement 500 m dont 300 m correspondent au tunnel excavé en souterrain, 55 m à la tranchée couverte de la transition et 145 m à la tranchée qui restera ouverte après construction.

Un avantage important de cette solution est que la quasi-totalité du tronçon souterrain pourrait être excavée dans le roc et que la transition aérienne-souterraine devra être excavée dans les sols à une profondeur inférieure à 13 m. Ces conditions géotechniques favorables facilitent considérablement la construction. Compte tenu de la plus courte longueur du tunnel avec cette solution, la méthode de construction séquentielle est privilégiée. La portion en tranchée sera excavée avec des pieux sécants, directement à partir de la surface.

L'excavation du tronçon en tranchée couverte entre en conflit avec un ancien égout de 0,6 m de largeur par 0,9 m de hauteur, mais cette conduite se trouve à une profondeur réduite. Pour cette raison, le conflit représente seulement un problème pendant les travaux de construction. La faible profondeur de la conduite permettrait la construction de la dalle supérieure du tunnel qui pourrait servir d'appui à cet égout. On considère que ce conflit pourrait être facilement résolu en adaptant la méthode de construction et avec une protection adéquate.

Par rapport à l'impact sur le trafic, il faut souligner que la rue Côte du Beaver Hall ne subira aucun impact pendant les travaux. La rue de Bleury sera affectée en permanence dû à la tranchée ouverte alors que la rue Saint-Alexandre sera affectée seulement pendant la durée du chantier.

En conclusion, on considère cette solution faisable.

7.1.3. Alternatives possibles sous le boulevard René-Levesque

Suite à ce qui a été présenté dans les sections précédentes, deux solutions ont été évaluées pour croiser les lignes de métro:

- ◆ Tracé entre les deux lignes de métro.
- ◆ Tracé sous la ligne jaune.

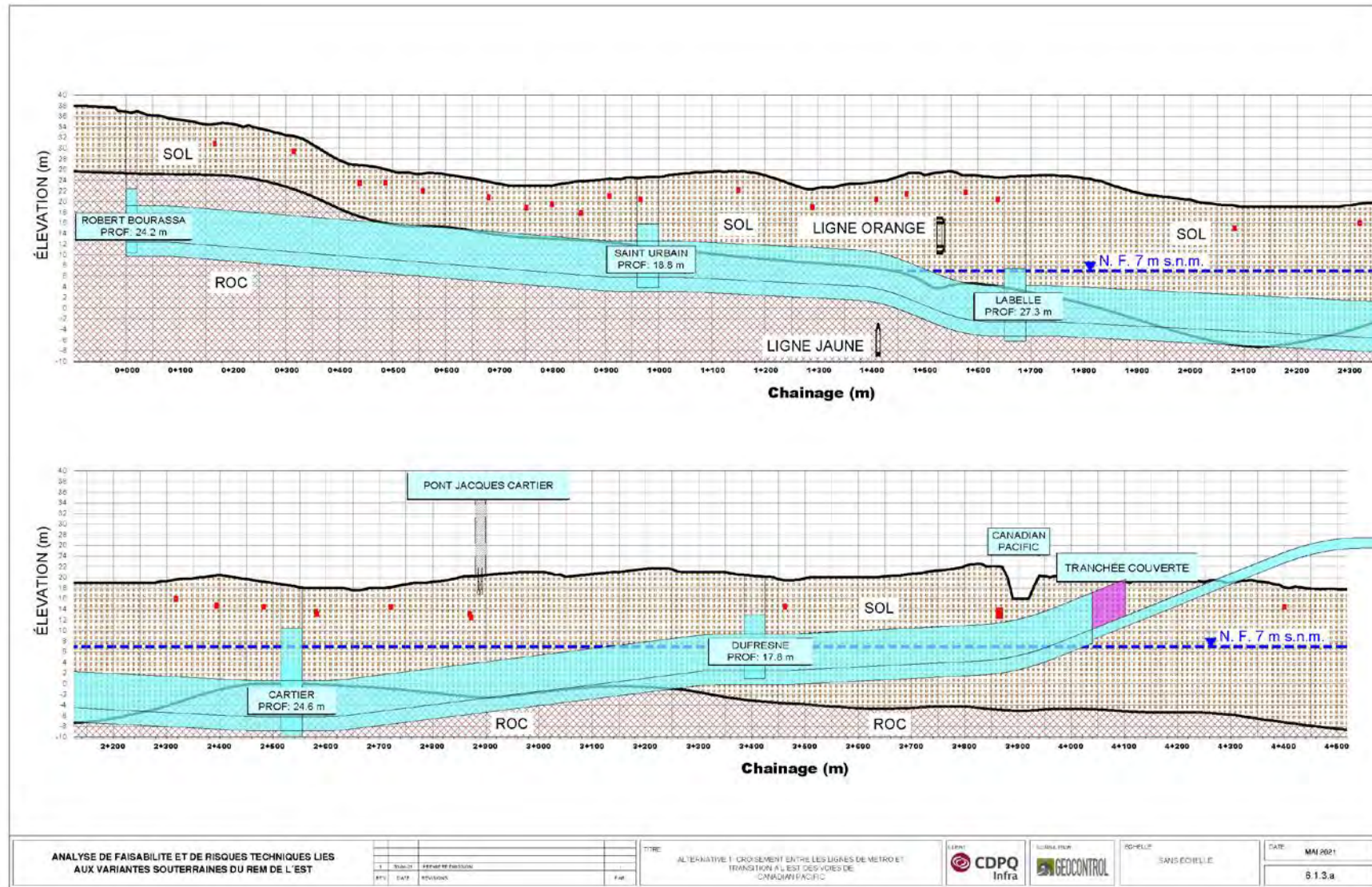
Pour l'implantation de la transition aérienne-souterraine, deux solutions ont été retenues:

- ◆ Transition à l'est des voies de Canadian Pacific.
- ◆ Transition à l'ouest des lignes de métro.

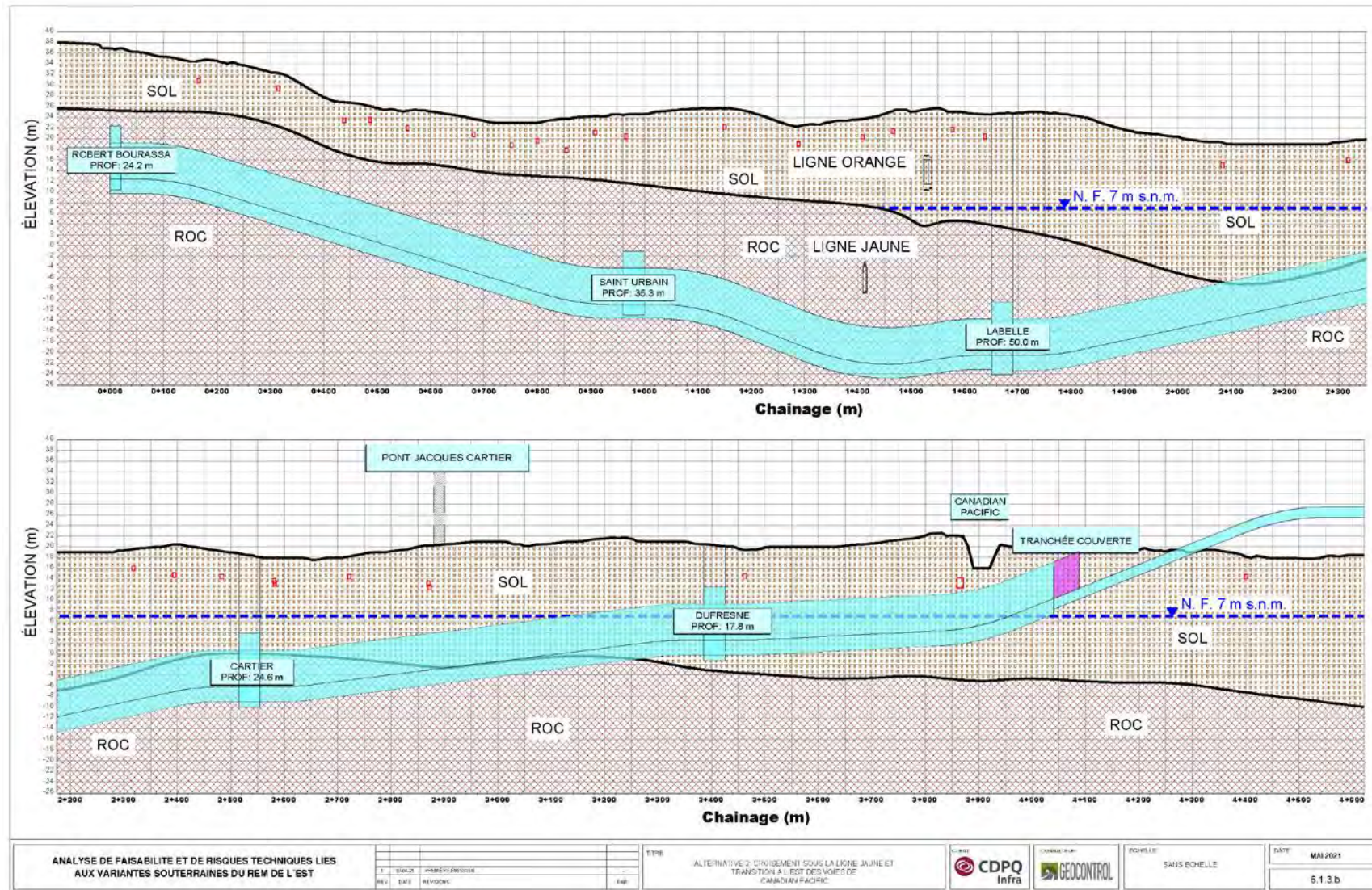
Finalement, en combinant les solutions possibles, pour l'insertion du REM de l'Est dans le centre-ville de Montréal, trois alternatives sont proposées:

- ◆ **Alternative 1.-** Croisement entre les lignes de métro avec la transition placée à l'est des voies de Canadian Pacific.
- ◆ **Alternative 2.-** Croisement sous la ligne jaune avec la transition placée à l'est des voies de Canadian Pacific.
- ◆ **Alternative 3.-** Transition placée à l'ouest des lignes de métro.

Les **plans 7.1.3.a, 7.1.3.b et 7.1.3.c** présentent les tracés pour ces trois alternatives et le **Tableau 7.1.3.d** en résume leurs caractéristiques les plus importantes.



Plan 7.1.3.a.- Alternative 1 : Croisement entre les lignes de métro et transition à l'est des voies de Canadian Pacific.



Plan 7.1.3.b.- Alternative 2: Croisement sous la ligne Jaune et transition à l'est des voies de Canadian Pacific.

Variante	Longueur totale (m)	Excavation (m)		Excavation en sol sous la nappe phréatique (m)
		Roc	Sol	
1.- Croisement entre lignes de métro et transition à l'Est des voies CP	4 050	1 690	2 820	1 860
2.- Croisement sous la ligne Jaune et transition à l'Est des voies CP	4 050	2 023	2 027	1 820
3.- Transition à l'Ouest des lignes de métro	500	260	240	-

Tableau 7.1.3.d.- Caractéristiques principales des alternatives retenues sous le boulevard René-Lévesque.

Les alternatives 1 et 2 sont semblables du point de vue de longueur et tracé en plan, mais il faut noter que le passage entre les deux lignes de métro existantes (alternative 1) est plus complexe et risqué si on le compare avec le passage sous la ligne jaune (alternative 2).

L'alternative 3 a une plus grande facilité de construction et une longueur réduite. Il convient de souligner que dans cette alternative, il n'est pas nécessaire d'excaver sous la nappe phréatique.

7.2. ALTERNATIVE SOUS LA RUE SAINT-ANTOINE

L'avantage principal du tracé du REM de l'Est sous la rue Saint-Antoine est que le tunnel ne devra croiser que la ligne Jaune. Étant donné que cette ligne a été excavée dans la roche, il y a assez d'espace pour faire passer le nouveau tunnel au-dessus de la ligne jaune.

Dans le **Plan 7.2.a** on montre le profil longitudinal de l'alternative étudiée pour construire le REM de l'Est sous la rue Saint-Antoine qui, compte tenu des nombreux égouts transversaux, considère l'emplacement de la transition aérienne-souterraine à l'est des voies de Canadian Pacific.

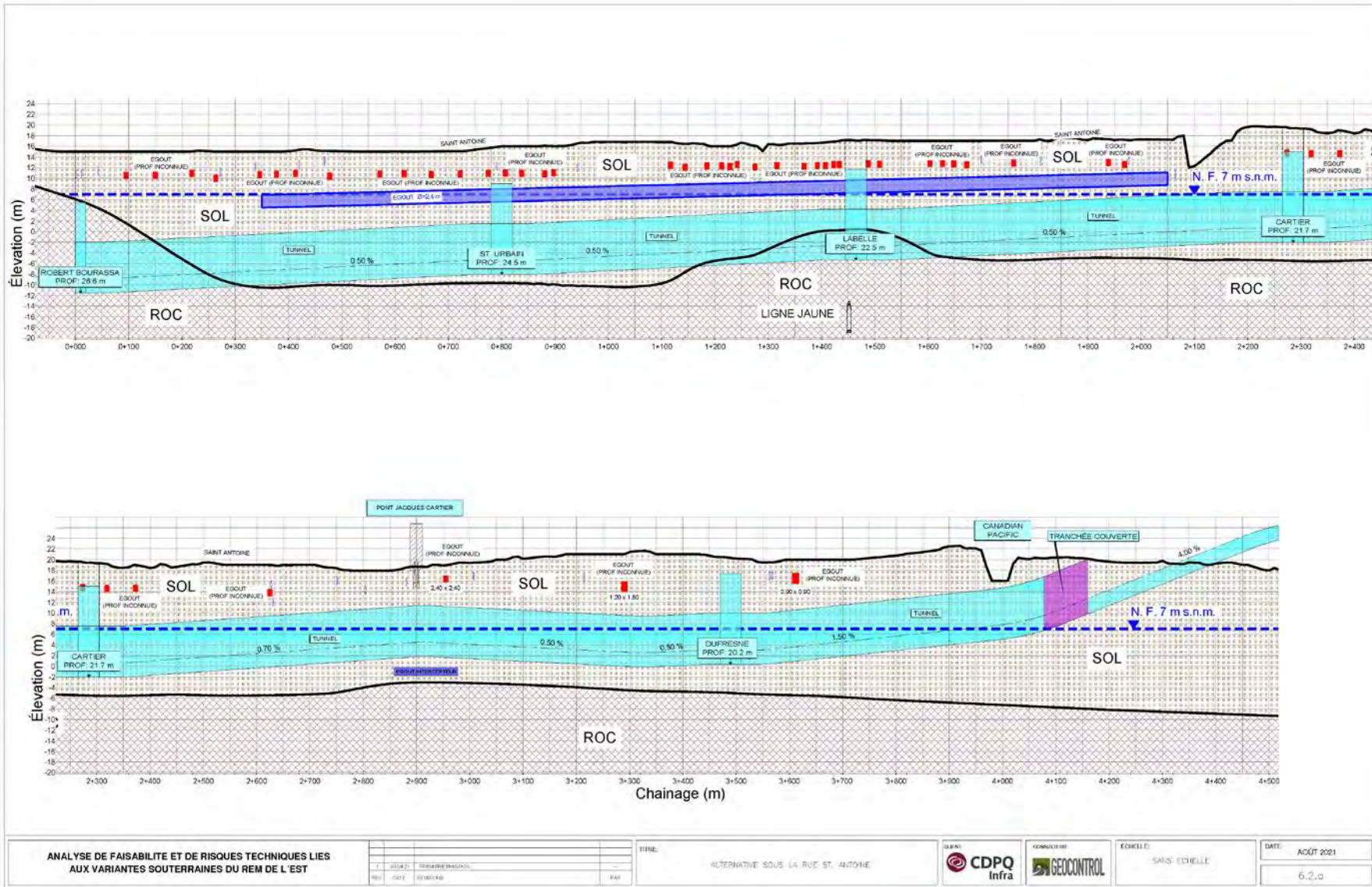
La longueur de cette alternative est de 4.500 m, la plupart excavés dans le sol et sous la nappe phréatique, mais à une faible profondeur depuis la surface.

Cette situation reste favorable pour l'excavation avec un tunnelier, type Bouclier EPB; mais le risque lié à la gestion des blocs erratiques qu'on pourrait trouver le long du tracé demeure, selon ce qui a été décrit à la section 6.2.

Compte tenu de la faible profondeur du tracé il sera possible de construire les gares avec la méthode de tranchée couverte (à l'exception de la gare Robert-Bourassa) mais la construction de ces stations au-dessous de la nappe phréatique, reste toujours assez difficile.

Une des inconvénients à considérer dans cette variante demeure les possibles conflits avec des infrastructures municipales, car le tracé proposé sous la rue Saint-Antoine est parallèle à un égout très ancien, construit en briques et d'un diamètre très important (2,4 m). Bien que le tunnel proposé passe sous ladite conduite, les stations St-Urbain et Labelle entrent en conflit direct avec celle-ci.

Il faut mentionner aussi que l'alternative 4 passe au-dessus d'un égout intercepteur de 4,3 m de diamètre à l'est du Pont Jacques Cartier. Il s'agit d'une infrastructure stratégique, raison pour laquelle le tracé a été ajusté pour garder une distance de 4-5 m. Compte tenu que le tracé en plan de cette alternative et celui de l'intercepteur sont très parallèles, le tunnel resterait au-dessus de l'intercepteur sur une longueur d'environ 160 m, ce qui pourrait empêcher le futur entretien de l'infrastructure. Aussi, il faut considérer les limitations en matière de vibrations qu'il faudra respecter pendant les travaux de construction du tunnel, ce qui aura un impact modéré sur les rendements d'excavation.



Plan 7.2.a.- Alternative sous la rue Saint-Antoine.

Par ailleurs, il faut tenir compte que la rue Saint-Antoine est assez étroite, bordée de bâtiments à proximité du tracé, ce qui augmentera le risque de mouvements induits aux bâtiments adjacents par la construction du tunnel.

À titre d'exemple, la **Figure 7.2.b** montre la section transversale la plus étroite du corridor de la rue Saint-Antoine.

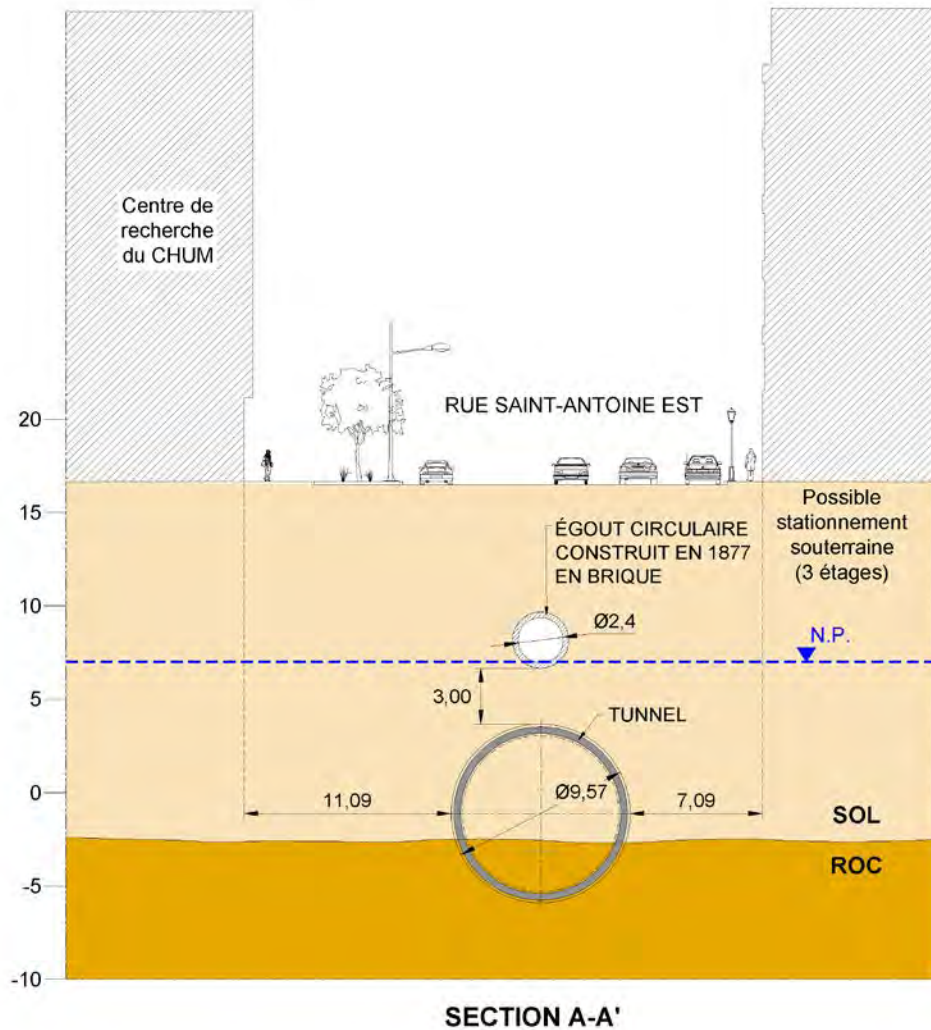


Figure 7.2.b. Section transversale du corridor Saint-Antoine au chaînage 1+348.

À cet endroit, il y a une confluence des défis techniques très importants:

- ◆ Dégagement vertical entre un ancien égout de 2,4m de diamètre et la clé du tunnel = 3m.
- ◆ Distance entre le tunnel et la ligne de façade des bâtiments = 7-11m.
- ◆ Front de taille mixte : le tunnelier doit couper le roc et le sol en même temps.

- ◆ Haute probabilité de découverte de blocs de roc erratiques dans la zone de contact sol-roc.
- ◆ Nappe phréatique au-dessus du nouveau tunnel.

Nous considérons que le tracé du REM de l'Est sous la rue Saint-Antoine n'est pas recommandable, à cause du risque posé par l'excavation du tunnel dans le sol sous la nappe phréatique ainsi que par l'étroitesse du corridor. De plus, les études d'achalandage de CDPQ Infra ont démontré que le corridor Saint-Antoine a un achalandage significativement inférieur à celui de René-Lévesque.

Dans les paragraphes suivants, on présente les résultats d'une analyse qualitative des risques réalisée pour chacune des trois variantes considérées comme techniquement réalisables.

7.3. FACTEURS DE RISQUE PLUS SIGNIFICATIFS

Pour le projet d'insertion du REM de l'Est au centre-ville de Montréal, on identifie les facteurs de risque suivants :

- ◆ Caractéristiques du terrain excavé.
- ◆ Présence d'eau au front du tunnel.
- ◆ Les conflits avec les infrastructures existantes dans la zone d'intérêt.
- ◆ Croisement des voies ferrées.

L'importance de ces facteurs est évaluée en utilisant un code de couleurs (vert, jaune et rouge) et on l'applique par tronçon sur le profil longitudinal de chacune des solutions étudiées.

Ci-dessous, on présente les critères appliqués pour le choix de la couleur qui représente l'importance de chaque facteur de risque:

- ◆ **Terrain excavé.** Tel que mentionné dans les sections précédentes, et compte tenu de la qualité de la roche, le facteur de risque de l'excavation du tunnel dans la roche est considéré de faible importance. Ces tronçons sont représentés en vert.

Cependant, dans les tronçons qui traversent des sols, le facteur de risque peut être considéré de moyenne importance, ce qui correspond à la couleur jaune.

Finalement si on trouve un front d'excavation mixte avec sols et roches, le facteur de risque est considéré élevé, car la probabilité d'avoir une entrée importante d'eau à l'intérieur du tunnel est plus élevée dans la surface de contact sol-roche. Pour cette raison-ci, on représente ce tronçon en rouge.

- ◆ **Présence d'eau au front des tunnels.** Si l'excavation est effectuée dans le roc, la présence d'eau est un facteur de risque assez faible car les débits attendus seront très peu importants. Ce risque sera représenté en vert. Dans les tronçons excavés dans des

sols au-dessus de l'élévation 7 m.s.n.m., il n'y aura que des infiltrations ponctuelles d'eau avec débits assez faibles. Le facteur de risque est considéré moyen, raison pour laquelle ces tronçons sont représentés en jaune.

Finalement, si l'excavation est faite dans des sols sous l'élévation 7 m.s.n.m., il s'agit d'une situation où on peut prévoir des infiltrations en permanence et des débits de plusieurs litres à la seconde, donc le facteur de risque est considéré élevé et la couleur du tronçon sera rouge.

◆ **Conflits avec les infrastructures souterraines publiques existants.**

L'absence d'infrastructures souterraines publiques à moins d'un rayon de 10 mètres par rapport à l'axe du nouveau tunnel représente un facteur de risque faible. Ainsi, la couleur à utiliser dans ces tronçons sera le vert.

Cependant, si cette distance n'est pas respectée la couleur deviendra jaune car le facteur de risque est considéré moyen.

S'il y a des infrastructures âgées, plus de 70 ans, à une distance de l'axe inférieure à 10 mètres, le facteur de risque est considéré élevé et ces tronçons seront dessinés en rouge.

◆ **Croisement des voies ferrées et des lignes de métro**

Si le tracé ne doit croiser aucune voie ferrée ou ligne de métro, l'importance de ce facteur de risque a été considérée faible et on utilise la couleur verte pour représenter ces tronçons.

Si le tracé doit croiser seulement une voie ferrée ou ligne de métro, on considère que ce facteur de risque a une importance moyenne et le tronçon correspondant doit être représenté avec la couleur jaune.

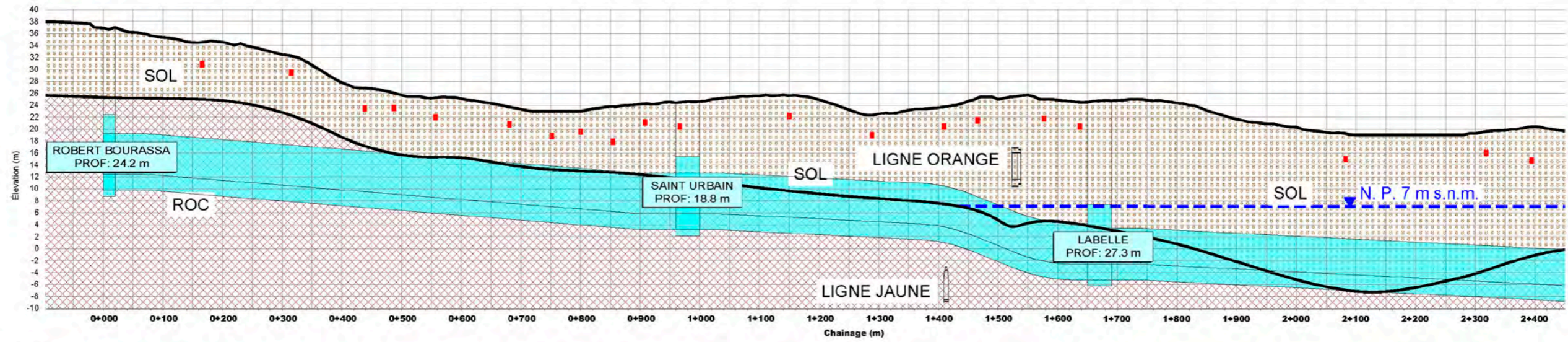
Finalement, le croisement des deux voies ferrées ou lignes de métro dans un tronçon suppose un facteur de risque important et le tronçon touché doit être représenté avec la couleur rouge.

7.4. ÉVALUATION QUALITATIVE DES FACTEURS DE RISQUE LIÉS AUX ALTERNATIVES POSSIBLES

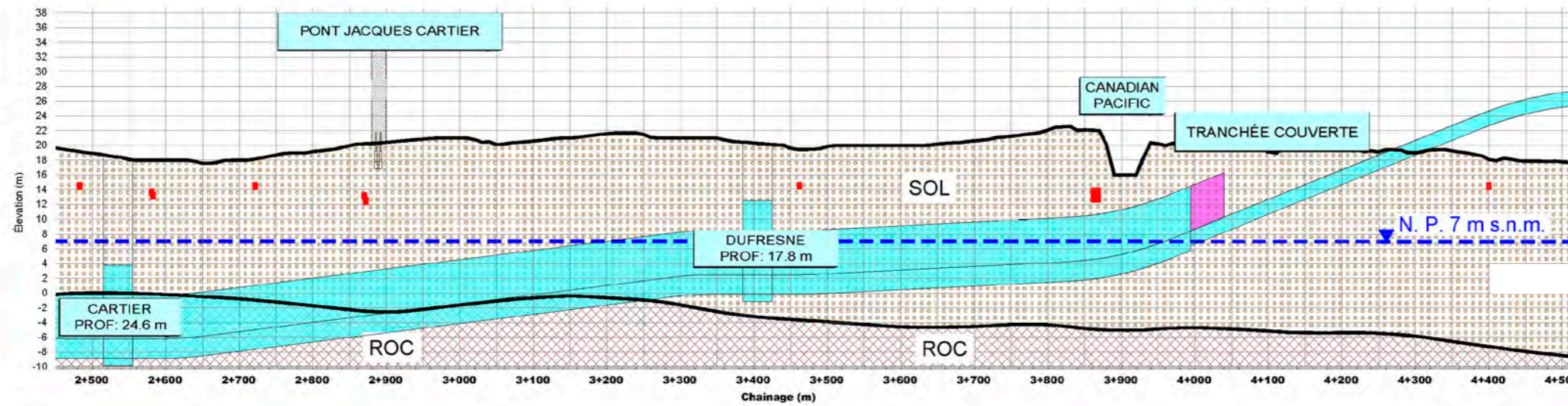
Ce chapitre présente les résultats de l'analyse qualitative de risques des trois alternatives possibles sous le boulevard René-Lévesque.

7.4.1. Croisement entre les lignes de métro et transition à l'est des voies du CP

Dans la **Figure 7.4.1.a** on présente l'évaluation de l'importance des quatre facteurs de risque analysés le long de l'alternative qui passe entre les deux lignes de métro avec la transition aérienne-souterraine placée à l'est des voies du Canadian Pacific.



FACTEUR DE RISQUE
TERRAIN EXCAVÉ
PRÉSENCE D'EAU
PROXIMITÉ D'INFRASTRUCTURES
CROISEMENT VOIES FERRÉES



FACTEUR DE RISQUE
TERRAIN EXCAVÉ
PRÉSENCE D'EAU
PROXIMITÉ D'INFRASTRUCTURES
CROISEMENT VOIES FERRÉES

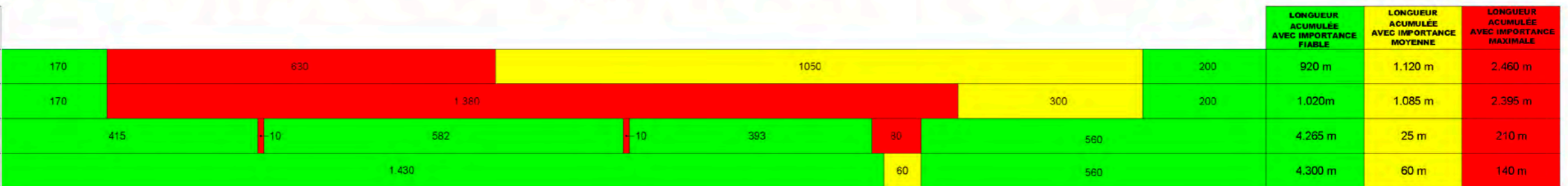


Figure 7.4.1.a.- Évaluation des acteurs de risque de l'alternative qui passe entre les deux lignes de métro avec la transition aérienne-souterraine à l'est des voies du Canadian Pacific.

Le facteur de risque le plus important est la présence d'eau dans les excavations, totalisant 2.395 m de tunnel excavé sous l'élévation 7 m.s.n.m.

Le deuxième facteur de risque en importance est le terrain excavé: 2 460 m du tracé proposé traversant un front d'excavation mixte de sol et de roche.

La proximité d'infrastructures est le troisième facteur de risque: 210 m du tracé sont affectés par des conflits avec des infrastructures publiques souterraines, auquel il faut ajouter 140m dues au croisement des lignes de métro. Bien que la longueur accumulée pour ces types de risque est inférieure aux autres deux critères, il faut tenir en compte le caractère névralgique de plusieurs de ces infrastructures.

Finalement, le croisement des voies de métro aura un impact majeur sur 140 m du tracé.

7.4.2. Croisement en-dessous de la ligne Jaune et transition à l'est des voies du Canadian Pacific

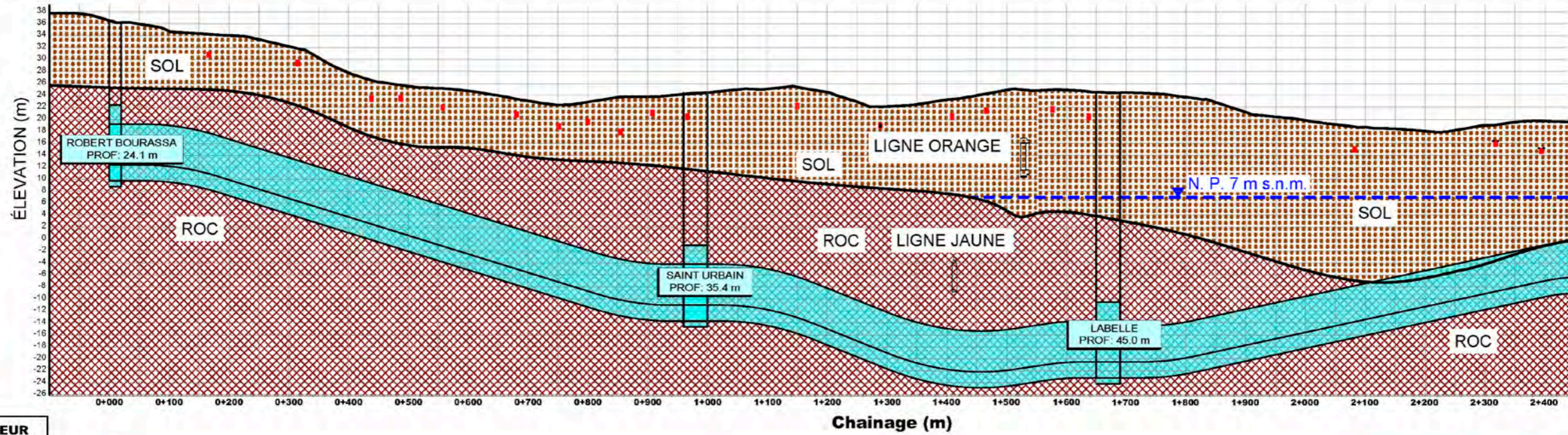
Les résultats de l'analyse des facteurs de risque sont montrés dans la **Figure 7.4.2.a**.

Le facteur de risque considéré le plus important est la présence d'eau, car 1 890 m du tracé traversent des sols sous l'élévation 7 m.s.n.m.

Le deuxième facteur de risque en importance est le terrain excavé: 960 m du tunnel auront un front d'excavation mixte.

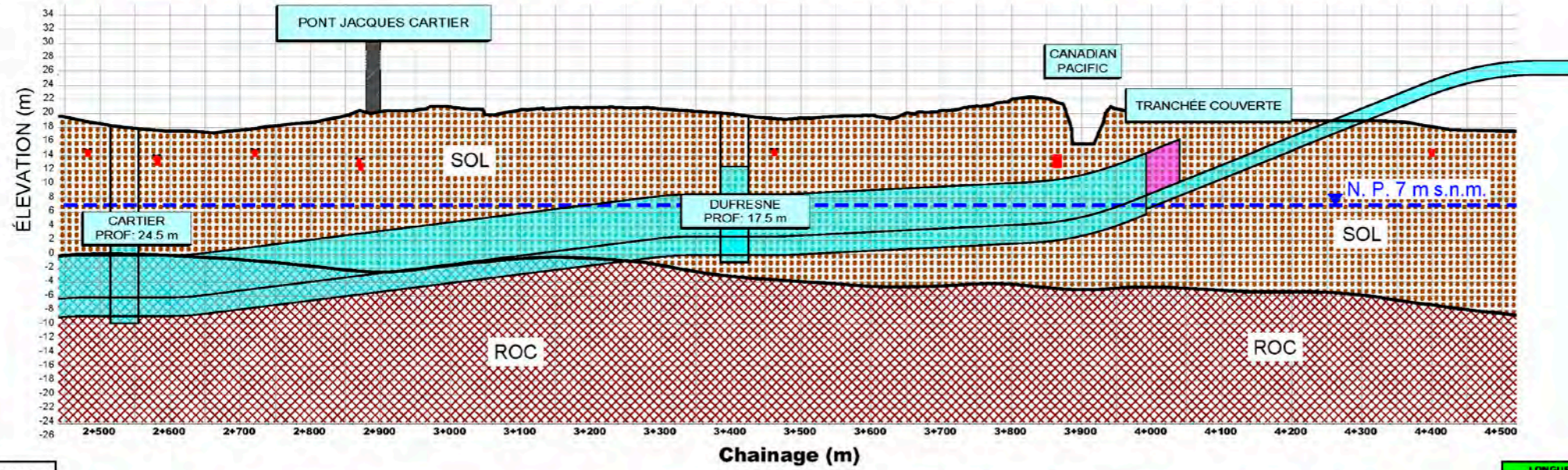
La proximité des infrastructures est le troisième facteur de risque en importance, car la longueur du tracé en conflit avec des conduites souterraines atteint une valeur de 90 m. Il faut mentionner que le risque d'affaissement d'une infrastructure existante quand le tunnel est excavé dans la roche ne pose pas de problème grave; raison pour laquelle la longueur de tunnel affectée par des conflits sévères avec des infrastructures publiques est significativement plus réduite que dans la variante précédente. Cette variante est plus profonde pour pouvoir passer sous la ligne jaune de métro, ce qui force à creuser plus de tunnel dans la roche.

Compte tenu que cette alternative ne passe que sous la ligne Jaune, le facteur de risque concernant le croisement des lignes de métro n'atteint pas le niveau le plus critique



FACTEUR DE RISQUE
TERRAIN EXCAVÉ
PRÉSENCE D'EAU
PROXIMITÉ D'INFRASTRUCTURES
CROISEMENT VOIES FERRÉES

TERRAIN EXCAVÉ	2 110	330
PRÉSENCE D'EAU	2 110	330
PROXIMITÉ D'INFRASTRUCTURES	1 400	1 020
CROISEMENT VOIES FERRÉES	1 400	1 020



FACTEUR DE RISQUE
TERRAIN EXCAVÉ
PRÉSENCE D'EAU
PROXIMITÉ D'INFRASTRUCTURES
CROISEMENT VOIES FERRÉES

	LONGUEUR ACUMULÉE AVEC IMPORTANCE FAIBLE	LONGUEUR ACUMULÉE AVEC IMPORTANCE MOYENNE	LONGUEUR ACUMULÉE AVEC IMPORTANCE MAXIMALE
TERRAIN EXCAVÉ	180	630	1 050
PRÉSENCE D'EAU	1 590	300	200
PROXIMITÉ D'INFRASTRUCTURES	1 017	10	393
CROISEMENT VOIES FERRÉES	1 410	80	560

Figure 7.4.2.a.- Évaluation des facteurs de risque de l'alternative qui passe dessous de la ligne Jaune avec la transition aérienne-souterraine à l'est des voies du Canadian Pacific.

7.4.3. Transition à l'ouest des lignes de métro

L'évaluation de l'importance des facteurs de risque de cette alternative est montrée dans la **Figure 7.4.3.a**.

La première conclusion obtenue après l'observation de la figure est que le risque associé à la présence d'eau dans les excavations et au croisement des lignes de métro n'atteint pas le niveau le plus critique.

Le facteur de risque le plus important est le terrain, car il faudra excaver 115 m dans le sol. La proximité d'infrastructures représente le deuxième facteur de risque en importance, totalisant 50 m. de tracé affecté par des conflits sévères avec des infrastructures existantes.

7.4.4. Alternative recommandée

Pour pouvoir choisir la meilleure alternative, on résume dans le **Tableau 7.4.4.a** les longueurs accumulées de chaque facteur de risque avec une importance élevée et moyenne pour chacune des trois alternatives analysées.

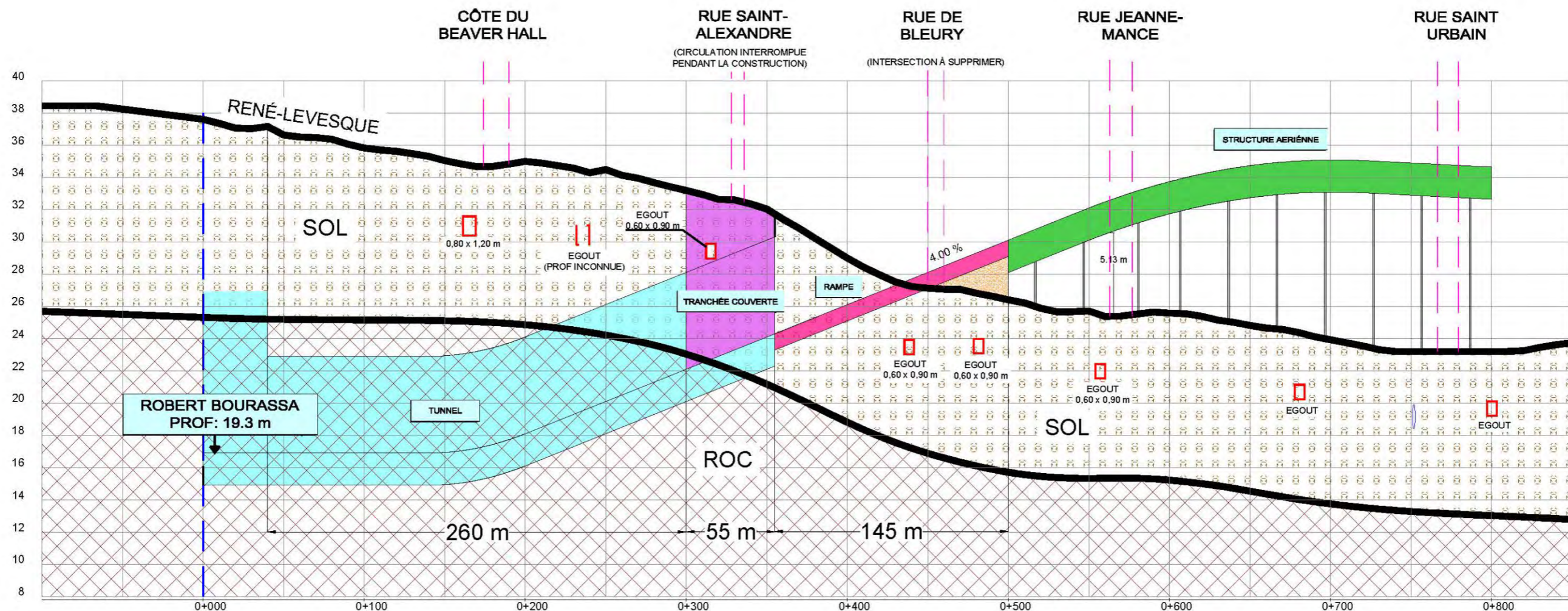
ALTERNATIVES	LONGUEUR ACCUMULÉE DES TRONÇONS AVEC FACTEUR DE RISQUE AVEC IMPORTANCE MOYENNE ET ÉLEVÉE (m)									
	Terrain excavé		Présence d'eau		Proximité d'infrastructures		Croisement des lignes		Total	
	MOY.	ELEV.	MOY.	ELEV.	MOY.	ELEV.	MOY.	ELEV.	MOY.	ELEV.
1. Croisement entre lignes de métro et transition à l'Est des voies de Canadian Pacific	1.120	2.460	1.085	2.395	25	210	60	140	2.290	5.205
2. Croisement sous la ligne Jaune et transition à l'Est des voies du Canadian Pacific	1.050	960	300	1.890	20	90	80	0	1.450	2.940
3. Transition à l'Ouest des lignes de métro	120	115	235	0	0	50	0	0	355	165

Tableau 7.4.4.a.- Longueurs accumulées de chaque facteur de risque avec une importance élevée et moyenne.

Dans le tableau précédent, on observe que l'alternative 3 a une longueur accumulée de 165 m de secteurs avec un facteur de risque maximal et 355 m de secteurs, un facteur de risque d'importance moyenne; tandis que dans les autres alternatives les chiffres correspondants sont respectivement plus de 17 fois et 5 fois plus élevées.

À la vue de ces résultats, l'alternative 3 avec la transition aérienne-souterraine à l'ouest des lignes de métro doit être sélectionnée comme étant la meilleure pour l'insertion du REM de l'Est au centre-ville de Montréal. En effet, cette alternative permet de mitiger les principaux facteurs de risques des autres alternatives, notamment le croisement des lignes de métro et les conditions géotechniques difficiles dans la portion est du centre-ville (face d'excavation mixte, nappe phréatique élevée et présence de blocs erratiques),

Il faut aussi mentionner que parmi les deux autres alternatives, l'alternative 2, qui passe en-dessous de la ligne jaune, est moins risquée que l'alternative 1 qui passe entre les deux lignes de métro. En effet, l'excavation se réaliserait principalement dans le roc, tandis que l'alternative 1 est moins profonde, ce qui oblige à excaver une longueur plus élevée à travers des sols d'origine glaciaire où la probabilité de trouver de blocs de roc erratiques pourrait occasionner des problèmes au tunnelier, en réduisant le rendement de l'excavation du tunnel. Également, dû à la présence de la nappe phréatique, la probabilité d'affaissements dans les infrastructures en surface est plus importante dans le cas de l'alternative 1.



FACTEUR DE RISQUE											LONGUEUR ACUMULÉE AVEC IMPORTANCE FIABLE	LONGUEUR ACUMULÉE AVEC IMPORTANCE MOYENNE	LONGUEUR ACUMULÉE AVEC IMPORTANCE MAXIMALE	
TERRAIN EXCAVÉ	215		115			120		50			265 m	120 m	115 m	
PRÉSENCE D'EAU	215		235								50	265 m	235 m	-----
PROXIMITÉ D'INFRASTRUCTURES	160	10	60	10	70	10	110	10	40	10	10	450 m	-----	50 m
CROISEMENT VOIES FERRÉES	500										500 m	-----	-----	

Figure 7.4.3.a.- Évaluation des facteurs de risque de l'alternative avec la transition aérienne-souterraine à l'est des lignes de métro.

8. ANALYSE DE L'ALTERNATIVE RECOMMANDÉE

Certains aspects concrets de l'alternative choisie sont discutés ci-dessous.

8.1. TYPOLOGIE DE LA GARE ROBERT-BOURASSA

Au moment de la présente analyse, nous proposons que la gare Robert-Bourassa soit construite comme une caverne souterraine, avec une longueur supérieure à 40 m, pour abriter deux voies et des quais latéraux.

L'accès à cette gare pourrait se faire à l'aide d'un puits vertical relié à la caverne de la gare à travers d'une galerie d'accès; tel que montré dans la **Figure 8.1.a**.

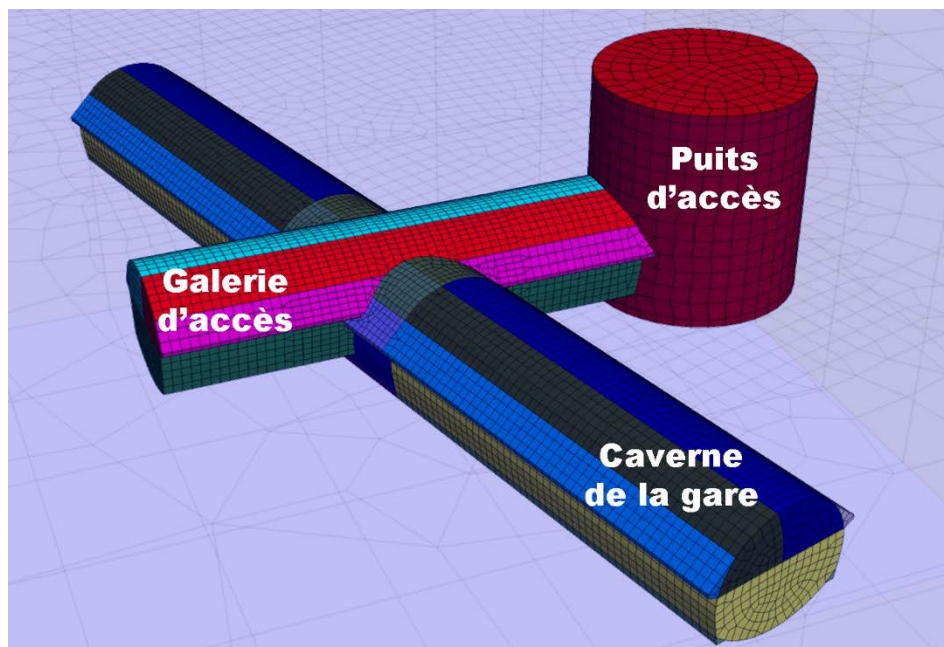


Figure 8.1.a.- Typologie typique d'une gare en caverne.

8.2. CONSTRUCTION DE LA GARE ROBERT-BOURASSA

Normalement, la construction d'une station comme celle-ci se fait à partir d'un puits d'accès qui présente l'avantage de rendre la construction de la gare indépendante du reste des travaux, avec la séquence de construction suivante:

1. Construction du puits.
2. Construction de la galerie d'accès.
3. Construction de la caverne de la gare.
4. Construction des connexions avec la Gare Centrale et le réseau souterrain de Montréal.

Tel qu'on le montre dans la **Figure 8.2.a**, le puits peut être placé sur le terrain adjacent à la Place Ville-Marie, où une surface de 1820 m² libérée de tout obstacle pourrait être occupée. Cette surface est suffisante pour les activités habituelles d'un chantier, selon l'expérience de Geocontrol dans la conception et la construction de 10 stations sur la ligne L-6 du métro de Santiago de Chili. Geocontrol a aussi participé à des études liées au puits de la station Edouard-Montpetit du projet du REM, où le chantier a occupé une surface d'environ 2.300 m².

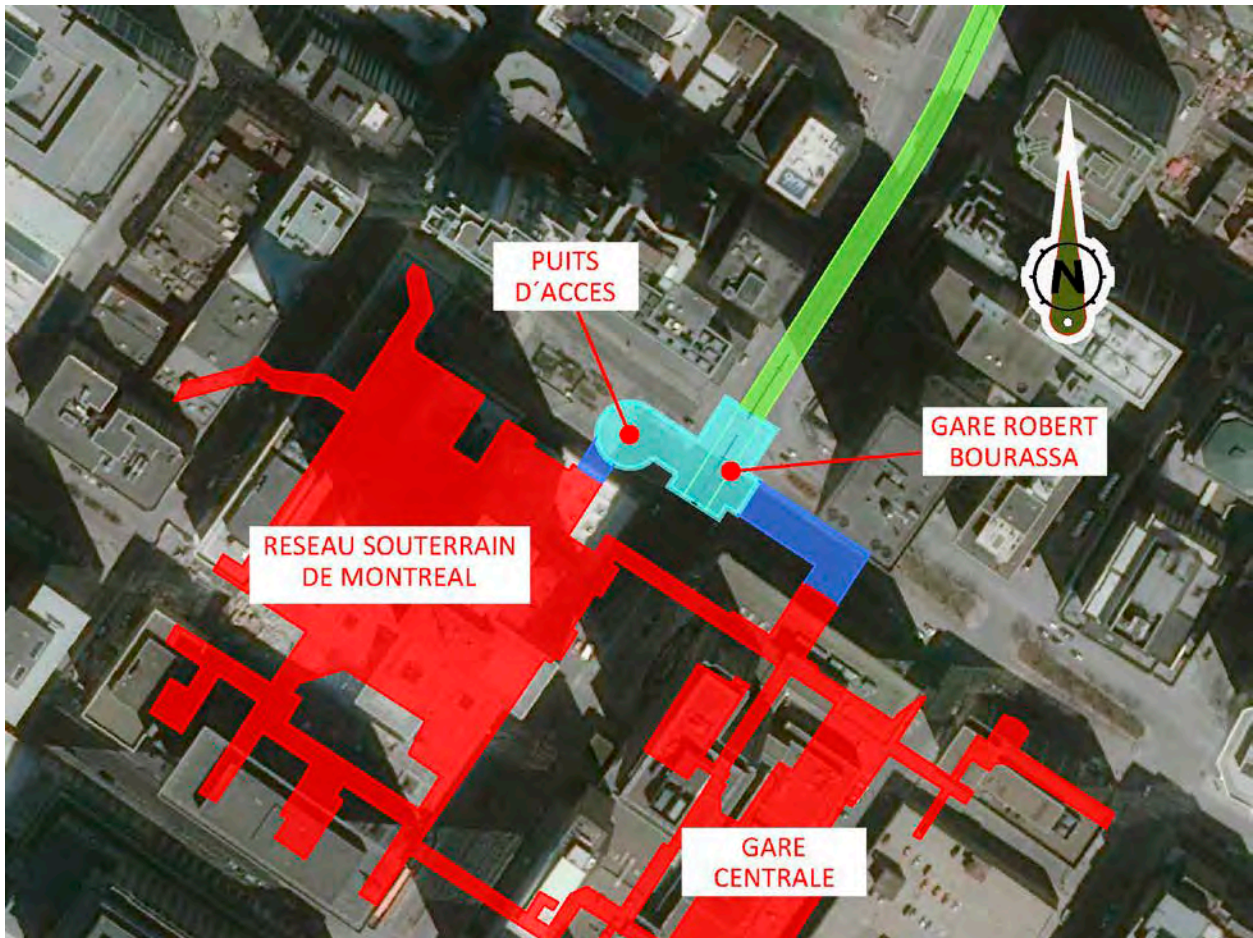


Figure 8.2.a.- Vue en plan de la gare Robert Bourassa.

La **Photographie 8.2.b** montre la vue depuis l'intérieur d'un puits construit pour la ligne 6 du métro de Santiago du Chili. On voit les équipements sur la fouille d'excavation et le convoyeur à bande verticale pour l'extraction du matériel excavé.



Photographie 8.2.b.- Puits de la ligne L-6 du Métro de Santiago de Chili équipé avec un convoyeur à bande verticale.

8.3. LIAISON GARE ROBERT-BOURASSA-RÉSEAU SOUTERRAIN DE MONTRÉAL

L'emplacement du puits d'accès à la Place Ville-Marie permet une liaison assez facile entre la gare Robert-Bourassa et le réseau souterrain de Montréal RESO, tel qu'indiqué à la **Figure 8.3.a.**

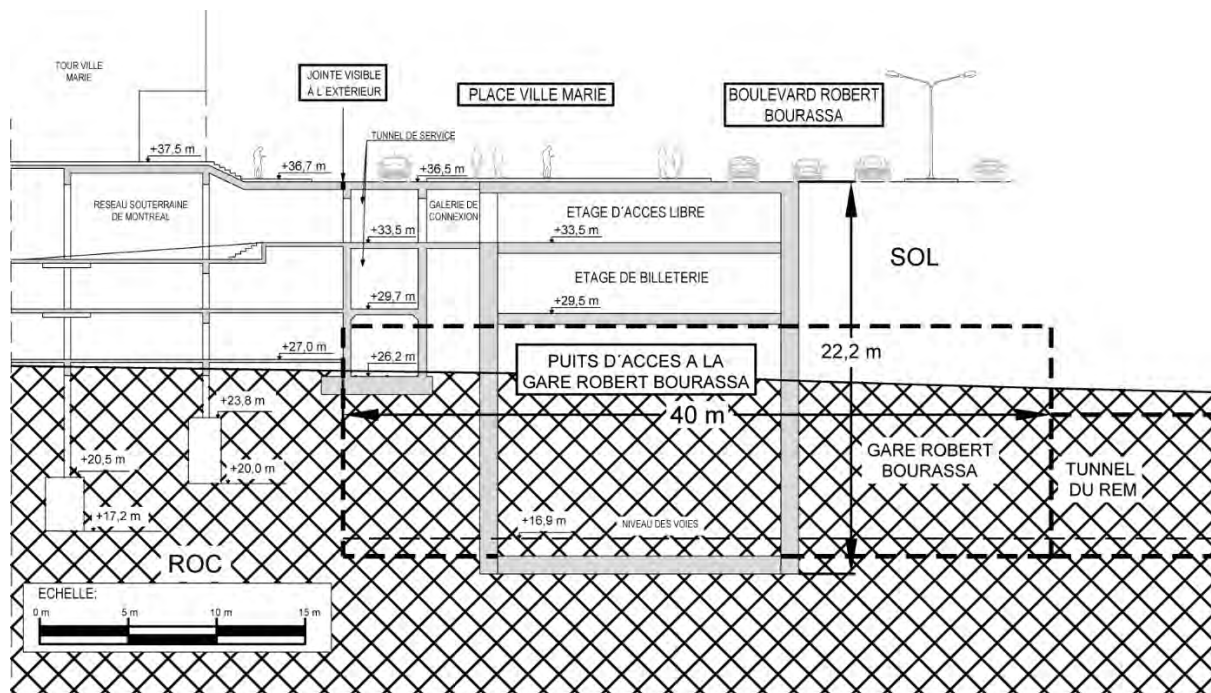


Figure 8.3.a.- Liaison gare Robert Bourassa- réseau souterrain de Montréal.

Cette connexion pourrait être faite entre l'étage de libre accès du puits et le premier étage souterrain du réseau souterrain de Montréal.

8.4. TRANSITION AÉRIENNE-SOUTERRAINE

La **Figure 8.4.a** montre le profil longitudinal de l'alternative recommandée avec la définition de la transition aérienne-souterraine, qui a une longueur de 145 m.

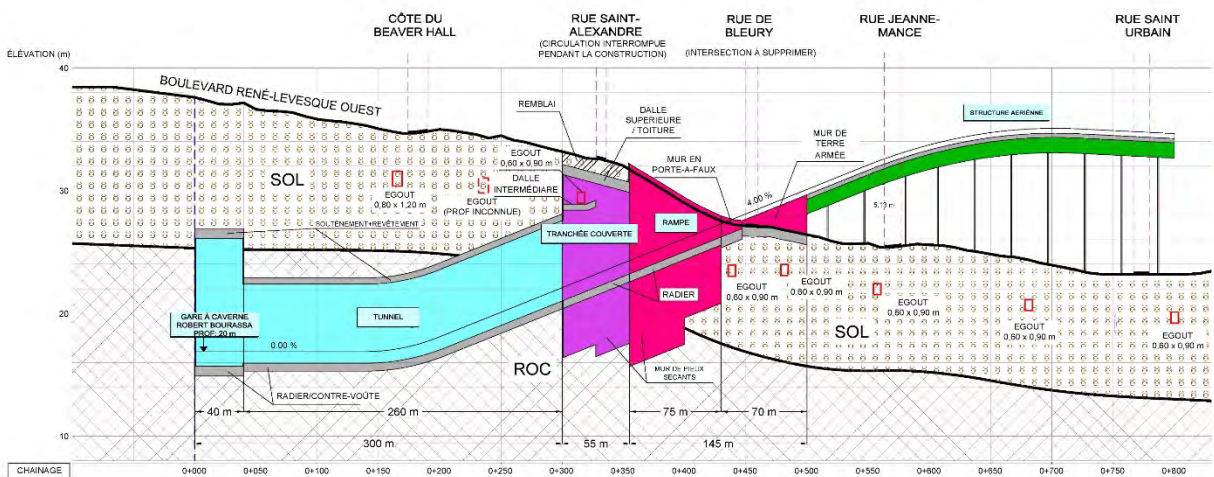


Figure 8.4.a.- Profil longitudinal du tracé de l'alternative sélectionnée.

Le tracé de cette solution aura une interférence avec un ancien égout de faible dimension. Cependant, cet élément ne sera pas endommagé pendant les travaux. Dû à sa faible profondeur, le terrain autour peut être traité avec des injections chimiques. En plus, pendant l'excavation à ciel ouvert, il est possible de réaliser une dalle en béton armé sous l'égout pour le protéger.

Pour ce qui est des interfaces avec le trafic des rues avoisinantes, les rues Beaver Hall et Jeanne-Mance ne seront pas affectées, la rue Saint-Alexandre sera fermée uniquement pendant la durée des travaux de construction et finalement, la rue de Bleury serait affectée en permanence.

Les véhicules circulant sur la rue de Bleury ne pourront pas traverser le boulevard René-Lévesque, tant pendant la durée des travaux qu'après la mise en service du REM de l'Est. Une analyse détaillée de l'impact sur la circulation devra être réalisée pour confirmer la faisabilité de cette fermeture.

8.5. ORGANISATION PRÉLIMINAIRE DE LA CONSTRUCTION ET ÉCHANCHIER PRÉALABLE

Tel que mentionné, la construction de la gare Robert Bourassa pourrait être faite à partir du puits d'accès, ce qui permettrait d'envisager deux chantiers indépendants: la gare Robert-Bourassa et la transition aérienne-souterraine.

La construction de la gare Robert-Bourassa peut être faite en deux ans selon les nombreuses expériences réalisées par Geocontrol. Par exemple, un délai de 14 à 24 mois a suffi pour bâtir chacune des stations de 120 m de longueur faisant partie de la ligne 6 du métro de Santiago du Chili, excavées entièrement dans des sols.

On considère que la construction de la transition aérienne-souterraine, avec une longueur de 200 m peut être faite dans un délai compris entre 24 et 30 mois, compte tenu que le chantier de transition se trouve au centre du boulevard René-Lévesque et que le trafic ne pourra pas être interrompu pendant les travaux.

9. CONCLUSIONS

Ce rapport technique comprend les résultats de l'analyse comparative de quatre alternatives conceptuelles pour l'intégration du REM de l'Est au centre-ville de Montréal ; trois solutions avec un tracé en-dessous du boulevard René-Levesque et une dernière sous la rue Saint-Antoine.

Afin d'identifier la meilleure solution, les données d'entrée à partir de la bibliographie liée à la zone d'intérêt ont été rassemblées. Un modèle digital 3D a été préparé, incluant les données du type de terrain, du niveau de la nappe phréatique et des infrastructures existantes.

Sur la base de l'analyse qualitative des informations incluses dans le modèle 3D, l'équipe de Geocontrol a identifié deux enjeux principaux :

- ◆ Le croisement des lignes existantes de métro (Orange et Jaune).
- ◆ Le positionnement des ouvrages permanents de la transition aérienne-souterraine, en considérant notamment la présence d'infrastructures publiques souterraines qui seront difficiles, parfois impossibles, à déplacer.

Pour chacun des enjeux, Geocontrol a identifié des alternatives possibles. En combinant ces options pour chacun des enjeux au long du tracé, Geocontrol a identifié trois solutions pour intégrer le REM de l'Est au centre-ville de Montréal:

- I. Transition à l'est des voies du Canadian Pacific en passant entre les lignes de métro.
- II. Transition à l'est des voies du Canadian Pacific passant en-dessous de la ligne Jaune.
- III. Transition à l'ouest des lignes de métro Orange et Jaune.

L'alternative en-dessous de la rue Saint-Antoine est considérée comme non recommandable en raison de sa difficulté constructive élevée ainsi que la perte d'achalandage en comparaison aux alternatives sous le boulevard René-Levesque.

Une analyse qualitative de risques a été réalisée avec les trois alternatives possibles en considérant comme facteurs de risque le type de terrain à excaver, la présence de la nappe phréatique, les infrastructures autour des tracés et le croisement des voies ferrées et des lignes de métro.

L'alternative 1 est celle qui a un profil de risque le plus élevé à cause du passage entre les lignes de métro et du fort linéaire excavé dans le sol, sous la nappe phréatique, dans un secteur où la découverte de blocs erratiques est très probable.

L'alternative 2 est moins risquée que l'alternative 1 car elle passe sous les lignes de métro et qu'une portion plus importante de son linéaire est excavée dans le roc. D'un point de vue technique, elle est donc plus recommandable que l'alternative 1. Toutefois, il demeure qu'une longueur importante du tunnel serait excavée en conditions défavorables et que la profondeur des stations pourrait les rendre plus difficile d'accès et impacter négativement l'attractivité du système de transport.

L'alternative 3 proposée par Geocontrol est celle dont le profil de risque est le plus faible. Cette alternative ne croise pas les lignes de métro ni les voies du CP, et la majorité de son excavation est effectuée dans des conditions géotechniques favorables.

Finalement, l'analyse permet de fixer comme la solution la plus intéressante celle avec la transition aérienne-souterraine à l'ouest des lignes de métro Orange et Jaune (alternative 3). Cette solution permet l'arrivée souterraine du REM de l'Est dans une portion du centre-ville de Montréal, dans le secteur de la gare terminale Robert-Bourassa, sans les inconvénients et les risques liés aux autres variantes analysés.

10. BIBLIOGRAPHIE

◆ **Berriault, A.; Simard, G.**

Carte hydrogéologique de l'île de Montréal et des îles Perrot et Bizard. Ministère des Richesses Naturelles de Québec. Service des eaux souterraines. 1978

◆ **Grice, R.H.; Eggboro, M.D.**

"Ground water of the Island of Montreal". *Water Resources Bulletin*, Paper N° 77159. 1978

◆ **Heggy Normand.**

"Assessment of surface deformations associated with groundwater dynamics". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol 53, N°12, December 2015.

◆ **Kall, R.**

"Geological characteristics of the Montreal region relevant to the disposal of liquid waste in deep wells". *Terratech*, Rapport N° 1669-01. 1984.

◆ **Prest, V.K.; Hode-Keyser, J.**

“Geology and engineering characteristics of surface deposits, Montreal Island and vicinity. Quebec”. *Geological Survey of Canada*. Paper N° 75-27. 1977.

Montréal, le 13 août 2021



Jorge Picón Couselo
Membre de l'Ordre des Ingénieurs du Québec #5080321

ANNEXE 1.- CALCUL DU ROCK MASS EXCAVABILITY (RME) INDEX POUR LES SCHISTES CALCAIRES DE MONTREAL

1. INTRODUCTION

Pour évaluer l'excavabilité des schistes calcaires de Montréal on a utilisé l'index appelé Rock Mass Excavability (**RME**), développé par Bieniawski et Alt. et présenté au congrès de l'Association Internationale des Tunnels et des espaces souterrains (ITA) en 2006. Les formules pour le calcul sont décrites en détail dans le chapitre 6 du livre: *Ground Characterization and Structural Analyses for Tunnel Design (Celada and Bieniawski; 2020)*. Ce calcul est basé sur l'évaluation des paramètres suivants:

- ◆ Résistance à la compression uniaxial de la roche intacte (0-20 points).
- ◆ Drilling Rate Index, DRI (0-15 points).
- ◆ Discontinuités au front du tunnel (0-30 points).
- ◆ Stabilité du front du tunnel (0-25 points).
- ◆ Présence d'eau au front du tunnel (0-5 points)

Immédiatement, on montre les calculs effectués.

2. RÉSISTANCE À LA COMPRESSION UNIAXIALE DE LA ROCHE INTACTE

L'influence de la résistance à la compression uniaxiale (σ_{ci}) est estimée selon le graphique montré dans la **Figure 2.a**.

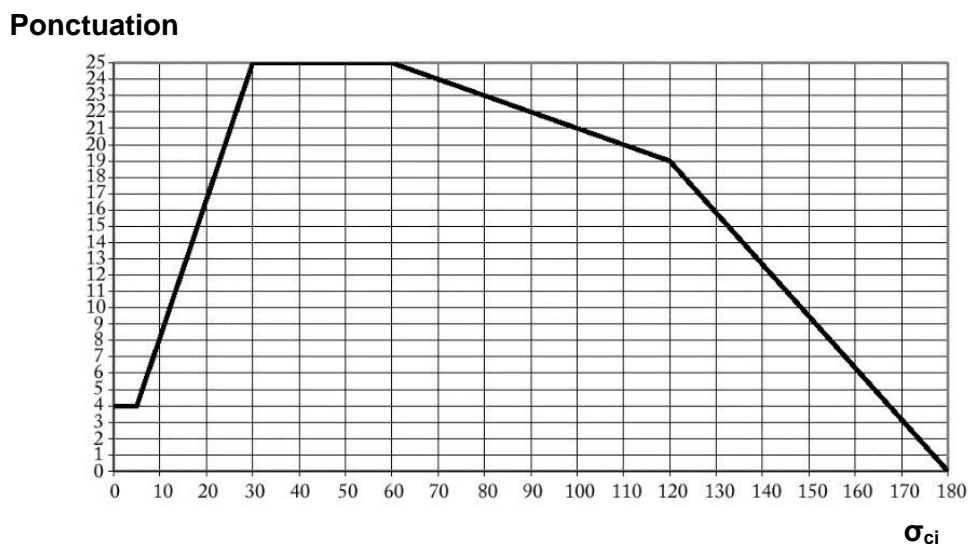


Figure 2.a.- Évaluation de la résistance à la compression simple de la roche intacte.

Dans le cas des schistes calcaires la valeur de la résistance du roc intact pourrait être comprise dans la fourchette de 40 à 60 MPa, ce qui vaut **25 points** selon la Figure 2.a.

3. D.R.I.

L'influence du facteur DRI sur l'excavabilité est estimée selon le graphique montré dans la **Figure 3.a.**

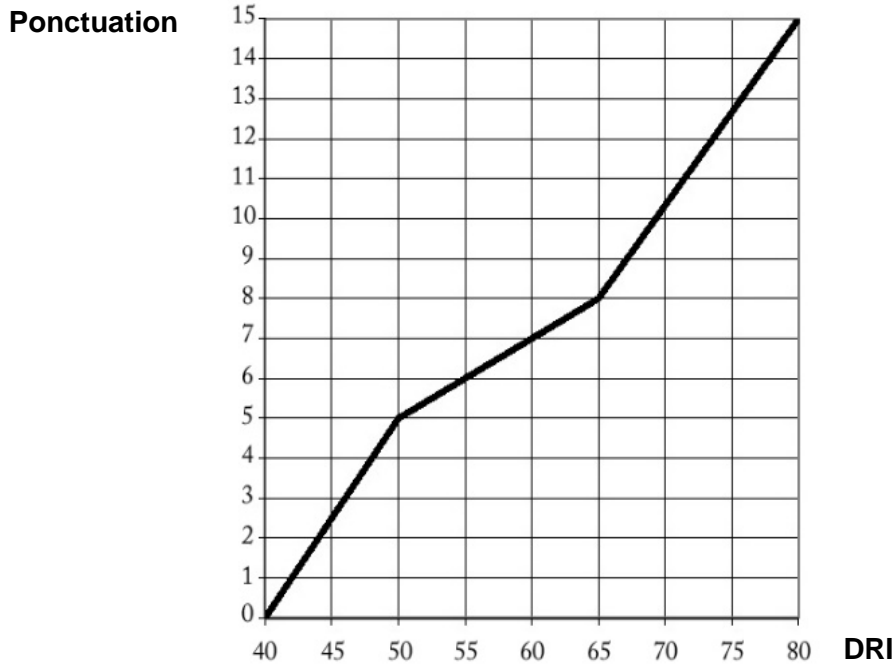


Figure 3.a.- Évaluation du DRI.

Pour estimer la valeur du DRI dans les schistes calcaires de Montréal, il est possible de s'appuyer sur le graphique de synthèse montré dans la **Figure 3.b;** la valeur moyenne du DRI pour ce type de terrain est égale à 60.

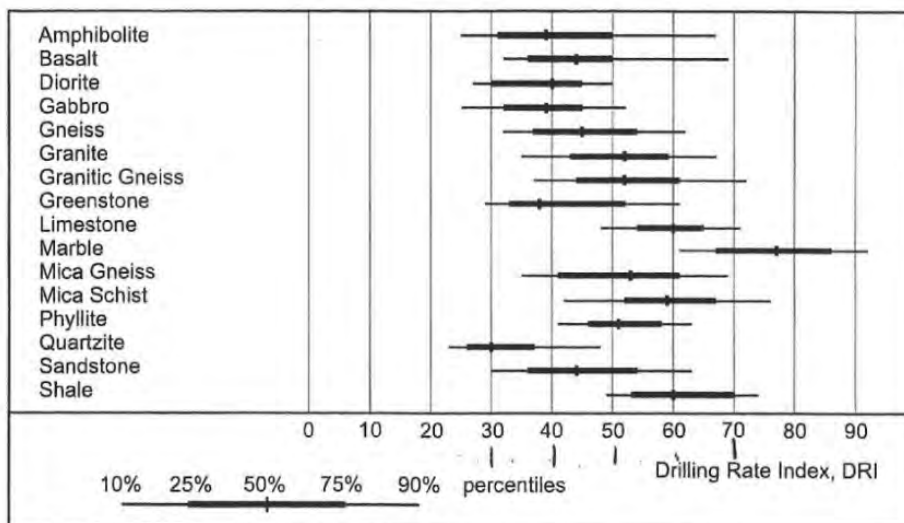


Figure 3.b.- Valeurs typiques du DRI.

Avec cette valeur $DRI = 60$, dans la Figure 2.b on obtient une ponctuation de **7 points**.

4. DISCONTINUITÉS AU FRONT DU TUNNEL

L'effet des discontinuités au front du tunnel sur l'excavabilité est évalué à partir des trois points suivants : homogénéité du terrain, nombre de joints et orientation des joints par rapport au tunnel.

Les schistes calcaires de Montréal sont complètement homogènes; ce qui équivaut donc à 10 points.

L'évolution du nombre de joints au front du tunnel est estimée selon les critères indiqués dans le **Tableau 4.a.**

Nb de joints	0-4	4-8	8-15	15-30	>30
Ponctuation	2	7	15	10	0

Tableau 4.a.- Ponctuation selon le nombre de joints au front du tunnel.

On considère que l'épaisseur moyenne des strates des schistes calcaires de Montréal, dans le pire de cas, serait égale à 5 cm. Ainsi le nombre de joints est estimé à 20 par mètre ce qui donne, selon le tableau précédant, 10 points.

Par rapport à l'orientation des joints, vu que la stratification est subhorizontale, l'orientation plus importante est la parallèle ce qui correspond à 0 points.

En résumé, l'influence des discontinuités des joints au front du tunnel pour les schistes calcaires sur l'excavabilité du terrain aura la ponctuation suivante :

- ◆ Selon l'homogénéité du terrain10 points
- ◆ Selon le nombre de joints10 points
- ◆ Selon l'orientation des joints0 points

L'évaluation des discontinuités au front du tunnel sur l'excavabilité est donc, **20 points**.

5. STABILITÉ DU FRONT DU TUNNEL

La stabilité du front du tunnel est évaluée au moyen de l'Index du Comportement Élastique (ICE) développé par Bieniawski *et al.* (2011) et estimé selon la **Figure 5.a.**

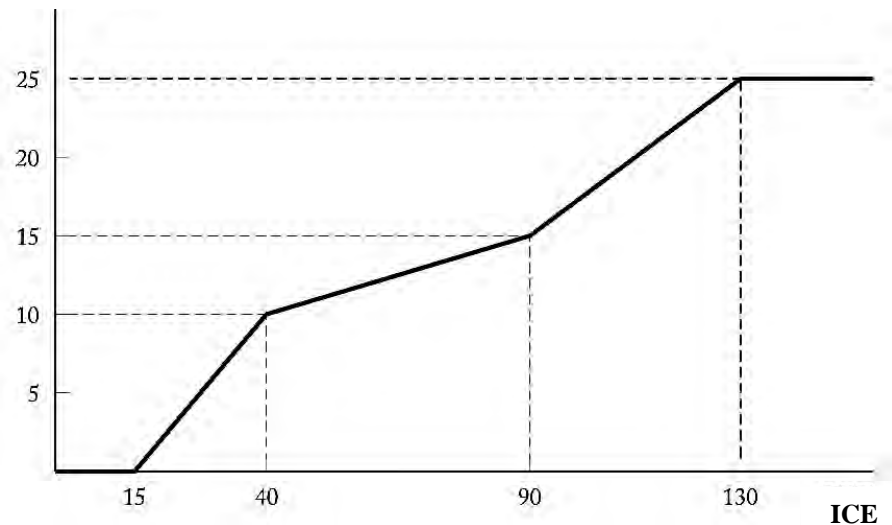
Ponctuation


Figure 5.a.- Influence de l'index ICE au front de taille.

Pour une valeur du coefficient $K_0 < 1$, le ICE est estimé grâce à l'équation suivante :

$$ICE = \frac{3704 \cdot \sigma_{ci} \cdot e^{\frac{RMR_C - 100}{24}}}{(3 - K_0) \cdot H} \cdot F$$

Avec:

K_0 = Coefficient de répartition des tensions naturelles.

σ_{ci} = Résistance à la compression uniaxiale de la roche intacte (MPa).

RMRc = Rock Mass Rating corrigé par l'orientation des discontinuités.

H = Profondeur du tunnel (m).

F = Facteur de forme, avec les valeurs de référence suivantes :

- ◆ Tunnel de section circulaire de 6m de diamètre: F = 1,3
- ◆ Tunnel de section circulaire de 10m de diamètre: F = 1,0
- ◆ Tunnel de section a « fer à cheval » de 14m de diamètre: F = 0,75
- ◆ Caverne de 25m de largeur et 60m de hauteur: F = 0,55

Dans le calcul de l'ICE il s'avère nécessaire de définir une valeur de l'index appelé Rock Mass Rating (RMR) du terrain. Celui-ci est estimé au moyen de l'addition d'une évaluation des quatre paramètres suivants:

- ◆ Résistance à la compression uniaxiale de la roche intacte (0-15 points).
- ◆ Nombre de discontinuités au front de taille (0-40 points).
- ◆ Caractéristiques des discontinuités principales (0-30 points).
- ◆ Présence d'eau dans le terrain (0-15 points).

La ponctuation de ces quatre paramètres est réalisée selon les critères indiqués dans le **Tableau 5.b.**

PARAMETRES DE PONCTUATION

RMR (1)	RÉSISTANCE À LA COMPRESSION UNIAXIAL DE LA ROCHE INTACTE								
Compression uniaxial (MPa)	>240	240 - 175	175 - 125	125 - 100	100 - 75	75 - 50	50 - 30	30 - 10	< 10
PONCTUATION	15	14	12	10	8	6	4	2	1

RMR (2+3)	ROD ET ESPACEMENT ENTRE DISCONTINUITÉS																			
JOINTS PAR m	0	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
PONCTUATION	40	37	34	31	29	28	27	26	25	23	22	22	21	20	19	18	17	16	16	15
JOINTS PAR m	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
PONCTUATION	15	14	14	12	12	11	11	10	10	10	9	9	9	8	8	8	8	8	7	7
JOINTS PAR m	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50								
PONCTUATION	7	7	7	7	5	5	5	4	4	4	4	3								

RMR (4)	CONDITIONS DES DISCONTINUITÉS				
CONTINUITÉ	< 1 m	1-3m	3-10m	10-20m	>20m
	6	4	2	1	0
OUVERTURE	0	<0,1 mm	0,1-1 mm	1-5 mm	>5 mm
	6	5	4	1	0
RUGOSITÉ	Très rugueuse	Rugueuse	Peu rugueuse	Lisse	Très lisse
	6	5	3	1	0
REMBLAIS	Aucun	Dur		Mou	
		Ouverture < 5 mm	Ouverture > 5 mm	Ouverture < 5 mm	Ouverture > 5 mm
GRADE DE METEORITATION	Pas impacté	Léger	Modéré	Haut	Décomposé
		6	5	3	1

RMR (5)	CONDITIONS HYDROGÉOLOGIQUES				
ÉTAT	Sec	Peu mouillé	Mouillé	Dégoulinant	Débit
DEBIT (l/min·m)	0	< 1	1 - 2,5	2,5 - 12,5	> 12,5
RATIO (u/σ1)	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5
PONCTUATION	15	10	7	4	0

Tableau 5.b.- Critères pour calculer le RMR (1 de 2).

II.- CORRECTION SELON L'ORIENTATION DES DISCONTINUITES

DIRECTION PERPENDICULAIRE A L'AXE DU TUNNEL				DIRECTION PARALLÈLE A L'AXE DU TUNNEL		Pendage 0°-20° Toutes les directions
Excavation vers le pendage		Excavation contre le pendage		Pend. 45-90	Pend. 20-45	
Pend. 45-90	Pend. 20-45	Pend. 45-90	Pend. 20-45	Pend. 45-90	Pend. 20-45	Moyenne
Très favorable	Favorable	Moyenne	Défavorable	Très défavorable	Moyenne	Moyenne
0	-2	-5	-10	-12	-5	-5

Tableau 5.b.- Critères pour calculer le RMR (2 de 2).

Dans le Tableau 5.b on a identifié en rouge les valeurs à considérer pour les schistes calcaires de Montréal. La ponctuation est énumérée ci-dessous:

- ◆ Résistance à la compression uniaxiale 6 points
- ◆ Nombre de joints par mètre 14 points
- ◆ Conditions des discontinuités (1+5+3+6+6) 21 points
- ◆ Conditions hydrogéologiques 10 points

La valeur du RMR des schistes calcaires est donc: 51 points.

À partir du RMR on peut classifier la qualité des terrains de 0 à 100 points, dans cinq classes avec une fourchette de 20 points pour chacune. Ainsi, la qualité des schistes calcaires est **moyenne**.

Cette valeur du RMR est lié au type du terrain, et il est nommé RMR basique. Mais il faut corriger cette valeur initiale, pour arriver au RMR_c , en fonction de l'orientation de la stratification par rapport à l'axe du tunnel excavé. Il faut donc, appliquer les critères montrés à la deuxième partie du Tableau 5.b, et pour un pendage inférieur à 20°, on corrigera avec -5 points.

Finalement, la valeur estimée du RMR_c qui représente la qualité des schistes calcaires de Montréal est de: **46 points**.

Maintenant, on calcule la valeur de l'index ICE du front du tunnel de deux voies percées dans les schistes calcaires de Montréal, avec la formule montrée précédemment et en utilisant les données d'entrée suivantes:

- ◆ $\sigma_{ci} = 45 \text{ MPa}$
- ◆ $RMR_c = 46$
- ◆ $K_0 = 0,7$
- ◆ $H = 20 \text{ m}$

- ◆ F = 0,9

Et on obtien:

$$ICE = \frac{3704 \cdot 45 \cdot e^{\frac{46-100}{24}}}{(3-0,7) \cdot 20} \cdot 0,9 = 344$$

Selon la Figure 5.a., une valeur ICE égal à 344 correspond à **25 points**.

6. PRÉSENCE D'EAU AU FRONT DU TUNNEL

L'influence de l'existence d'eau au front du tunnel sur l'excavabilité du terrain est évaluée selon le graphique de la **Figure 6.a**.

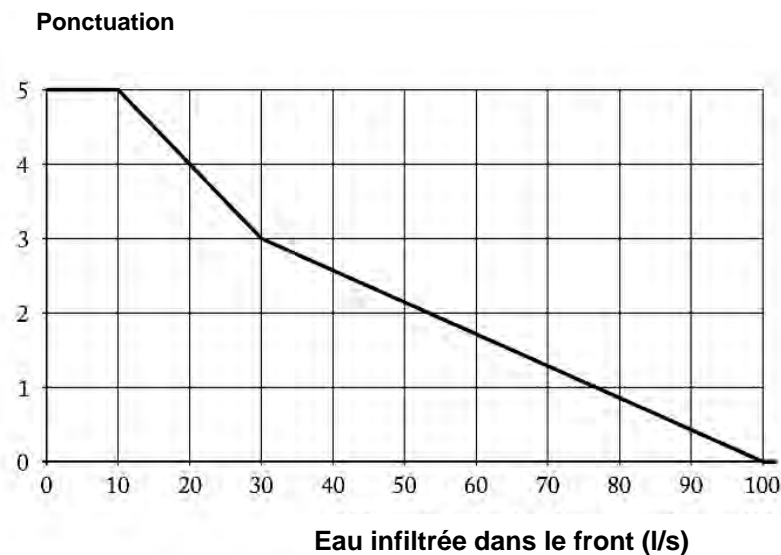


Figure 6.a.- Ponctuation du débit d'eau au front de taille.

Dans ce cas l'excavation se ferait entièrement dans le roc, qui a une perméabilité clairement inférieure à celui du dol ce qui permet d'estimer un débit d'eau infiltrée au front des tunnels inférieure à 10 l/s, Pour cela la ponctuation relative à l'infiltration de l'eau est de 5 points, selon la Figure 6.a.

Finalement, l'index **RME** des schistes calcaires de Montréal aura la ponctuation suivante :

- ◆ Selon la résistance à la compression uniaxiale 25 points
- ◆ Selon l'évaluation du DRI 7 points
- ◆ Selon les discontinuités du front du tunnel 20 points

- ◆ Selon la stabilité du front du tunnel..... 25 points
- ◆ Selon la présence d'eau au front du tunnel 5 points

La valeur du RME des schistes calcaires est donc: 82 points.

L'index RME est la base pour classier le niveau d'excavabilité du terrain en quatre classes, comme le montre le **Tableau 6.b.**

CLASSE	RME	EXCAVABILITE
1	$80 < RME < 100$	Excellente
2	$60 < RME < 79$	Très bonne
3	$40 < RME < 59$	Bonne
4	$RME < 40$	Mauvaise

Tableau 6.b.- Classification de l'excavabilité du terrain selon le RME.

Selon ce tableau précédent et la valeur obtenue de RME égal à 82, l'excavabilité du terrain dans la zone d'intérêt aura une classification de très bonne a excellente.

7. BIBLIOGRAPHIE

- ◆ **Bieniawski, Z.T.; Aguado, D; Celada, T:**
Forecasting tunneling behaviour. Tunnels & Tunnelling Int. Août, 2011.
- ◆ **Bieniawski, Z.T; Celada, B.; Galera, J.M.; Alvarez, M.**
"Rock Mass Excavability (RME) Indicator: New way to Selecting the Optimum Tunnel Construction Method". *International Tunnelling Association.* Seoul (Korea) 2006.
- ◆ **Celada, B.; Bieniawski, Z.T.**
Ground characterization and structural analyses for tunnel design. CRC Press. London, 2020.