Projet de train léger d'Ottawa, Ligne de la Confédération

Enquête et analyse : causes fondamentales de l'affaissement de la chaussée de la rue Rideau le 8 juin 2016

État du rapport (version finale) :
Révision n^{o} 2

AVIS : La version anglaise du présent document constitue le texte original qui fait foi; la version française n'est fournie qu'à titre d'information.

McMILLEN JACOBS ASSOCIATES

Le 22 décembre 2016

Page destinée à rester libre

Table des matières

1.0 Contexte 1

2.0 Profils du sous-sol avant les travaux et après l'affaissement 5

3.0 Conduites de services publics enfouies 8

4.0 Activités et calendrier d'OLRTC dans le secteur de la rue Rideau 8

4.1 Entrée ouest de la station Rideau 8

4.1.1 Installation de caissons et fuite de la tuyauterie de la conduite principale 8

4.1.2 Réacheminement et abandon de la conduite d'eau principale de 305 mm 10

4.1.3 Soutènement de l'excavation et installation de la voûte-parapluie de l'escalier mécanique 11

4.2 Partie ouest de la banquette du tunnel 11

4.3 Espace souterrain de la station Rideau 11

4.4 Partie est de la banquette du tunnel 11

5.0 Méthodes de construction d'OLRTC 12

5.1 Méthode de l'excavation séquentielle (MES) 13

5.2 Personnel de gestion et de chantier 13

5.3 Banquette du tunnel — Excavation et soutènement 14

5.3.1 Excavation 14

5.3.2 Soutènement 14

5.3.3 Puits de sondage pour l'observation 15

5.4 Espace souterrain de la station Rideau, zone T2 de la banquette du tunnel et entrée ouest : collecte de données sur le tassement des sols 16

5.4.1 Dispositifs de surveillance du tassement des sols en surface 16

5.4.2 Dispositifs de surveillance des structures 17

5.4.3 Extensomètres 18

5.4.4 Surveillance à l'intérieur du tunnel 18

5.4.5 Inclinomètre 18

5.4.6 Piézomètres 18

5.4.7 Soutènement de l'entrée ouest de la station Rideau pour la surveillance des travaux d'excavation 18

6.0 Atténuation des risques pour la conduite d'eau principale 19

7.0 Mesure du tassement des sols 20

7.1 Dispositifs de surveillance du tassement des sols en surface (DSTSS) et extensomètres 20

7.2 Dispositifs de surveillance des structures (DSS) 24

7.3 Inclinomètre 25
7.4 Piézomètres 25

8.0 Examen de l'échantillon prélevé dans la conduite d'eau principale de 300 mm 26

9.0 Résumé, conclusions et limites 27

9.1 Information et observations pertinentes 27
9.2 Scénario probable de la cause fondamentale de l'affaissement 31
9.3 Autres scénarios de la cause fondamentale de l'affaissement 31
9.3.1 Fuites préexistantes dans la conduite d'eau principale 31
9.3.2 Rupture de la conduite d'eau principale indépendante des travaux de construction d'OLRTC 32
9.4 Limites 32

Liste des tableaux

Tableau 5-1 : Sommaire des voûtes-parapluies 15

Tableau 5 2 : Sommaire des puits de sondage — Partie ouest de la banquette du tunnel 15

Liste des figures

Figure 1-1 : Affaissement de la chaussée de la rue Rideau dans le sens sud-ouest au 10, rue Rideau 1

Figure 1-2 : Affaissement de la chaussée de la rue Rideau dans le sens nord au 47-57, rue Rideau 1

Figure 1-3 : Vue à vol d'oiseau du secteur où la chaussée de la rue Rideau s'est affaissée 3

Figure 2-1 : Profil géologique du sous-sol (avant les travaux) 6

Figure 2-2 : Profil géologique du sous-sol (après l'affaissement) 7

Figure 4-1 : Modifications apportées à la conduite d'eau principale de la rue Rideau 10

Figure 5-1 : Profil du soutènement temporaire pour l'état des sols friables de la vallée glaciaire 13

Figure 5-2 : Courbe de tassement des sols selon les DSTSS — Tassement des sols et niveaux d'alerte aux DSTSS de la station Rideau 17

Figure 7-1 : Tassements mesurés aux DSTSS dans le secteur où la chaussée s'est affaissée, au chaînage 102+350 21

Figure 7-2 : Tassements mesurés aux DSTSS, entre les repères de chaînage 102+370 et 102+390 22

Figure 7-3 : Courbe des tassements mesurés grâce aux DSTSS de la station Rideau, entre les repères de chaînage 102+405 et 102+420 23

Figure 7-4: Tassements mesurés grâce aux DSS du 50 et du 73 de la rue Rideau 24

Figure 7-5 : Piézomètre 51046 : relevés du niveau de la nappe phréatique — chaînage 102+360 26

Figure 9-1 : Chaînage 102+349,5 : photographie de la calotte de l'assise rocheuse (le 8 juin 2016 à 8 h) 28

Figure 9-2 : Chaînage 102+350 : photographie de la calotte de l'assise rocheuse et des sols meubles (le 8 juin 2016 aux environs de 10 h 20, avant l'effondrement complet du front de taille)..... 28

Figure 9-3 : Photographie au 47-57 de la rue Rideau : Séparation entre le trottoir et la bordure de la rue Rideau (6 juin 2016)..... 30

Figure 9-4 : État de l'entrée ouest (extrémité ouest) le 8 juin 2016 à 8 h (avant l'affaissement) 32

Annexe 1 OLRTC, Rideau Street Watermain Leak (2015-11-13),
document n^{o} OLR-30-2-0000-MEM-0001

Annexe 2 OLRTC, Minutes of RES Meeting,
document n^{o} ORT-04-2-0000-MOI-0768,
document n^{o} ORT-04-2-0000-MOI-0769,
document n^{o} ORT-04-2-0000-MOI-0770
OLRT, RESS (Required Excavation & Support Sheet),
document n^{o} RESS-0095

Annexe 3 OLRTC, Grouting and Water Inflow Report – Chainage 102+348.5 and 102+403

Annexe 4 OLRTC, Shift Report Summary – (2016-05-24)

Annexe 5 OLRTC, Segment 2 Running Tunnels and Stations Geotechnical Instrumentation,
dessin n^{o} OLR-80-2-0000-DRD-0023

Annexe 6 DSP, Rideau Station – Settlement Trigger Level Revision,
document n^{o} DSP-86-2-RISU-MEM-0006_rev1

Annexe 7 OLRTC, Segment 2 Geotechnical Instrumentation Monitoring Wells and Piezometers,
dessin n^{o} OLR-12-2-0000-DRK-0021

Annexe 8 OLRTC, Rideau Street Utilities Mitigation,
document n^{o} OLR-30-2-RISU-MEM-0002

Annexe 9 Specific Location of Examination of 300 mm Watermain Sample,
Photos of remaining 300 mm watermain during concrete backfilling

Annexe 10 ITL Results of Initial Testing of 300 mm PVC Watermain,
document n^{o} RTG-OTT-10-2-LET-0332

Annexe 11 SGH, Preliminary Review of 9 November 2016 Integrity Testing Laboratory Report
Project 161502 – Confederation Line Project – Pipe Failure Investigation

Diffusion

Destinataire : M. Doug Sanders
Borden, Ladner, Gervais, s.e.n.c.r.l.

Expéditeur : Daniel J. Dobbels
McMillen Jacobs Associates

Document préparé par : Wayne E. Kilker
McMillen Jacobs Associates

John J. Murray
McMillen Jacobs Associates

Document revu par : Daniel J. Dobbels
McMillen Jacobs Associates

Relevé des révisions

Révision n^{o}	Date	Description
1	23 novembre 2016	Ébauche — pour discussion seulement
2	22 décembre 2016	Version finale — pour discussion seulement

1.0 Contexte

Dans l'avant-midi du 8 juin 2016, la chaussée s'est affaissée sur toute la largeur de la rue Rideau (entre le trottoir sud et le trottoir nord), soit environ 25 m, à partir d'une distance d'environ 20 m à l'est de la promenade Colonel By/promenade Sussex; l'affaissement s'est étendu sur une longueur, mesurée à la surface du sol, de 20 m vers l'est. Comme l'indiquent les **figures 1-1 et 1-2**, cet affaissement s'est produit entre le 45 et le 47-57 de la rue Rideau du côté nord et entre le 10 et le 50 de la rue Rideau (le Centre Rideau) du côté sud.

Figure 1-1 : Affaissement de la chaussée de la rue Rideau dans le sens sud-ouest au 10, rue Rideau

Figure 1-2 : Affaissement de la chaussée de la rue Rideau dans le sens nord au 47-57, rue Rideau

La **figure 1-3** représente le secteur où s'est produit l'affaissement de la chaussée de la rue Rideau, notamment les rues de ce secteur, les immeubles, les tracés de la banquette du tunnel et de la station Rideau, les conduites d'eau principales et le périmètre de l'affaissement de la chaussée.

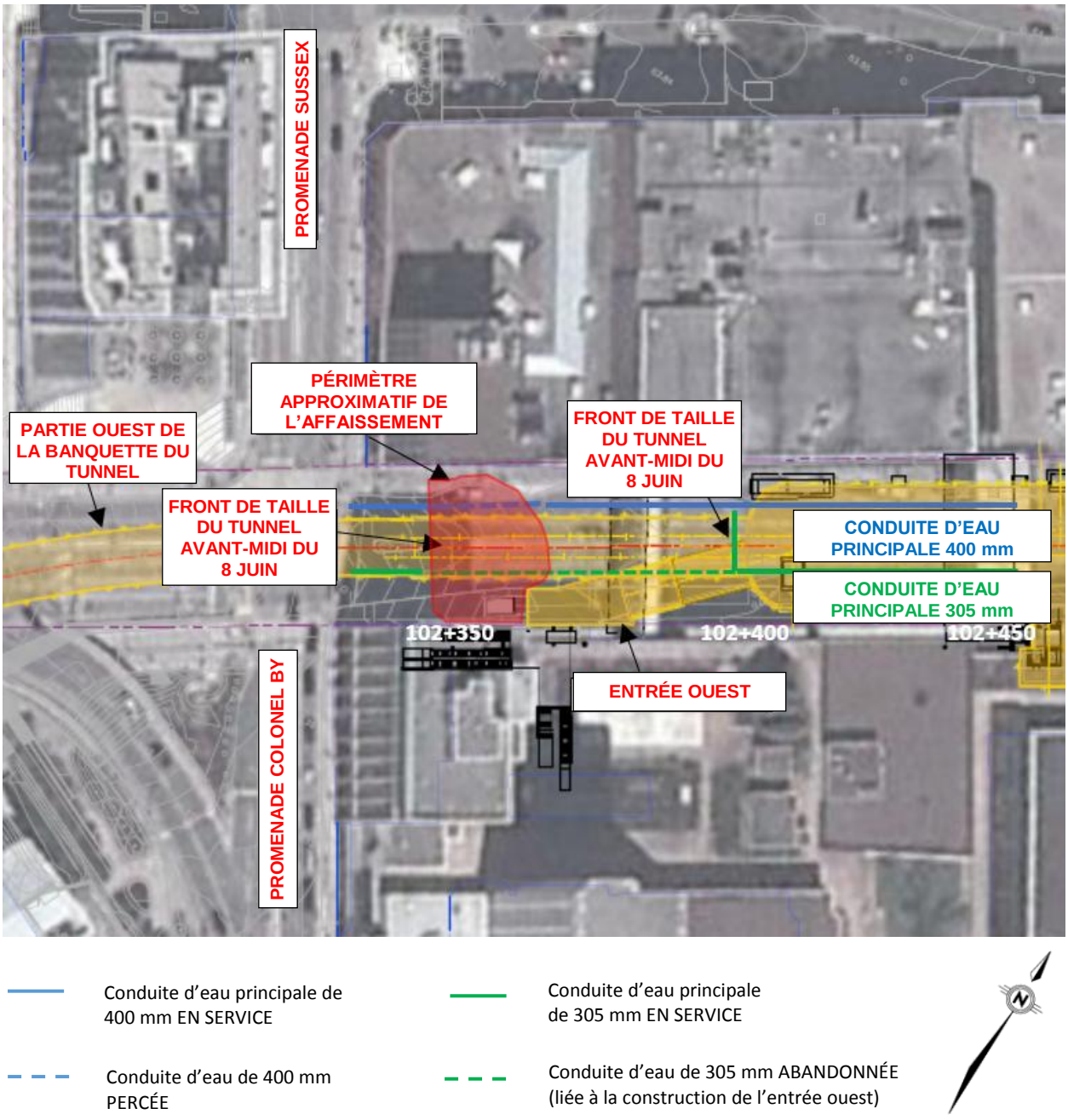

Figure 1-3 : Vue à vol d'oiseau du secteur où la chaussée de la rue Rideau s'est affaissée

Dans les semaines qui ont précédé le 8 juin 2016, dans le secteur de la rue Rideau entre la promenade Sussex et une distance de 150 m dans le sens l'est, Ottawa Light Rail Transit Constructors (OLRTC) était en train de construire l'entrée ouest de la station Rideau, de faire avancer l'excavation de la zone T2 de la section de la banquette comprise entre la station Parlement et la station Rideau (la « partie ouest de la banquette du tunnel ») et d'amorcer l'excavation de la section de la banquette du tunnel de la zone T2 de la station Rideau et de la station Parlement à partir de l'extrémité ouest de l'espace souterrain de la station Rideau (la « partie est de la banquette du tunnel »). Le 8 juin, une distance d'environ 50 m séparait la calotte de la partie ouest et celle de la partie est de la banquette du tunnel.

Voici l'état d'avancement des travaux de construction d'OLRTC dans ces trois secteurs dans l'avant-midi du 8 juin 2016, peu avant l'affaissement de la chaussée :

- Entrée ouest : cet ouvrage, situé du côté sud de la rue Rideau près de la promenade Sussex, servira à aménager la passerelle piétonnière et l'escalier roulant menant à la station Rideau. Le 8 juin 2016, cet ouvrage était constitué d'une excavation de 5 à 7 m de profondeur environ, étayée par des pieux verticaux (mini-pieux), des raidisseurs, des tirants d'ancrage, un treillis métallique et une coque de béton projeté.
- Partie ouest de la banquette du tunnel : la calotte d'avancement du tunnel sur la distance comprise entre la station Parlement et la station Rideau dans le sens ouest-est sous le centre de la rue Rideau se trouvait au chaînage 102+350 du tunnel, soit à peu près à l'endroit où s'est produit l'affaissement de la chaussée sur la surface ouest.
- Partie est de la banquette du tunnel : la calotte d'avancement du tunnel pour la banquette entre la station Rideau et la station Parlement dans le sens est-ouest sous le centre de la rue Rideau se trouvait dans le secteur approximatif du chaînage 102+400, à environ 30 m à l'est de l'endroit où s'est produit l'affaissement de la chaussée sur la surface est.

Cet avant-midi-là, OLRTC travaillait dans les trois secteurs ci-dessus. Selon les comptes rendus, le secteur proche de l'extrémité ouest de l'excavation de l'entrée ouest avant le début de l'affaissement de la chaussée était sec et stable. Or, après le début de l'affaissement, les mini-pieux et le garnissage étayant l'excavation dans le secteur se sont effondrés. On croit savoir que dès les premiers signes de l'affaissement, l'équipe de travailleurs avait quitté le secteur en remontant à la surface pour sortir par le secteur de l'entrée ouest.

On croit aussi savoir, à partir de l'examen des documents fournis par OLRTC, que dans la calotte de la partie ouest de la banquette du tunnel, de fortes quantités de sols et d'eau sont tombées du front de taille de la calotte dans le tunnel entre 10 h 15 et 10 h 30. En particulier, les documents examinés comprennent l'affirmation suivante à propos de ce qui a été observé dans la calotte : « De 10 h 15 à 10 h 30 : le dernier puisard a révélé un sol meuble au milieu du front de taille. Lorsqu'on a arrêté l'excavatrice, des morceaux du front de taille se sont mis à se détacher. Lorsqu'un de ces morceaux s'est détaché, un fort courant d'eau boueuse s'est mis à ruisseler. Après une quinzaine de secondes au cours desquelles l'eau a continué de ruisseler sans diminuer de débit, de gros morceaux ont commencé à se détacher du front de taille. Tous les travailleurs et contremaîtres aux avant-postes ont alors décidé de s'éloigner du front de taille ».

L'affaissement n'a pas eu, selon les comptes rendus, d'impact direct dans la calotte de la partie est de la banquette du tunnel, tout juste à l'ouest de l'extrémité ouest de la station Rideau, à 30 m environ à l'est du secteur où la chaussée s'est affaissée.

2.0 Profils du sous-sol avant les travaux et après l'affaissement

Le tronçon du tracé du tunnel longeant la rue Rideau à l'est de la promenade Sussex repose sur une vallée glaciaire (appelée généralement, dans les présentes, le « sol meuble », pour la distinguer de l'« assise rocheuse ») qui s'étend sur une largeur (mesurée à la surface du sol) de l'ordre de 125 m dans le sens ouest-est et dont la profondeur peut atteindre 35 m. En général, cette vallée est orientée essentiellement dans le sens nord-sud. Les **figures 2-1 et 2-2** représentent respectivement le profil géologique du sous-sol avant les travaux, au moment de la phase de la conception préliminaire (2011-2012), et le profil géologique du sous-sol après l'affaissement.

La **figure 2-1,** qui se fonde sur les forages d'essai menés durant la phase de l'ingénierie préliminaire du projet et qui est reproduite dans l'Entente du projet, indique que le profil géologique longeant le tracé du tunnel était constitué d'environ 3 m de remblai recouvert de couches d'argile dont la profondeur était limitée et qui étaient elles-mêmes recouvertes d'une couche de 25 à 30 m de till de consistance variable. Les relevés de forage représentés dans la **figure 2-1** indiquent qu'environ 75 % des sols dans l'ensemble de la vallée devaient normalement être constitués de sable silteux, de sable et de sable-gravier et qu'environ 25 % devaient normalement être constitués de sable essentiellement silteux et de petites quantités de remblai et d'argile près de la surface. Plusieurs de ces forages ont révélé des couches de sable silteux d'environ 25 m de profondeur.

Or, les forages effectués près des limites ouest et est de la vallée ont révélé des couches de sable moins silteux de 15 à 20 m de profondeur et des couches encore plus profondes de sable et de gravier.

Les forages d'essai menés après l'affaissement et les essais au pénétromètre à cône (EPC) ont confirmé la nature généralement plus granulaire des matériaux du sous-sol près de l'horizon du tunnel aux limites ouest de la vallée glaciaire.

Les niveaux de la nappe phréatique dans ce tronçon de la rue Rideau au moment des études de la phase de l'ingénierie préliminaire de 2010-2012 étaient de l'ordre de 4 m à 6 m sous la surface du sol, ce qui correspond à une charge hydrostatique de l'ordre de 15 m au-dessus du niveau de la couronne de la partie ouest de la banquette du tunnel.

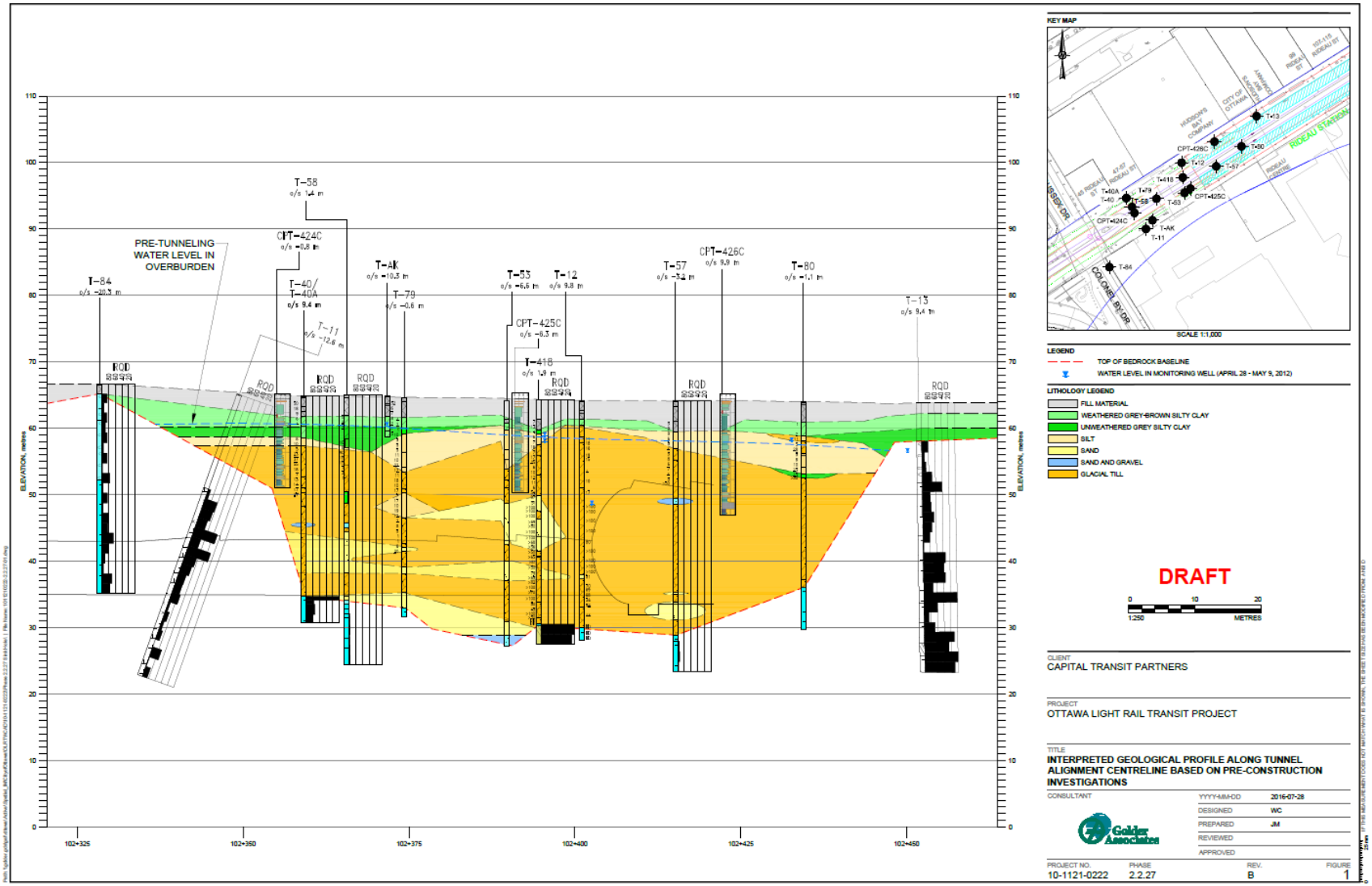

Figure 2-1 : Profil géologique du sous-sol (avant les travaux)

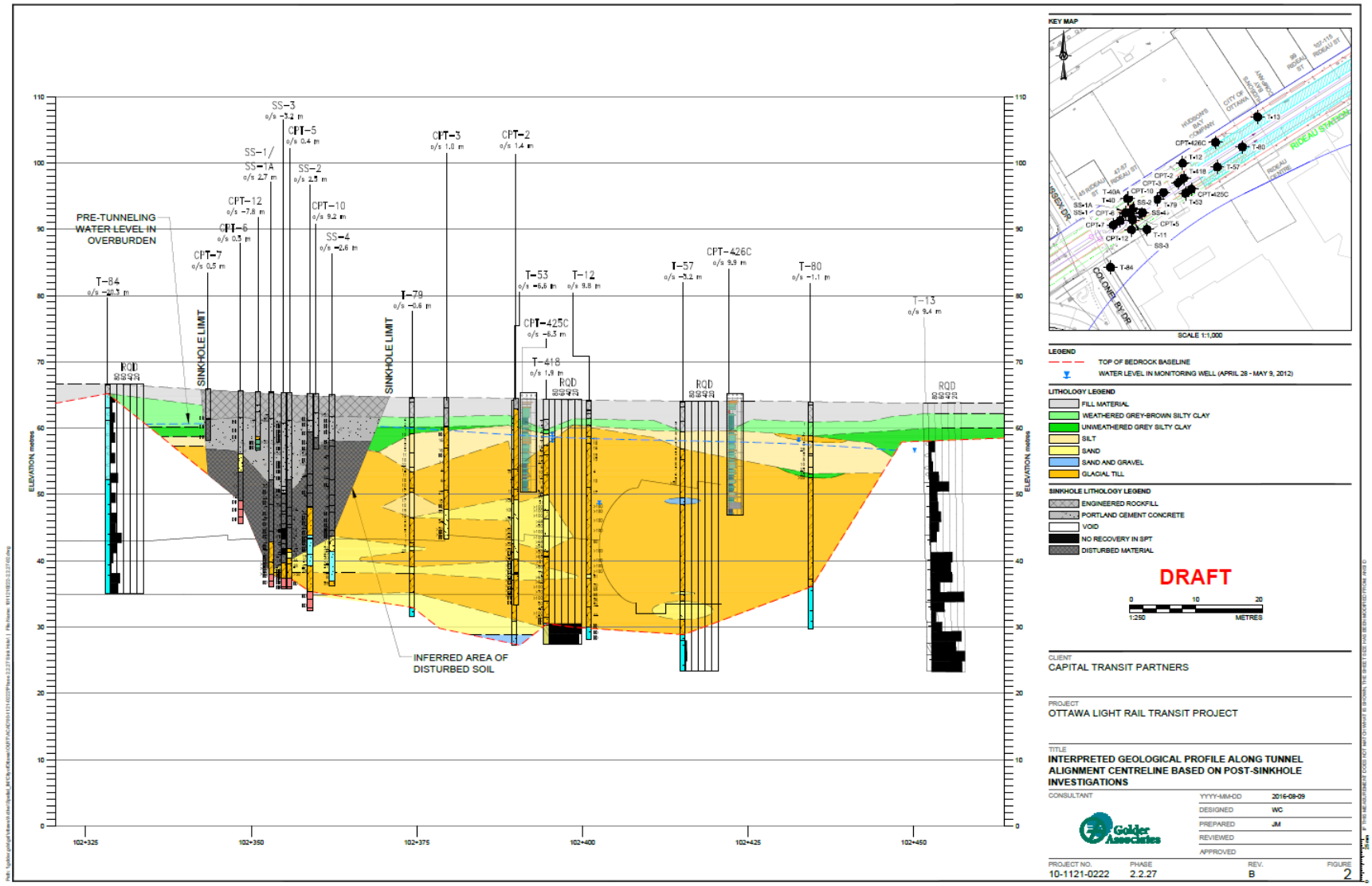

Figure 2-2 : Profil géologique du sous-sol (après l'affaissement)

3.0 Conduites de services publics enfouies

Les conduites de services publics enfouies dans le secteur où la chaussée s'est affaissée, généralement à une profondeur de 2 à 3 m sous la surface du sol, étaient constituées d'un ensemble de tuyaux et de conduites en service, ainsi que d'un certain nombre de services publics en place abandonnés. Voici notamment les conduites de services publics en service qui ont toutes été détruites ou qui ont subi des dégâts dans une certaine mesure :

- deux conduites d'eau principales (en fonte ductile et en PVC de 305 mm de diamètre et en PVC de 400 mm de diamètre) de la Ville d'Ottawa (cf. la figure 1-3);
- une conduite d'eau principale latérale de la Ville d'Ottawa avec raccord d'accouplement à joint de dilatation flexible au 41, rue Rideau;
- une conduite d'égout pluvial en béton (de 600/750 mm de diamètre) de la Ville d'Ottawa;
- une conduite d'égout domestique en béton (de 375 mm de diamètre) de la Ville d'Ottawa;
- une conduite de gaz en polyéthylène (de 100 mm de diamètre) d'Enbridge;
- un caniveau de canalisations électriques (dans un coffrage en béton) d'Hydro Ottawa;
- un caniveau de câbles de télécommunications (dans un coffrage en béton) de Bell.

Sur la foi de la preuve disponible, il y a lieu de croire que les services publics abandonnés avant le début des travaux du projet d'OLRTC n'ont eu aucune conséquence sur l'affaissement de la chaussée.

4.0 Activités et calendrier d'OLRTC dans le secteur de la rue Rideau

La vallée glaciaire longeant la rue Rideau se trouve à peu près entre la promenade Sussex dans le sens ouest et la passerelle piétonnière dans le sens est, ce qui représente une distance d'environ 125 m. Les activités menées près de la surface et en sous-sol dans le cadre des travaux d'excavation du tunnel d'OLRTC dans cette vallée glaciaire ont commencé en avril 2015 et se sont poursuivies à différentes profondeurs et à divers endroits, selon une fréquence qui s'est accrue jusqu'au moment où la chaussée s'est affaissée, le 8 juin 2016. Les travaux de construction du tunnel même ont été exécutés essentiellement par OLRTC ou ses sous-traitants. En outre, OLRTC avait fait appel à un cabinet d'experts-conseils spécialisés dans la gestion des tunnels, qui a préconisé et justifié le recours à la Méthode de l'excavation séquentielle (MES) adoptée par OLRTC pour creuser le tunnel. Ce cabinet, soit Dr. Sauer & Partners (DSP), a encadré et conseillé OLRTC dans l'avancement de l'excavation du tunnel et a étudié les exigences relatives au soutènement temporaire de l'ensemble du tracé du tunnel (soit les segments de l'assise rocheuse et du sol meuble à la fois).

4.1 Entrée ouest de la station Rideau

Située du côté sud de la rue Rideau, près de la promenade du Colonel By, l'entrée ouest de la station Rideau est un ouvrage pouvant atteindre 15 m de largeur (dans le sens nord-sud) et 35 m de longueur (dans le sens est-ouest). Il s'agit de l'entrée de l'escalier roulant qui mènera au palier inférieur à l'extrémité est et qui descendra en pente jusqu'à l'extrémité ouest de la station Rideau.

4.1.1 Installation de caissons et fuite de la tuyauterie de la conduite principale

(Le lecteur est invité à consulter l'**annexe 1** pour de plus amples renseignements sur les questions exposées dans la présente sous-section.)

Les premiers travaux de construction en sous-sol exécutés par OLRTC pour l'entrée ouest de la station Rideau ont consisté à installer 13 caissons d'un mètre de diamètre, forés entre septembre et décembre 2015 à partir du niveau de la surface du sol jusque dans l'assise rocheuse. Ces unités de soutènement des fondations ont été installées pour assurer éventuellement le soutènement de la superstructure de l'entrée ouest. Le 7 novembre 2015, on procédait au forage de l'un des caissons de grand diamètre à l'aide d'une grue mobile et d'un engin de forage rotatif à une profondeur de 13 à 36 m au-dessous du niveau du sol, à une distance de 9 m à partir du point de la fuite repéré le 13 novembre 2015 dans la conduite d'eau principale en fonte ductile de 305 mm située du côté sud de la rue Rideau. (Il faut signaler que c'est ce caisson qui était le plus proche du point de la fuite de la conduite d'eau principale le 13 novembre 2015.)

Le 12 novembre 2015, une borne-fontaine située à l'extrémité ouest du secteur projeté pour l'excavation de l'entrée ouest a été réinstallée à 8 m à l'ouest, un peu à l'écart de l'extrémité ouest du périmètre de l'excavation de l'entrée ouest de la station Rideau. Cette borne-fontaine a ensuite été raccordée à la conduite d'eau principale de 305 mm à un point situé à l'ouest du tronçon de la tuyauterie qui avait été coupé, bouché et abandonné pour permettre de construire l'installation de l'entrée ouest. Les relevés de chantier disponibles n'indiquent pas que d'autres problèmes auraient pu se produire à la suite de la réinstallation de cette borne-fontaine, jugée réussie à l'époque.

Au milieu de l'avant-midi du 13 novembre 2015, le sous-traitant chargé du forage des caissons aurait, selon les comptes rendus, remarqué que de l'eau ruisselait à la surface de la chaussée, à peu près dans le secteur se trouvant juste au nord de l'entrée ouest projetée. On a prévenu la Ville d'Ottawa et déterminé qu'il s'agissait probablement d'une fuite ou d'une rupture de la conduite d'eau principale, ce qui a été confirmé lorsqu'on a dépressurisé la conduite d'eau principale en fonte ductile de 305 mm dans ce secteur, puisque l'eau a alors cessé de ruisseler en surface. Le jour même, à la fin de l'après-midi, on avait réparé la conduite d'eau principale, en coupant et bouchant la conduite en fonte ductile de 305 mm à l'est du point de la fuite, et la conduite d'eau principale se trouvant à une certaine distance à l'ouest du tronçon bouché a été abandonnée en prévision des travaux d'excavation dans le cadre de la construction de l'entrée ouest.

En juillet 2015, OLRTC a fait appel à une entreprise de détection des fuites d'eau, Echologics, pour installer un système de détection acoustique des fuites dans les conduites d'eau principales pressurisées de 305 mm et de 400 mm le long de la rue Rideau, entre la rue Nicholas et la promenade Sussex. Toutefois, le 13 novembre 2015, lorsque la fuite a été constatée *de visu* sur la rue Rideau, le système de détection acoustique n'avait donné aucun signe avant-coureur. Par la suite, Echologics a fait savoir que le système avait capté un signal chaque jour à partir du 9 novembre 2015 (pendant quatre jours). Malheureusement, parce que ce signal avait une fréquence inattendue, Echologics ne l'a pas déclaré à OLRTC.

Lorsqu'on a détecté et réparé la fuite, on a remarqué qu'un piézomètre d'OLRTC situé sur la rue Rideau, à environ 70 m à l'est de la fuite, avait relevé une hausse de 2 m du niveau de la nappe phréatique du 9 au 13 novembre, soit la période au cours de laquelle Echologics a relevé le signal de fréquence inattendue. En outre, lorsque la fuite a été réparée, le 13 novembre 2015, la nappe phréatique selon ce piézomètre s'est rétablie au niveau qu'elle atteignait avant le 9 novembre. Comme l'indique l'annexe 1, les données du système de détection des fuites et le relevé du piézomètre ont amené OLRTC à conclure que la fuite constatée le 13 novembre s'était produite le 9 novembre et que l'eau n'avait pas cessé de couler depuis.

Le 13 novembre 2015, OLRTC a confié à un cabinet d'ingénieurs professionnels de la localité, Paterson Group, le soin d'évaluer les sols des environs du secteur excavé de la fuite pour savoir si un vide qui aurait pu s'étendre au-delà du secteur immédiat des travaux de réparation de la fuite aurait éventuellement pu provoquer une déformation ou un effondrement dans le secteur de la rue Rideau. À l'époque, OLRTC a également demandé à Paterson Group d'exprimer une opinion sur la probabilité que les charges créées en surface par les engins de forage et/ou de forage des caissons aient pu imposer des contraintes supplémentaires à la conduite d'eau principale, ce qui aurait pu expliquer la fuite. Dans son rapport, Paterson Group a conclu qu'il était improbable que les sols aient pu se déformer ou s'effondrer au-delà du secteur laissé à découvert pour les travaux de réparation et que les charges imposées par la circulation des engins de forage et de forage des caissons n'ont pas provoqué de surcontraintes sur la conduite en fonte

ductile de 305 mm. Toutefois, dans son rapport, Paterson Group ne donne pas de précisions sur la cause de la fuite de la conduite d'eau principale.

4.1.2 Réacheminement et abandon de la conduite d'eau principale de 305 mm

(Le lecteur est invité à consulter l'**annexe 1** pour de plus amples renseignements sur les questions exposées dans la présente sous-section.)

La figure 4 est extraite d'un dessin préparé par Robinson Consultants et indiquant les modifications apportées en novembre 2015 à la conduite d'eau principale de 305 mm. Ces modifications ont consisté à réinstaller une borne-fontaine à l'extrémité ouest de l'excavation de l'entrée ouest de la station Rideau, à réparer une rupture de la conduite d'eau principale et à construire un raccordement croisé entre la conduite d'eau principale de 305 mm et la conduite d'eau principale de 400 mm du côté nord de la rue Rideau pour permettre d'abandonner le tronçon de la conduite d'eau principale de 305 mm dans l'entrée ouest de la station Rideau. Outre les modifications indiquées dans la **figure 4-1**, on croit savoir qu'au début de décembre 2015, un engin de construction d'OLRTC a percuté la borne-fontaine, ce qui a provoqué une fuite, et que des réparations ont été effectuées peu après. On croit aussi savoir qu'OLRTC était responsable des travaux de conception et d'excavation-remblayage à effectuer pour modifier et réparer la conduite d'eau principale et que le personnel de la Ville était chargé des travaux à effectuer sur cette conduite même pour y apporter des modifications et des réparations.

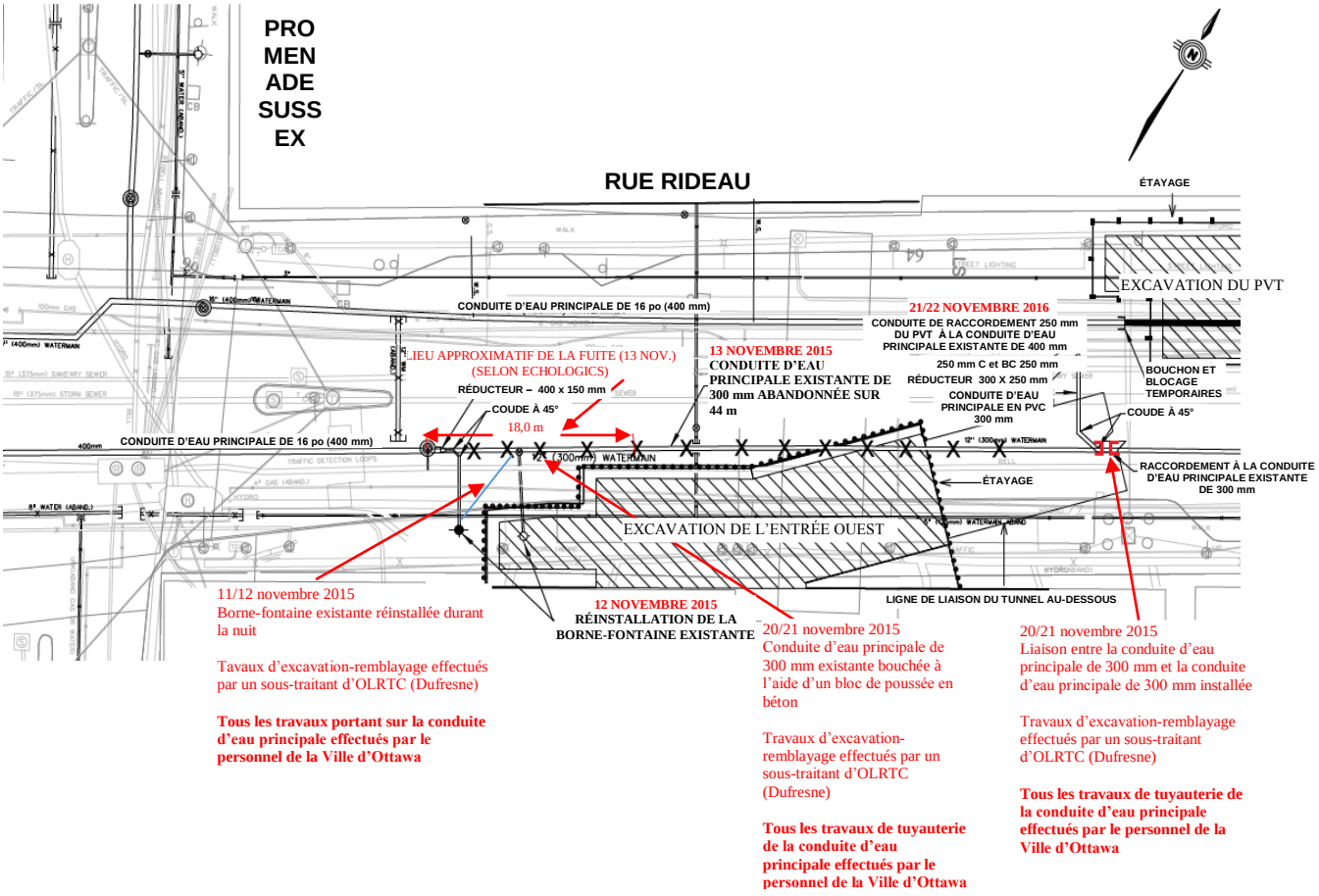

Figure 4-1 : Modifications apportées à la conduite d'eau principale de la rue Rideau

4.1.3 Soutènement de l'excavation et installation de la voûte-parapluie de l'escalier mécanique

Le soutènement de l'excavation (SE) des sols de l'entrée ouest de la station Rideau était constitué de pieux verticaux (mini-pieux), de raidisseurs, de tirants d'ancrage et d'une coque de béton projeté armée d'un treillis. Les travaux de forage et d'installation des mini-pieux ont commencé à la mi-décembre 2015 et ont été achevés à la fin de janvier 2016. L'excavation du périmètre au sol de l'entrée ouest même a commencé dès les premiers jours de février 2016 et s'est poursuivie jusqu'à la fin de mai 2016, à la fin des travaux d'installation du troisième niveau des tirants d'ancrage du troisième niveau de raidisseurs. Selon un certificat de conformité daté du 3 juin 2016 et délivré par A. Borregales Rivera, ingénieur, le SE avait été installé conformément aux dessins préparés pour OLRTC par le cabinet Site Canada en septembre 2015.

En outre, les travaux liés à l'installation du premier système de soutènement de la voûte-parapluie de l'escalier mécanique à l'extrémité est de l'entrée ouest ont été lancés au début d'avril 2016 et se sont poursuivis, malgré quelques interruptions, jusqu'à la fin de mai.

4.2 Partie ouest de la banquette du tunnel

L'excavation de ce tronçon de la partie ouest de la banquette du tunnel a été lancée à la mi-décembre 2015 à l'extrémité est de la station Parlement non loin du chaînage 101+740, à environ 600 m à l'ouest de la calotte en date du 8 juin 2016. Sur ce tronçon de 600 m du tunnel, tous les travaux d'excavation se sont déroulés dans l'assise rocheuse jusqu'à ce que l'on atteigne, le 8 juin 2016, la limite ouest de la vallée glaciaire remblayée de sol sur le front de taille du tunnel non loin des repères de chaînage 102+349,5/102+350. L'état du sous-sol le long de la banquette du tunnel se prêtait à des travaux d'excavation jusqu'à une distance proche du chaînage 102+305 selon les comptes rendus.

Dans le délai de deux semaines qui a précédé le 8 juin 2016, les activités de soutènement et d'avancement de la calotte du tunnel avaient atteint le chaînage 102+336 le 24 mai 2016 et étaient rendues au chaînage 102+348 le 27 mai. Dans les procès-verbaux des réunions sur les travaux obligatoires d'excavation et de soutènement (TOES), il n'est pas du tout question de la stabilité ou du ruissellement exceptionnellement abondant des eaux souterraines le long de ce tronçon de 12 m du tunnel creusé dans l'assise rocheuse entre les repères de chaînage 102+336 et 102+348. Le personnel d'OLRTC et de DSP tient ces réunions sur les TOES dès le début de la journée pour discuter des travaux obligatoires de soutènement de l'excavation à faire le jour même.

4.3 Espace souterrain de la station Rideau

La station Rideau, située entre la rue Nicholas et la promenade Sussex, commence à son extrémité est près de la rue Nicholas et prend fin dans le sens ouest à environ 70 m à l'est de la promenade Sussex. L'excavation de l'espace souterrain de la station Rideau dans les sols de la vallée glaciaire a commencé en avril 2015 près du chaînage 102+450 et s'est prolongée dans le sens ouest sous la rue Rideau. (Il faut signaler que l'ensemble des travaux d'excavation de l'espace souterrain de la station Rideau avaient commencé en novembre 2014 près du chaînage 102+600. Toutefois, le tronçon de 150 m de longueur entre les repères de chaînage 102+600 et 102+450 a été excavé dans l'assise rocheuse, et non dans le sol meuble.) À la fin de mai 2016, l'excavation de l'espace souterrain de la station Rideau dans les sols de la vallée glaciaire avait atteint l'extrémité ouest de cette station à peu près jusqu'au chaînage 102+403.

4.4 Partie est de la banquette du tunnel

Au début de mai 2016, OLRTC a installé quelques segments de la voûte-parapluie de 18 m de longueur sur le côté sud de la calotte supérieure de la partie est de la banquette du tunnel dans le sens ouest en direction de la station Parlement. Ponctués d'interruptions dans les semaines qui ont suivi, les travaux d'installation de la voûte-parapluie de la partie est de la banquette du tunnel ont pris fin le 6 juin 2016.

Cette étape a été suivie du début de l'avancement d'une galerie d'accès de l'excavation de la partie est de la banquette du tunnel dans le sens ouest au chaînage 102+403 au début de la journée du 7 juin 2016. Dans le courant de cette journée et la nuit suivante, OLRTC et DSP ont remarqué que l'avancement était ralenti par l'eau qui s'écoulait de la nappe phréatique, par l'instabilité des sols et par la nécessité d'aménager une coque de béton projeté pour tâcher de réduire le ruissellement de la nappe phréatique et de stabiliser la calotte. Ces travaux se sont poursuivis jusqu'aux environs de 10 h 30 le 8 juin 2016; on a alors évacué la calotte en apprenant que la chaussée s'était affaissée non loin du secteur compris entre les repères de chaînage 102+305 et 102+370 (soit de 30 à 50 m à l'ouest du front de taille de la partie est de la banquette du tunnel).

5.0 Méthodes de construction d'OLRTC

Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, dans le sens ouest et est du sous-sol en terre meuble de la vallée glaciaire de la rue Rideau, les banquettes du tunnel et les stations avaient été essentiellement excavées dans l'assise rocheuse calcaire selon la Méthode de l'excavation séquentielle (MES), grâce à trois excavatrices. Les banquettes excavées selon la MES étaient des tunnels individuels en demi-lune d'environ 10 m de largeur. Deux des trois stations, situées sous la rue Queen, s'étendent sur une longueur d'environ 175 m et font 18 m de largeur sur 14 m de hauteur. La station Rideau, située sous la rue Rideau, s'étend sur 160 m de longueur environ, fait à peu près 21 m de largeur sur 16 m de hauteur et est construite en partie dans le till.

Sur une longueur de 50 m, la partie ouest de l'enveloppe de la station Rideau et un tronçon de 60 m de la partie ouest de la banquette du tunnel (soit la banquette du tunnel comprise entre la station Parlement et la station Rideau) recouvrent une vallée glaciaire enfouie elle-même recouverte d'une couche relativement mince de dépôts d'argile et de remblais. L'ensemble du tronçon du tunnel excavé dans le sol meuble a été estimé à 110 m de longueur et à un maximum d'environ 35 m de profondeur sous le niveau de la surface du sol.

OLRTC avait mis au point et appliqué plusieurs méthodes de construction, établies à l'origine pour les tronçons du tunnel excavés essentiellement dans l'assise rocheuse à partir du portail ouest et du portail est. Puis, elle a adopté des mesures supplémentaires pour gérer les risques plus importants de tassement et autres dans la partie du tracé du tunnel traversant la vallée glaciaire remblayée de sol. Ces mesures ont notamment consisté à modifier les travaux obligatoires de soutènement de l'excavation liés à l'avancement du tunnel selon la MES dans le sol, comme l'indique la **figure 5-1**. Les plans originels d'OLRTC pour creuser le tronçon de la banquette du tunnel selon la MES prévoyaient d'excaver le tunnel dans le sens est-ouest. À un moment donné, on a décidé de creuser également la banquette du tunnel dans le sens ouest-est, de sorte qu'il a fallu creuser le tunnel d'abord dans l'assise rocheuse, puis dans les sols.

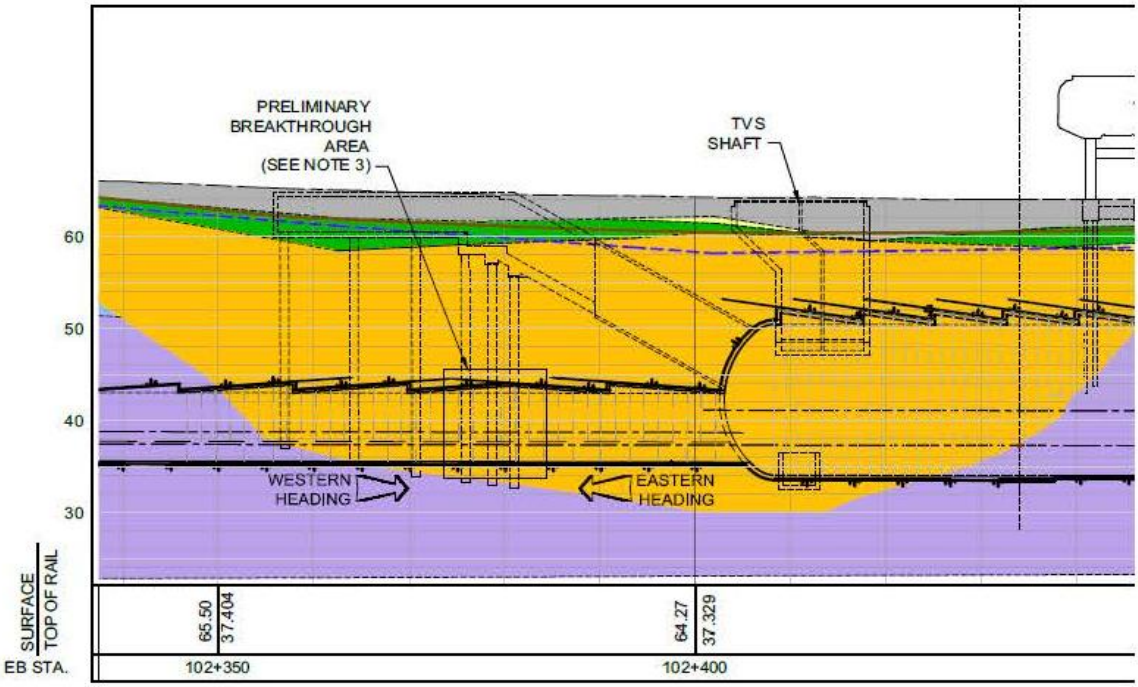

Figure 5-1 : Profil du soutènement temporaire dans les sols meubles de la vallée glaciaire

5.1 Méthode de l'excavation séquentielle (MES)

Les banquettes du tunnel et les espaces souterrains ont été construits selon les principes de la MES, qui permet d'adapter la séquence des travaux de construction désignée pour chaque longueur de l'avancement, le délai d'installation du soutènement et le type de soutènement permis pour percer le tunnel dans la roche, les sols meubles et les différents autres types de sols. Les critères d'excavation et de soutènement indiqués dans les dessins de conception d'OLRTC/DSP ont été modifiés à pied d'œuvre, dans les cas nécessaires, d'après les propriétés observées pour la masse rocheuse ou les sols. Dans l'ensemble, on avait prévu plusieurs catégories de dispositifs de soutènement dans l'assise rocheuse et un soutènement plus solide dans les sols meubles.

5.2 Personnel de gestion et de chantier

De concert avec le gestionnaire des segments, l'ingénieur responsable de la MES doit veiller à ce que le processus des TOES soit respecté et à ce qu'on n'autorise pas de travaux d'excavation ni de soutènement sans faire état, dans les procès-verbaux des réunions journalières sur les TOES, des travaux obligatoires de soutènement de l'excavation. Des membres du personnel d'OLRTC et de DSP ont notamment participé à ces réunions sur les TOES. Pendant les travaux d'excavation selon la MES, l'ingénieur responsable de la MES a supervisé les travaux d'excavation du tunnel, et selon les comptes rendus, il était habilité à diriger les travaux et à y mettre fin. Il a en outre assuré la conformité de la conception et approuvé les changements suggérés ou à apporter aux travaux sur le chantier, en plus de vérifier, dans l'ensemble, la qualité des travaux. Pour ce projet, les changements intervenus dans les catégories de dispositifs de soutènement des sols ont été autorisés à l'aide de la Fiche des travaux obligatoires d'excavation et de soutènement (FTOES). Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, des réunions sur les TOES ont eu lieu chaque jour avec l'ingénieur responsable de la MES et le gestionnaire des segments, et les procès-verbaux de ces réunions ont été adressés tous les jours à leurs destinataires. Les procès-verbaux journaliers (publiés dans les cas nécessaires) des réunions d'OLRTC et de DSP sur les

TOES et les FTOES ont généralement été transmis à la Ville dans les 24 heures de ces réunions. Voici des exemples de documents que la Ville a reçus :

- les procès-verbaux n^{os} 768, 769 et 770 des réunions sur les TOES (datés par inadvertance du 8 juin, alors qu'ils auraient dû porter la date du 9 juin) (cf. l'**annexe 2**);
- la FTOES 95 (SC Soft Ground from Chainage 102+348.5 [West] and 102+403.0 [East]) (**cf. l'annexe 2**).

Pour exécuter les activités d'excavation et de soutènement des sols, OLRTC a fait appel à un superviseur spécialisé dans l'excavation des tunnels selon la MES, à un surintendant spécialisé dans les tunnels, à un contremaître et à une équipe de travailleurs. La surveillance et la conformité des travaux relevaient de la compétence de l'ingénieur responsable de la MES, de l'inspecteur de la MES et de l'ingénieur géotechnicien en chef. L'ingénieur de chantier, l'inspecteur de la MES et l'ingénieur géotechnicien en chef étaient chargés de surveiller les travaux et d'en attester la conformité. En règle générale, les travaux d'excavation du tunnel se sont déroulés à raison de 24 heures sur 24 et ont été surveillés, d'après les comptes rendus, pendant toute leur durée par l'inspecteur de la MES, alors que l'ingénieur responsable de la MES et/ou l'ingénieur géotechnicien en chef ont procédé à des vérifications ponctuelles. L'ingénieur géotechnicien en chef s'est aussi acquitté de tâches supplémentaires comme la cartographie du front de taille, le forage des trous de sondage et les évaluations portant sur le ruissellement des eaux de la nappe phréatique.

5.3 Banquette du tunnel — Excavation et soutènement

5.3.1 Excavation

La zone T2 de la banquette du tunnel est constituée de tronçons en demi-lune, dont les dimensions de toute l'enveloppe prévoient une hauteur de 6 ou 7 m (selon la catégorie des dispositifs de soutènement des sols) et une largeur d'environ 9,5 m. L'excavation de la calotte supérieure précède l'enlèvement du banc; la calotte supérieure atteint une hauteur moyenne de 5,5 m. Dans le tronçon de sol meuble, la séquence d'avancement du tunnel consistait généralement à excaver au moins trois poches dans la calotte supérieure tout en maintenant une assise de soutènement.

Les engins suivants ont servi à exécuter les opérations d'avancement du tunnel :

- excavation :
  - sols meubles : Terex TE210;
  - roche : excavatrice(s) Sandvik MT720;
- bétonnage : Normet Spraymec et Transmixer;
- enlèvement des matériaux : chargeuse à pelle CAT;
- injection de coulis de ciment : matériel ChemGrout;
- forage : RoboDrill.

5.3.2 Soutènement

Dans l'assise rocheuse, la longueur d'une volée d'avancement du tunnel était comprise entre 1 et 3 m, et le soutènement des sols était généralement constitué de boulons d'ancrage disposés d'après un certain plan et, selon la catégorie de roches de l'assise rocheuse, de tuyaux de soutènement en porte-à-faux, de poutres en treillis, de béton projeté armé de fibre de verre, de treillis métalliques et de boulons de fixation.

Dans les sols meubles, la longueur maximum admissible de la volée d'avancement était de 1,5 m. Le soutènement des sols de la banquette du tunnel et le soutènement complémentaire de la zone T2 étaient

assurés grâce à des voûtes-parapluies de 18 m de longueur (qui se chevauchaient sur 6 m) pour la tuyauterie et à des poutres en treillis espacées de 1,5 m. Le **tableau 5-1** comprend les détails de l'installation des voûtes-parapluies pour les calottes des parties ouest et est de la banquette du tunnel en place aux repères de chaînage 102+348,5 et 102+403 respectivement à la date à laquelle la chaussée s'est affaissée, le 8 juin 2016. Le lecteur est invité à consulter, dans l'**annexe 3**, le tableau d'OLRTC pour les quantités de coulis de ciment et le ruissellement de l'eau.

Tableau 5-1 : Sommaire des voûtes-parapluies

Date	Station de la voûte-parapluie	Débit (l/m)	Quantité de coulis (l)	Notes
Du 27 mai au 6 juin 2016	102+348,5 (Partie ouest de la banquette du tunnel)	276	17 297	1. Pendant l'installation, on a relevé la présence de sols meubles à proximité du front de taille pour presque chaque tuyau. 2. Volume de calcul en litres : 10 200
Du 2 au 6 juin 2016	102+403 (Partie est de la banquette du tunnel)	242	6 623	1. Pendant l'installation, on a relevé la présence de sols meubles sur toute la longueur de chaque tuyau. 2. Volume de calcul en litres : 2 094

Généralement, on a construit une dalle temporaire en béton projeté à deux ou trois volées derrière la calotte supérieure, en plus d'assurer une assise de soutènement. Outre une couche de béton Flashcrete, on a appliqué une couche de béton projeté armé de fibre de verre sur le front de taille et la dalle. Les mesures obligatoires de soutènement du front de taille prévoyaient des couches de béton projeté armé de fibre de verre, des ancrages autoforeurs (AAF) dotés de poutres de répartition de la charge et des couches de treillis métallique, dans les cas nécessaires.

Les autres mesures de soutènement, inspirées des observations *in situ* et mises en œuvre sous la direction de l'ingénieur responsable de la MES, ont consisté notamment à :

- sonder et assécher les sols (grâce à des conduites de drainage à parois perforées ou pleines);
- installer des dispositifs de soutènement en porte-à-faux de la tuyauterie, dotés de barres d'armature ou réalisés en coulis de ciment;
- procéder à des travaux d'excavation de poches;
- poser des boulons de fixation et des boulons soudés par points sur le front de taille.

5.3.3 Puits de sondage pour l'observation

Pour savoir exactement où se trouvaient les points de contact entre les différentes unités géologiques et pour observer et mesurer le ruissellement de la nappe phréatique, on a percé des puits de sondage dans le front de taille du tunnel. Ces puits, généralement proches de la couronne du tunnel, ont parfois été percés ailleurs sur le front de taille de la calotte. Même si ces puits se chevauchaient, leur nombre et leur emplacement étaient déterminés par le type de classification des dispositifs de soutènement des sols. Le **tableau 5-2** indique les puits de sondage creusés dans la partie ouest de la banquette du tunnel dans les semaines qui ont précédé le 8 juin lorsqu'on a constaté la présence de sols meubles sur le front de taille du tunnel. Le lecteur est invité à consulter l'**annexe 4** pour les détails du **tableau 5-2**.

Tableau 5-2 : Sommaire des puits de sondage — Partie ouest de la banquette du tunnel

Date	N° du puits de sondage	Chaînage	**Longueur** (m) {chaînage interprété}	Notes
Le 18 mai 2016	RT-PH-05	102+324,0 Couronne (nord)	18,8 {102+342,8}	Aucun contact avec les sols meubles; ruissellement mineur à partir d'environ 10 m de profondeur
Le 24 mai 2016	RT-PH-06	102+336,0 Couronne (nord)	13,8 {102+349,8}	Contact avec les sols meubles à +/- 13,0 m (chaînage : +/- 102+349; ruissellement abondant provenant des sols meubles : 26 l/m.

Date	N° du puits de sondage	Chaînage	**Longueur** (m) {chaînage interprété}	Notes
Le 24 mai 2016	RT-PH-07	102+336,0 Centre (nord)	14,5 {102+350,5}	Contact avec les sols meubles à +/- 13,5 m (chaînage : +/-102+349,5); ruissellement abondant provenant des sols meubles : 38 l/m.

5.4 Espace souterrain de la station Rideau, zone T2 de la banquette du tunnel et entrée ouest : collecte de données sur le tassement des sols

5.4.1 Dispositifs de surveillance du tassement des sols en surface

Le dessin OLR-80-2-0000-DRD-0023 d'OLRTC, reproduit dans l'**annexe 5**, indique les dispositifs de surveillance du tassement des sols en surface (DSTSS) prévus le long de la rue Rideau. Ces DSTSS visent à permettre de surveiller le tassement des sols en surface en réaction aux travaux de construction. Au total, on a installé et surveillé à intervalles fréquents, à partir du début de 2016 jusqu'au 8 juin, 20 DSTSS le long de la rue Rideau. Ces DSTSS, constitués de tiges d'acier de 2 m de longueur encastrées dans le sol, ont été installés par groupes de trois dans le sens nord-sud; il y en avait un sur le côté nord, un sur le côté sud et un autre au milieu de la rue Rideau. Un total de six coupes transversales nord-sud, établies à partir de cet ensemble de DSTSS, est représenté sur le dessin entre les repères de chaînage 102+350 et 102+435; l'intervalle est-ouest entre ces coupes transversales varie entre 5 m et 35 m. La distance de séparation maximum de 35 mm était comprise entre les coupes transversales des DSTSS installés aux repères de chaînage 102+350 et 102+385. En surface, le secteur où la chaussée de la rue Rideau s'est affaissée s'étendait approximativement entre les repères de chaînage 102+350 et 102+370. Trois coupes transversales comparables, établies selon des DSTSS installés aux mêmes endroits, sont représentées sur le dessin dans le sens ouest-est, le long des côtés nord et sud et au milieu de la rue Rideau.

À l'origine, en 2014, les seuils de déclenchement de ces DSTSS avaient été fixés à 10 mm pour l'alerte jaune (soit le niveau intermédiaire) et à 25 mm pour l'alerte rouge (le niveau maximal). Puis, en avril 2016, ces niveaux d'alerte ont été rehaussés pour la plupart des DSTSS dans le secteur de la vallée remblayée de sol de la station Rideau (à peu près aux repères de chaînage 102+330 et 102+450). La **figure 5-2** donne un exemple des limites de tassement des sols pour les niveaux d'alerte établis à l'origine puis révisés, ainsi que des tassements mesurés, qui augmentaient généralement à la suite des activités d'excavation et de soutènement des sols d'OLRTC dans l'espace souterrain de la station Rideau. Le lecteur est invité à consulter l'**annexe 6** (DSP-86-2-RISU-MEM-0006-Rev 1) pour prendre connaissance de l'explication de la révision des seuils de déclenchement des DSTSS de la station Rideau.

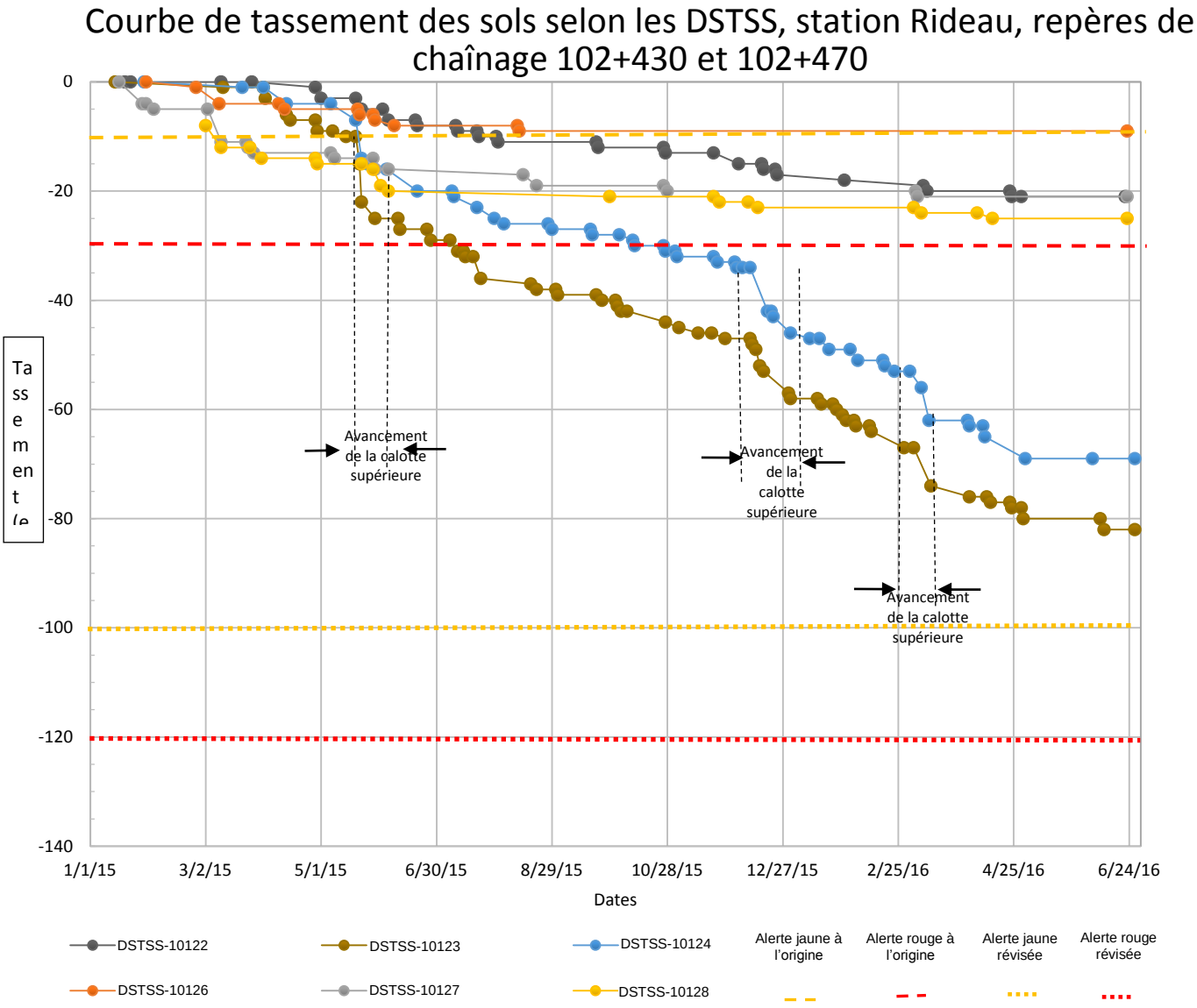

Figure 5-2 : Courbe de tassement des sols selon les DSTSS — Tassement des sols et niveaux d'alerte aux DSTSS de la station Rideau

5.4.2 Dispositifs de surveillance des structures

Les seuils de déclenchement des dispositifs de surveillance des structures (DSS) installés dans les ouvrages voisins du tracé du tunnel prévoient toujours, depuis le début des travaux de construction du tunnel en 2014, des niveaux d'alerte jaune de 10 mm et des niveaux d'alerte rouge de 25 mm. Dans la période comprise entre mars 2016 et le 8 juin 2016, on a surveillé à intervalles réguliers une vingtaine de DSS dans plusieurs immeubles de la rue Rideau entre les repères de chaînage 102+330 et 102+450. Ces dispositifs de surveillance ont été installés en particulier sur les structures du 45, du 47-57, du 73 et du 50 (Centre Rideau) de la rue Rideau. À cet égard, dans l'ensemble du secteur où la chaussée s'est affaissée, le 8 juin, la seule structure qui n'était pas dotée de DSS était celle du 10 de la rue Rideau (en raison, selon les comptes rendus, de l'envergure des travaux de réfection et de reconstruction dont cette structure faisait alors l'objet).

5.4.3 Extensomètres

OLRTC/DSP a également installé et surveillé des extensomètres multipoints dans la vallée glaciaire remblayée de sol. Les niveaux d'alerte jaune et rouge de ces appareils sont fixés respectivement à 15 mm et 30 mm. On a relevé à intervalles réguliers, entre mars 2016 et le 8 juin, deux de ces appareils de surveillance, tous deux installés près du milieu de la rue Rideau, aux repères de chaînage 102+340 et 102+380.

5.4.4 Surveillance à l'intérieur du tunnel

Dans l'espace souterrain de la station Rideau et dans l'excavation de la banquette du tunnel, on a installé différents appareils de surveillance des déformations et de la convergence, tous dotés de niveaux d'alerte précis. Dans l'espace souterrain de la station Rideau, des points de déflexion verticale et transversale étaient prévus tous les 5 m entre les repères de chaînage 102+460 et 102+404. Dans la partie ouest de la banquette du tunnel creusée dans le sens ouest-est, ces points de déflexion étaient prévus tous les 15 m, et le 8 juin 2016, le point le plus proche de la calotte du tunnel, au repère de chaînage 102+348,5, se trouvait au repère de chaînage 102+335. Tous les points de mesure de la déflexion installés dans l'espace souterrain de la station Rideau et dans la banquette du tunnel ont été surveillés à intervalles réguliers dans les semaines qui ont précédé l'affaissement de la chaussée le 8 juin.

5.4.5 Inclinomètre

Un inclinomètre, installé en janvier 2016 non loin de l'extrémité ouest de l'excavation de l'entrée ouest de la station Rideau, a été surveillé régulièrement dans la période comprise entre avril 2016 et le 4 juin 2016.

5.4.6 Piézomètres

Les piézomètres et les puits de surveillance situés à moins de 200 m du secteur de la chaussée qui s'est affaissé le 8 juin ont essentiellement permis d'évaluer les niveaux de la nappe phréatique touchés par les événements qui se sont produits avant et pendant l'affaissement de la chaussée. Parmi les 13 piézomètres et puits de surveillance au total, sept étaient dotés de capteurs simples et six, de capteurs doubles ou triples. Ces 13 dispositifs sont tous représentés dans **l'annexe 7** (dessin OLR-12-3-0000-DRK-0021 d'OLRTC).

Neuf de ces dispositifs (51044-51052) avaient été installés à l'origine au moment des activités menées en 2012 pour l'analyse des forages d'essai de la phase de l'ingénierie préliminaire. Six de ces piézomètres avaient été installés le long de la rue Rideau entre les repères de chaînage 102+360 et 102+480, alors que les trois autres l'avaient été au sud et au nord de la rue Rideau, sur la promenade du Colonel By ou la promenade Sussex. Les quatre autres dispositifs (52006, 52007, 52026 et 52029), tous situés au sud de la rue Rideau sur la promenade du Colonel By, ont été installés à une époque plus récente par OLRTC.

Ces 13 dispositifs ont tous été surveillés à intervalles réguliers avant le 8 juin et ont tous été relevés dans la période du 4 au 7 juin. Toutefois, on a constaté que pour certains appareils, plusieurs relevés dépassaient le champ, noté dans chaque courbe correspondante, de captation des piézomètres à corde vibrante multiniveaux, ce qui a remis en question la validité de ces relevés.

5.4.7 Soutènement de l'entrée ouest de la station Rideau pour la surveillance des travaux d'excavation

En mars 2016, environ 25 dispositifs de surveillance ont été installés sur tous les côtés du réseau de soutènement des travaux d'excavation (STE) de l'entrée ouest de la rue Rideau. Jusqu'au 27 mai 2016

environ, la plupart de ces dispositifs ont été relevés couramment, et il ne semble pas qu'on ait signalé de déflexions exceptionnelles. Après le 27 mai 2016, on a relevé régulièrement de cinq à huit des dispositifs de surveillance seulement à l'extrémité est des travaux d'excavation. Les raisons pour lesquelles la fréquence des relevés a été réduite ne sont pas claires.

6.0 Atténuation des risques pour la conduite d'eau principale

Au début de 2015, OLRTC a déposé des rapports sur les mesures d'atténuation des dégâts que pourraient subir les ouvrages, la chaussée et les services publics longeant le tracé du tunnel dans la vallée glaciaire remblayée de sol de la rue Rideau à peu près entre les repères de chaînage 102+300 et 102+450. Parmi ces rapports se trouvait un document daté du 10 mai 2015 et intitulé « Rideau Street Utilities Mitigation ». Ce document, reproduit ci-joint dans l'**annexe 8**, comprend un rapport de Robinson Consultants sous le titre « Rideau Street Watermain Settlement Mitigation Report ».

Dans ces rapports, on fait observer qu'il fallait s'attendre à ce que les activités d'excavation du tunnel provoquent un tassement des sols pouvant atteindre 150 mm. Le secteur de tassement maximum devait s'étendre sur une superficie de 15 m de largeur sur 60 m de longueur le long de la rue Rideau à partir d'une zone proche de l'extrémité ouest de l'entrée ouest (près de la passerelle piétonnière ouest) jusqu'à 60 m à l'est de l'extrémité ouest de l'entrée ouest (près de la passerelle piétonnière est) (soit entre les repères de chaînage 102+360 et 102+420). En particulier, les canalisations en service enfouies à 2 ou 3 m sous la rue Rideau étaient les plus préoccupantes.

Il s'agissait notamment de deux conduites d'eau principales, d'un égout domestique, d'un égout pluvial, d'une conduite de gaz, d'un caniveau pour des câbles électriques et d'un caniveau pour des câbles de télécommunications. Pour ce qui est des dégâts qui pouvaient être causés à la chaussée, ainsi qu'aux ouvrages voisins et à la construction du tunnel, on insistait surtout sur la défaillance des conduites d'eau principales. C'est pourquoi le rapport de Robinson Consultants visait essentiellement à évaluer les mesures d'atténuation envisageables, surtout pour les conduites d'eau principales (et, dans une moindre mesure, pour l'égout pluvial et l'égout domestique).

On s'est donc penché sur deux grandes méthodes d'atténuation. L'une consistait à remplacer les deux conduites d'eau principales, la conduite en fonte ductile de 305 mm longeant le côté sud de la rue Rideau et la tuyauterie en PVC de 400 mm longeant le côté nord de la rue Rideau, par une nouvelle canalisation qui résisterait mieux au tassement, par exemple une tuyauterie en PEHD. L'autre méthode consistait à mieux surveiller le tassement des sols, à apporter des modifications de moindre envergure aux réseaux de conduites d'eau principales et à intervenir dans l'éventualité d'une augmentation rapide ou excessive du tassement des sols, notamment en adoptant des plans de mesures d'atténuation précis portant sur les conduites d'eau principales, les canalisations d'égout, les conduites de gaz et les caniveaux de câbles électriques et de télécommunications. Ces plans de mesures d'atténuation sont également reproduits dans l'**annexe 8**. Dans cette même période, OLRTC a décidé d'adopter la méthode qui consistait à surveiller le tassement des sols, plutôt que celle qui prévoyait de remplacer intégralement les deux conduites d'eau principales.

OLRTC a fait savoir à la Ville d'Ottawa que les modifications à apporter aux conduites d'eau principales existantes consisteraient notamment à installer des accouplements flexibles aux cinq points de raccordement des conduites d'eau des immeubles de la rue Rideau où aurait pu se produire un tassement différentiel entre un immeuble et le trottoir ou la rue attenant. En outre, un système acoustique devait aussi être installé pour détecter les fuites le long de la tuyauterie pressurisée enfouie dans laquelle s'écoulait de l'eau. Les dossiers de construction d'OLRTC et de la Ville d'Ottawa confirment que dans la

période de septembre à octobre 2015, OLRTC a réussi à installer les cinq accouplements flexibles. Le système de détection acoustique des fuites a également été installé, et en août 2015, Echologics a commencé à exercer une surveillance le long des deux conduites d'eau principales.

Les fabricants de la conduite en fonte ductile et de la tuyauterie en PVC, installées en 1982 et 1993 respectivement, ont prévu des limites admissibles de distorsion angulaire et de déflexion. Selon les rapports d'OLRTC, ces limites correspondaient à un décalage entre les joints de 510 mm, pour un tronçon de 5,5 m de la conduite en fonte ductile de 300 mm, et de 160 mm pour un tronçon de 6 m de la tuyauterie en PVC de 400 mm (cf. l'**annexe 8**).

7.0 Mesure du tassement des sols

Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, OLRTC/DSP a surveillé à intervalles réguliers, selon un calendrier variable, les différentes catégories d'appareils géotechniques dans les semaines qui ont précédé le 8 juin 2016 dans le secteur de la vallée glaciaire.

7.1 Dispositifs de surveillance du tassement des sols en surface (DSTSS) et extensomètres

Parmi les 20 DSTSS et les deux extensomètres surveillés entre les repères de chaînage 102+300 et 102+450, les DSTSS 10109-10112 proches du chaînage 102+350 ont été détruits par l'affaissement de la chaussée. Les deux extensomètres, qui ont été épargnés par l'affaissement, avaient toutefois tous été enlevés le 14 juin en raison des activités de réparation et de reconstruction le long de la rue Rideau. Les **figures 7-1** et **7-2** représentent les tassements mesurés et indiquent le rythme auquel les tassements généralement liés aux activités ponctuelles ou continues d'OLRTC dans cette partie de la banquette du tunnel ou à proximité, dans les environs du secteur où la chaussée s'est affaissée, se sont accrus dans le temps.

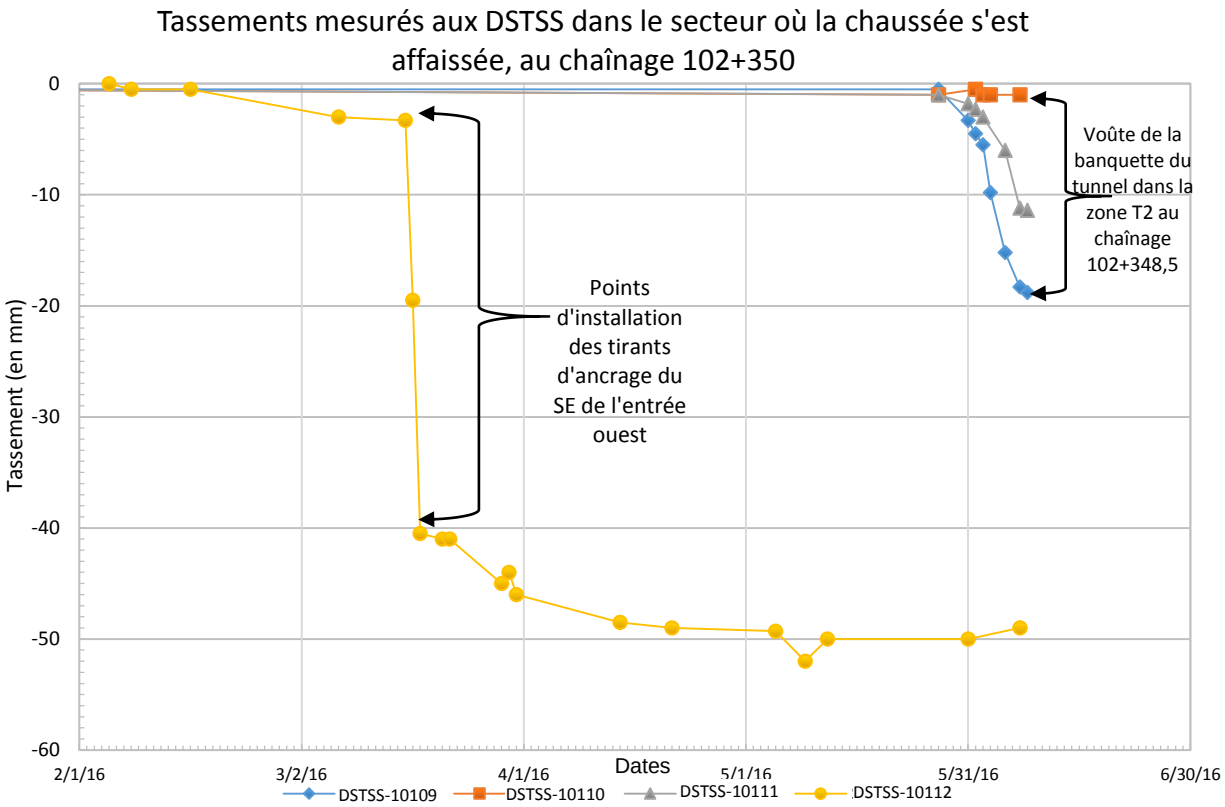

Figure 7-1 : Tassements mesurés aux DSTSS dans le secteur où la chaussée s'est affaissée, au chaînage 102+350

Les DSTSS 10109-10111 ont été installés à l'origine en août 2015 et ont été surveillés depuis cette date, alors que le DSTSS 10112 a été installé en février 2016 et a été surveillé depuis cette date. Le DSTSS 10112, qui est proche de l'extrémité ouest de l'excavation de l'entrée ouest de la station Rideau, a permis de relever un tassement de l'ordre de 40 mm en mars 2016, puis un nouveau tassement de 8 mm en date du 21 avril. Entre le 21 avril et le 8 juin 2016, le DSTSS 10112 n'a pas permis de relever de tassement supplémentaire. Le tassement de presque 50 mm relevé par le DSTSS 10112 entre la mi-mars et la mi-avril correspond à la durée des travaux d'excavation et d'installation des tirants d'ancrage du SE de l'entrée ouest.

Les DSTSS 10109 et 10111, installés dans la partie ouest de la banquette du tunnel près de la limite ouest du secteur où la chaussée s'est affaissée, n'ont pas permis de relever de déflexion dans la période comprise entre mars et la fin de mai 2016. Toutefois, entre le 27 mai et le 8 juin 2016, ces deux DSTSS ont permis de relever une déflexion qui a pu atteindre 19 mm supplémentaires, comme l'indique la **figure 7-1**. Cette dernière période de deux semaines correspond à la durée des travaux de soutènement de la partie ouest de la banquette du tunnel, après que l'excavation de la calotte supérieure se soit rendue rendue au chaînage 102+348 et alors que se déroulait l'installation de la voûte-parapluie dans le sens est de la calotte. Les rapports de chantier d'OLRTC à partir de la première semaine de juin font état des problèmes de forage, d'injection de coulis de ciment et de ruissellement de l'eau liés à l'installation de cette voûte-parapluie.

Il faut signaler que le DSTSS 10110, installé du côté sud de la rue Rideau, n'a pas permis de relever de déformation dans la période de dix mois au cours de laquelle ce dispositif a été surveillé à intervalles réguliers, ce qui était exceptionnel pour les 20 DSTSS surveillés le long du tronçon du tunnel correspondant à la vallée remblayée de sol.

Plus loin vers l'est, deux appareils de surveillance géotechnique, soit le DSTSS 10113 et l'extensomètre 40015, ont été installés dans le secteur compris entre les repères de chaînage 102+370 et 101+375 (non loin du front de taille de la partie est de la banquette du tunnel, au chaînage 102+403). La **figure 7-2** indique que le DSTSS 10113 a permis de relever un tassement supplémentaire de 10 mm à la mi-mars, ainsi qu'un nouveau tassement de 30 mm entre le 31 mai et le 8 juin 2016. Ces tassements étaient liés à l'installation de la voûte-parapluie de la partie est de la banquette du tunnel et aux activités d'avancement du front de taille du tunnel. Ces tassements supplémentaires sont révélateurs de l'instabilité et de l'érodabilité des sols glaciaires sablonneux saturés sous une charge hydrostatique lorsqu'ils sont soumis à des activités de forage et d'excavation liées à l'installation de la voûte-parapluie et à l'avancement du tunnel.

L'ancrage de l'extensomètre 40015 à proximité de la surface a accusé une déflexion de 15 mm entre le 15 et le 20 mars 2016, alors que les appareils n'ont pas permis de relever de tassement supplémentaire entre la fin de mai et le 8 juin 2016.

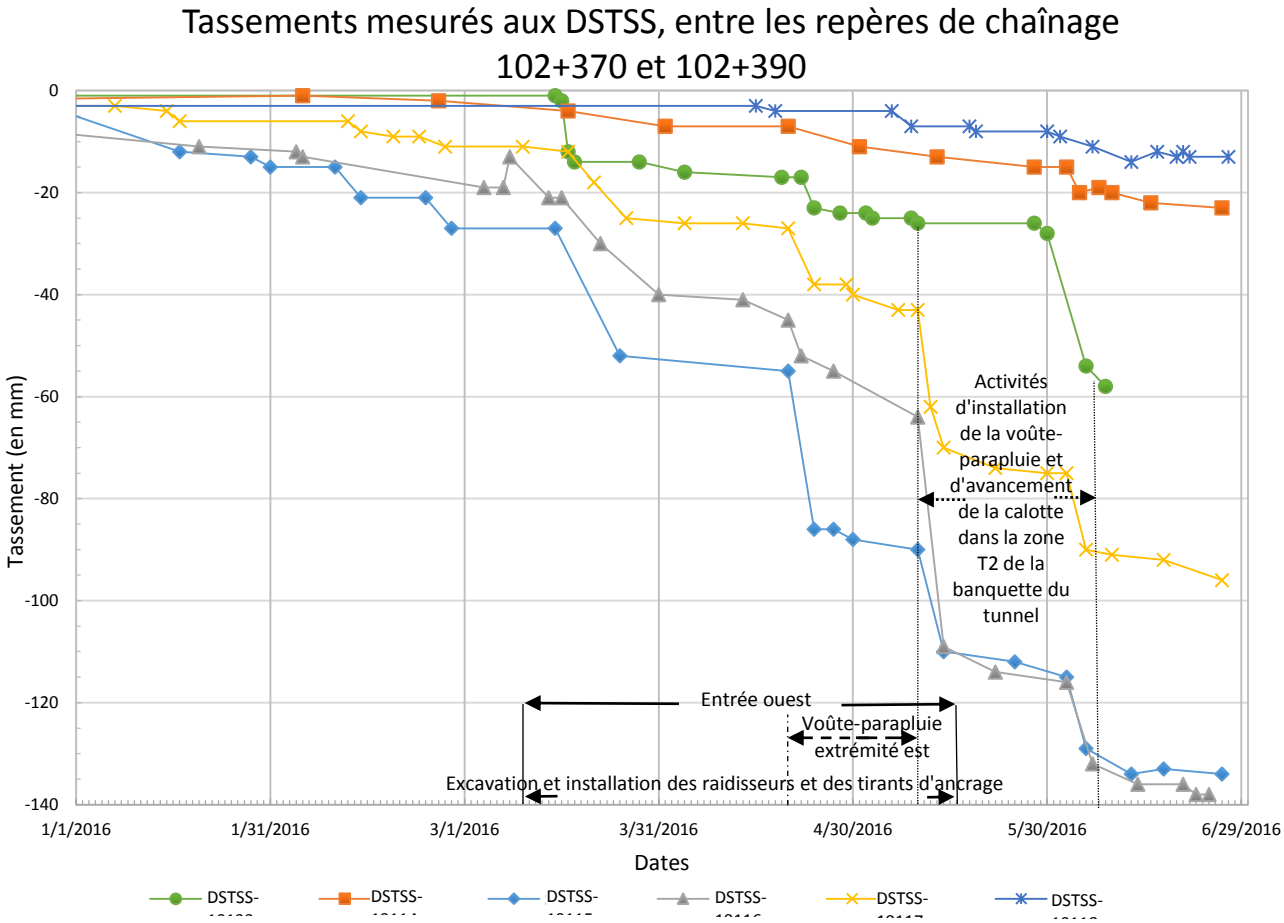

Figure 7-2 : Tassements mesurés aux DSTSS, entre les repères de chaînage 102+370 et 102+390

Toujours dans le sens est, au-delà de l'extrémité est du secteur où la chaussée s'est affaissée, quatre autres coupes transversales nord-sud ont été évaluées pour savoir si les sols s'étaient tassés davantage le long de la rue Rideau. Pour chacune de ces coupes transversales, le calendrier des activités d'OLRTC dans les alentours correspondait à la durée de l'évolution du tassement des sols. Bien que le tassement des sols observé en surface à ces endroits ne semble pas être lié directement à l'affaissement de la chaussée le 8 juin 2016, il est intéressant de noter une corrélation, puisque le tassement des sols a augmenté considérablement alors même que se déroulaient les activités liées au tunnel. Comme l'indiquent les

figures 7-1 et **7-2**, la coupe transversale de la zone la plus proche de l'entrée ouest a révélé un tassement supplémentaire des sols lié essentiellement aux travaux d'installation du SE (soit l'excavation et l'installation des raidisseurs, des tirants d'ancrage et de la voûte-parapluie).

Dans le sens est, les autres coupes transversales évaluées pour mesurer le tassement supplémentaire des sols proviennent de l'espace souterrain de la station Rideau entre les repères de chaînage 102+405 et 102+420. À tous ces endroits, le tassement supplémentaire des sols mesuré grâce aux DSTSS correspondait aux différentes durées au cours desquelles OLRTC a installé les voûtes-parapluies ou procédé à l'excavation du tunnel. À titre d'exemple, la **figure 7-3** représente les tassements enregistrés par les DSTSS 10199-10201 et 10220-10222 à partir des premières semaines d'avril 2016 jusqu'au début de mai 2016. Comme l'indique cette figure, ces nouveaux tassements sont liés à l'installation des voûtes-parapluies et aux travaux d'excavation de la calotte supérieure de la station Rideau, entre les repères de chaînage 102+423 et 102+403.

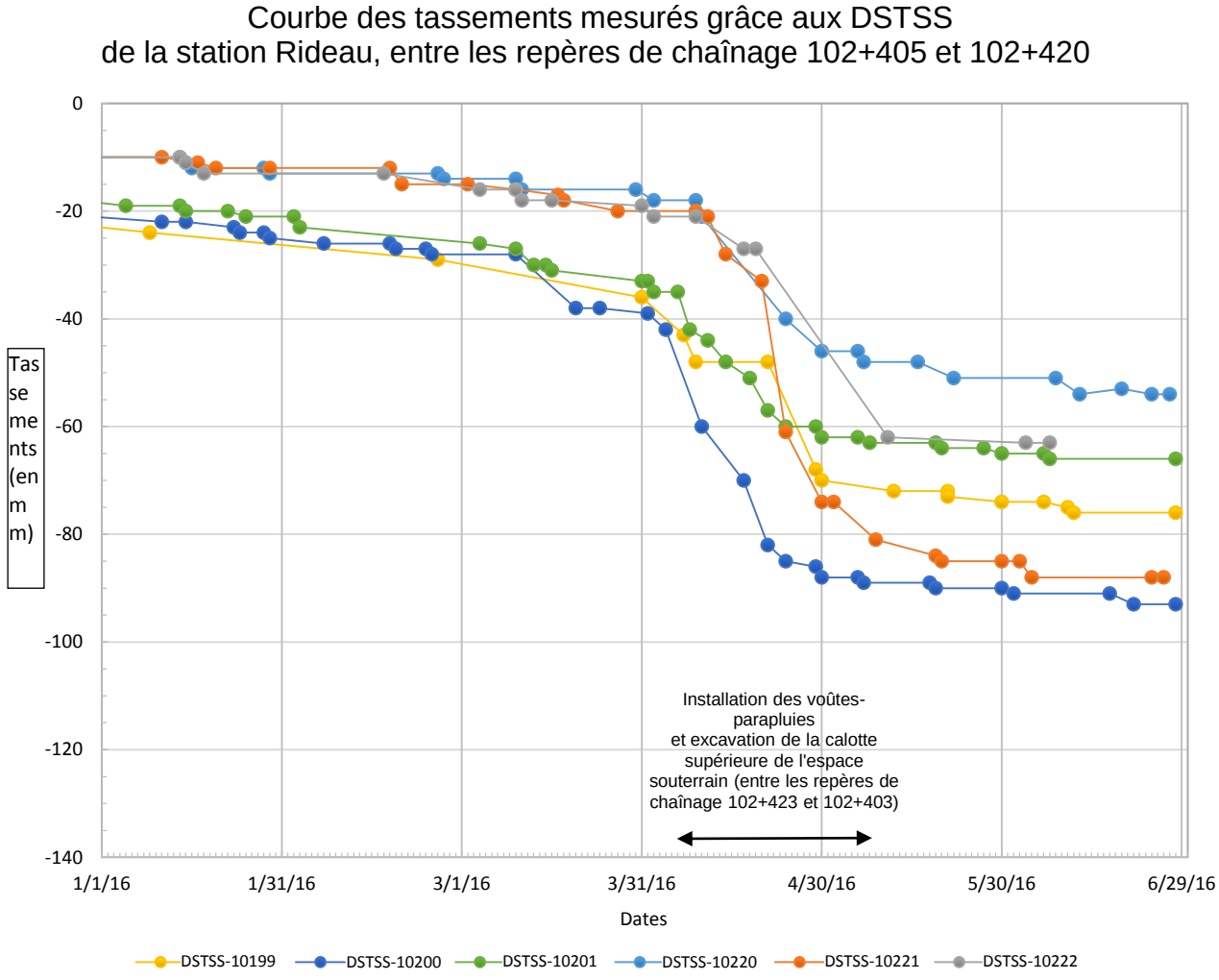

Figure 7-3 : Courbe des tassements mesurés grâce aux DSTSS de la station Rideau, entre les repères de chaînage 102+405 et 102+420

Les relevés de l'extensomètre 40014 (situé au chaînage 102+340) étaient surveillés depuis le début de 2015. Au cours de ces 18 mois, différents relevés ont parfois indiqué un accroissement du tassement de 5 à 10 mm, avant de tout de suite révéler de nouveau un tassement stable sur des durées prolongées. Puisqu'une évolution à la hausse du tassement a été constatée périodiquement pendant la durée au cours de laquelle cet appareil a été installé et parce que le tassement a en fait augmenté alors que l'on s'attendait

à ce qu'il baisse, il est difficile d'établir un lien entre ces relevés et les activités de construction, de quelque nature que ce soit, qui se déroulaient dans les environs.

7.2 Dispositifs de surveillance des structures (DSS)

Entre avril et le 8 juin 2016, on a surveillé le tassement des sols de sept structures grâce à un total d'environ 65 DSS dans l'ensemble du secteur où la chaussée s'est affaissée. Il s'agissait notamment des quatre immeubles du côté nord de la rue Rideau (45, 47-57, 73, rue Rideau (liaison avec la Compagnie de la Baie d'Hudson) et édifice Freiman), ainsi que des deux immeubles du côté sud de la rue Rideau (édifice Wellington, construit à l'origine pour La Métropolitaine, et 50, rue Rideau, Centre Rideau) et de la passerelle piétonnière est (qui enjambe la rue Rideau, dont les fondations sont assises des deux côtés de la rue et dont l'étayage se trouve du côté sud). Dans ce secteur précis, le seul immeuble qui n'a pas été surveillé dans les semaines qui ont précédé le 8 juin était celui, en rénovation, du 10 de la rue Rideau (à l'intersection de la rue Rideau et de la promenade du Colonel By).

Les quatre DSS du 45 et du 47-57 de la rue Rideau ont permis de constater un tassement supplémentaire de 2 à 6 mm dans la période comprise entre le 8 et le 11 juin 2016. Avant le 8 juin et après le 11 juin, les quatre DSS ont révélé que le tassement était stable. Comme l'indique la **figure 7-4**, les DSS installés au 73 de la rue Rideau (DSS 21141 et 21241) n'ont pas permis de relever de tassement important avant, pendant ou après le 8 juin 2016.

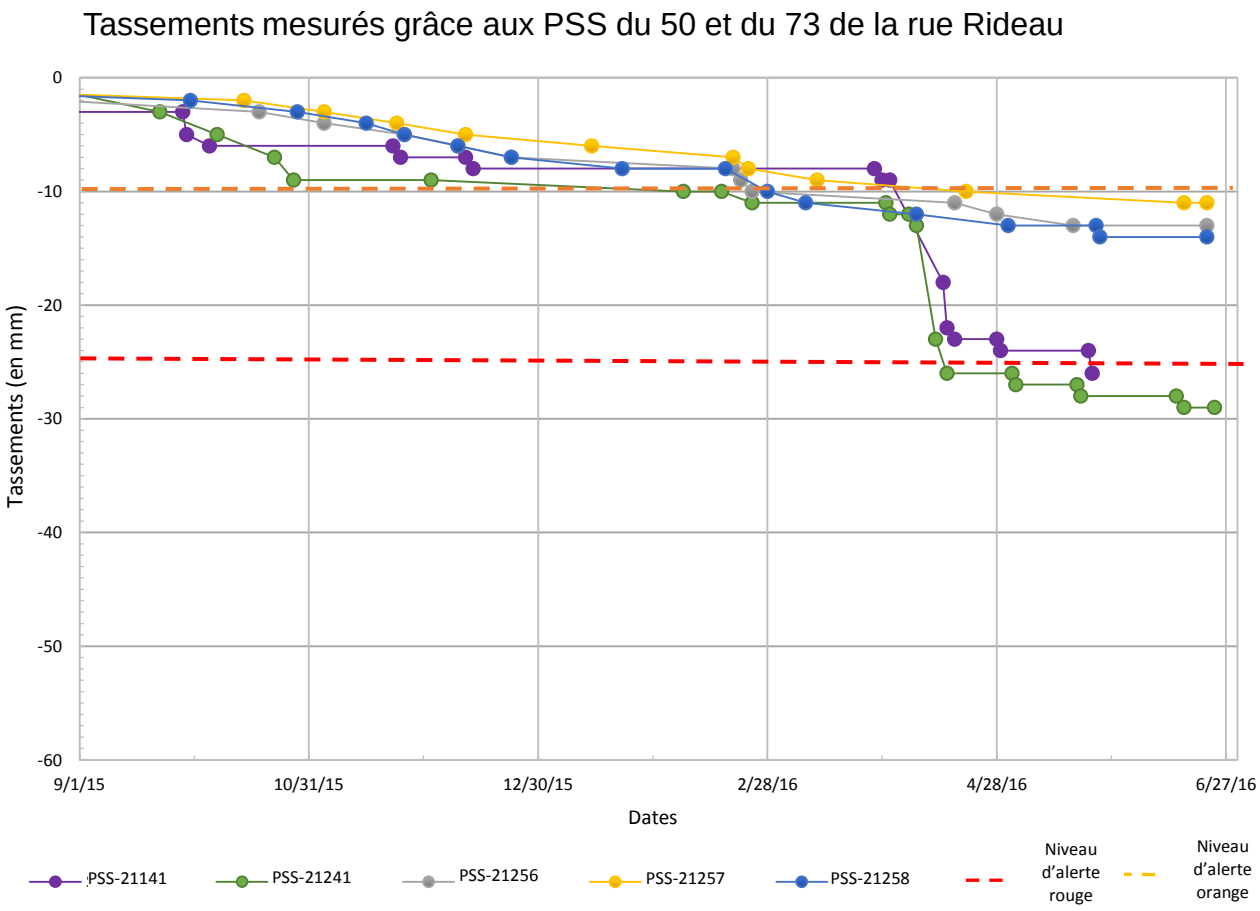

Figure 7-4: Tassements mesurés grâce aux DSS du 50 et du 73 de la rue Rideau

Dans l'ensemble, les 28 DSS/DSTSS surveillés pour l'édifice Freiman ont révélé que deux niveaux d'alerte rouge et un niveau d'alerte jaune ont été dépassés pendant au moins un mois avant le 8 juin 2016. Le 8 juin et dans les semaines qui ont suivi, trois de ces DSS ont tous révélé un tassement stable, et un seul des 25 autres DSS a révélé un tassement supplémentaire de 3 mm. Dans l'édifice Wellington, 15 des 18 DSS/DSTSS surveillés ont permis de constater un tassement stable, pendant au moins un mois, avant, pendant et après le 8 juin, tout comme les trois dispositifs de détection des niveaux d'alerte jaune. La **figure 7-4** indique qu'on a surveillé, au 50 de la rue Rideau (Centre Rideau), trois DSS (21256-21258) qui ont tous révélé un tassement stable pendant au moins un mois avant, pendant et après le 8 juin. Enfin, sur la passerelle piétonnière est, deux des DSS installés ont révélé que les niveaux d'alerte (un niveau d'alerte jaune et un rouge) ont été dépassés pendant quelques mois avant le 8 juin, alors que les six autres DSS n'ont pas révélé de dépassement des niveaux d'alerte. Toutefois, les huit DSS ont tous permis de relever un tassement stable avant, pendant et après le 8 juin 2016.

7.3 Inclinomètre

L'inclinomètre 30012 a été installé à moins de 2 m de l'extrémité ouest de l'entrée ouest. Les déplacements latéraux mesurés grâce à cet appareil n'ont pas révélé de hausse des déplacements dans les jours qui ont précédé l'affaissement de la chaussée, le 8 juin 2016.

7.4 Piézomètres

Douze des 13 piézomètres installés à moins de 200 m du secteur où la chaussée s'est affaissée ont permis de relever une évolution des niveaux de la nappe phréatique à peu près au moment où la chaussée s'est affaissée, le 8 juin. Les relevés du capteur du treizième piézomètre (n^{o} 51049) dépassaient le champ de captage.

Sept des piézomètres, pour un total de 12 niveaux de captage, ont été installés non loin du secteur où la chaussée s'est affaissée le long de la rue Rideau; l'un de ces appareils (51046) a été détruit par l'affaissement. Les six autres étaient installés plus loin dans le sens nord, sud ou est (nettement plus loin que le secteur où la chaussée s'est affaissée). Les trois piézomètres les plus proches de ce secteur, dont le 51046 représenté dans la **figure 7-5**, ont permis de relever des niveaux essentiellement stables ou en baisse de la nappe phréatique dans les jours qui ont précédé le 8 juin 2016. Par exemple, le piézomètre 51046, installé à environ 10 m à l'est du front de taille de la partie ouest de la banquette du tunnel le jour où la chaussée s'est affaissée, a permis de constater que le niveau de la nappe phréatique avait baissé d'environ 6 m pendant l'installation de la voûte-parapluie de la partie ouest de la banquette du tunnel. Il convient également de signaler que les niveaux de la nappe phréatique ont baissé, selon les relevés de ce piézomètre, pendant l'installation d'une voûte-parapluie dans l'espace souterrain de la station Rideau entre le début et le milieu de mai 2016 et qu'ils se sont en quelque sorte rétablis à la fin des travaux d'installation de cette voûte-parapluie.

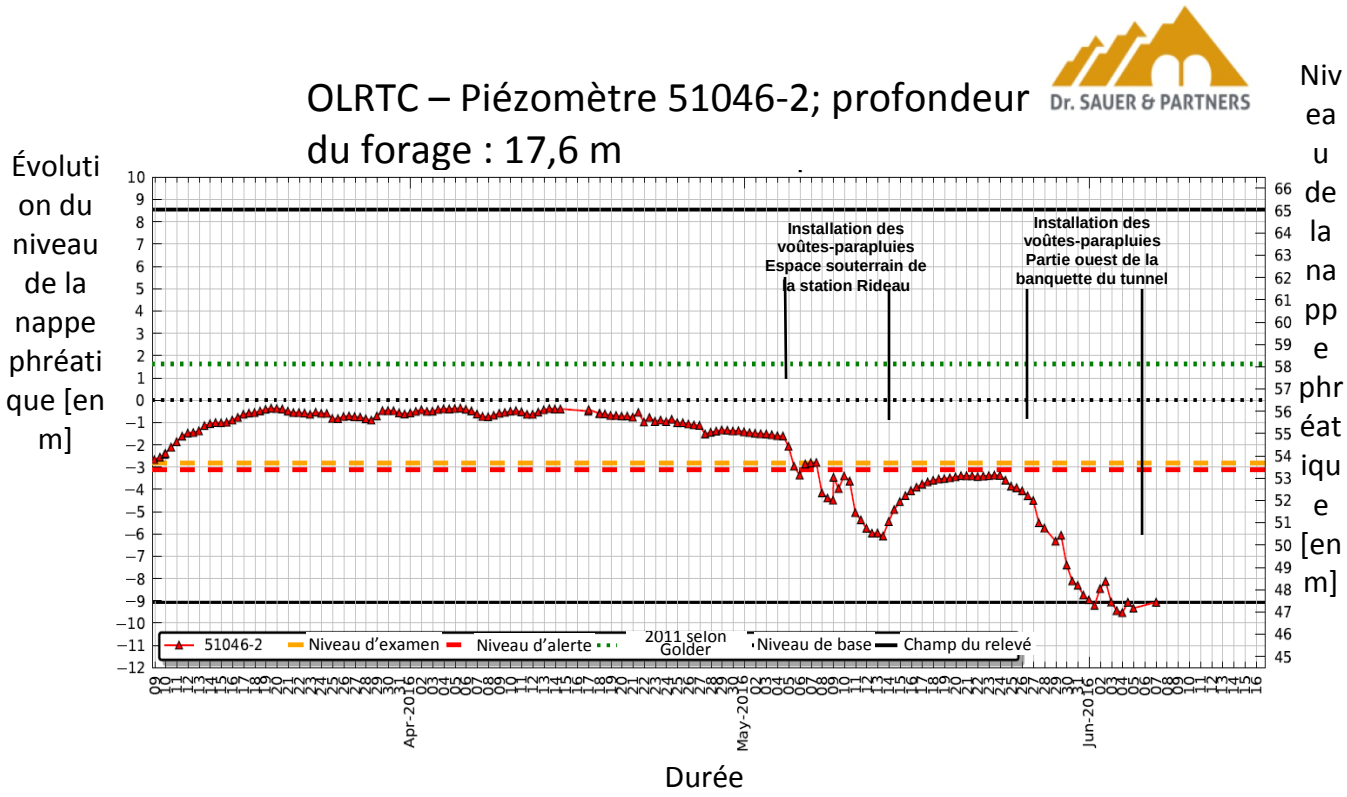

Figure 7-5 : Piézomètre 51046 : relevés du niveau de la nappe phréatique — chaînage 102+360

8.0 Examen de l'échantillon prélevé dans la conduite d'eau principale de 300 mm

Le 23 juin 2016, 15 jours après l'affaissement et peu avant la fin du remblayage de la chaussée affaissée, on a prélevé un échantillon de la partie supérieure de la conduite d'eau principale de 305 mm dont la surface a été percée en pratiquant une découpe dans le tronçon de la conduite d'eau principale à découvert du côté ouest de la chaussée affaissée. Le point précis où cet échantillon a été prélevé est représenté dans l'**annexe 9**. Cet échantillon a été soumis à un examen visuel et à un microexamen d'Integrity Testing Laboratory, Inc. (ITL) le 16 septembre 2016, puis à nouveau le 18 octobre 2016. Les résultats de l'examen d'ITL sont présentés dans une lettre-rapport datée du 9 novembre 2016 et reproduite dans l'**annexe 10**. L'extrait suivant de cette lettre-rapport donne un aperçu des conclusions que tire ITL de ses examens :

> « …d'après la preuve limitée qui a été présentée, on peut dire que la défaillance de la tuyauterie est attribuable à une force externe exercée sur la partie supérieure de cette tuyauterie. Cette force, qui a provoqué une rupture de la partie supérieure de la surface, a fait plier la tuyauterie, ce qui explique que la fracture change de sens et s'étende, comme on peut le constater, dans les deux sens sur toute la circonférence de la tuyauterie. La défectuosité constatée dans la paroi de la tuyauterie n'est pas à l'origine de la fracture. Le mode de défaillance observé élimine aussi la possibilité que cette défaillance ait été causée par la surpressurisation de la tuyauterie. »

On a fait appel au cabinet Simpson Gumpertz & Hager, Inc. (SGH) pour examiner et commenter le rapport d'ITL. Pour qu'il puisse mettre son examen en contexte, on a fourni à SGH des photographies de la chaussée affaissée à partir des premières étapes de l'évolution de l'affaissement jusqu'à la date du

prélèvement de l'échantillon de la partie supérieure de la conduite d'eau principale de 305 mm. SGH, qui commente le rapport d'ITL dans sa lettre datée du 22 novembre 2016 (**annexe 11**), a fait savoir qu'il est difficile de se prononcer sans réserve sur les caractéristiques de la fracture sans d'abord examiner directement l'échantillon. Toutefois, SGH a effectivement fait des commentaires pertinents, inspirés de l'information mise à sa disposition. Les extraits suivants de sa lettre font état des éléments essentiels de ses conclusions :

> « Les caractéristiques de la fracture ne peuvent pas être liées absolument à une force externe exercée à la longue. Les photographies prises sur le terrain indiquent plutôt que différents facteurs pourraient expliquer les dommages externes causés à la tuyauterie à partir du moment où la chaussée a commencé à s'affaisser… ».

> « La morphologie de la fracture correspond essentiellement à un déchirement ductile, qui révèle une surcontrainte, par exemple par pliage parce que la tuyauterie n'était pas soutenue quand le sol s'est tassé. »

> « Les photographies d'ITL ne prouvent pas du tout qu'une fuite ni une fissure ou une défectuosité préexistantes ont pu s'étendre pour finalement provoquer la rupture de la conduite. »

9.0 Résumé, conclusions et limites

La présente section comprend un résumé de l'information et des observations jugées pertinentes pour l'évaluation de la cause fondamentale de l'affaissement de la chaussée de la rue Rideau dans l'avant-midi du 8 juin 2016, nos conclusions quant au scénario probable de la cause fondamentale de l'affaissement, l'exposé des différents autres scénarios qui pourraient expliquer l'affaissement, et enfin, les limites du présent rapport.

9.1 Information et observations pertinentes

On peut résumer comme suit l'information et les observations communiquées à McMillen Jacobs Associates en date du 1er novembre 2016 et jugées pertinentes pour l'évaluation de la cause fondamentale de l'affaissement de la rue Rideau dans l'avant-midi du 8 juin 2016 :

- L'affaissement a été lié à l'effondrement du front de taille de la partie ouest de la banquette du tunnel. Il est important de signaler que la photographie de la **figure 9-1**, prise aux environs de 8 h le 8 juin 2016, représente ce qui paraît toujours correspondre au front de taille complet de l'assise rocheuse dans le front de taille de la partie ouest de la banquette du tunnel aux abords du chaînage 102+349,5. Comme l'indique la **figure 9-2**, au moment où l'effondrement s'est produit, le front de taille de la partie ouest de la banquette du tunnel se trouvait à peu près au chaînage 102+350 dans un état pour ainsi dire mixte, ce qui signifie qu'il y avait à la fois des sols (meubles) et une assise rocheuse dans le front de taille, les sols se trouvant du côté sud du front de taille. Il semble que le front de taille ait commencé à s'effondrer entre 10 h 15 et 10 h 30; les travailleurs affectés au front de taille du tunnel ont lors constaté que le problème, révélé à la fois par le ruissellement abondant de l'eau et l'instabilité des sols dans le front de taille du tunnel, était assez grave pour les obliger à sortir rapidement de la calotte.

Figure 9-1 : Chaînage 102+349,5 : photographie de la calotte de l'assise rocheuse (le 8 juin 2016 à 8 h)

Figure 9-2 : Chaînage 102+350 : photographie de la calotte de l'assise rocheuse et des sols meubles (le 8 juin 2016 aux environs de 10 h 20, avant l'effondrement complet du front de taille)

- En surface, la chaussée a commencé à s'affaisser du côté sud de la rue Rideau, à une distance comprise entre 2 et 4 m environ à l'est du front de taille de la partie ouest de la banquette du tunnel, et a continué de s'affaisser dans le sens nord de la rue Rideau. L'information disponible ne permet pas de connaître avec certitude l'heure exacte à laquelle on a pu constater, en surface, que la chaussée commençait à s'affaisser; toutefois, entre 10 h 30 et 10 h 35, l'affaissement s'était étendu à toute la moitié sud de la rue Rideau. Le lecteur est invité à consulter les **figures 1-1** et **1-2**.

- L'affaissement de la chaussée explique les failles relevées dans une conduite d'eau principale de 305 mm du côté sud de la rue Rideau et dans une conduite d'eau principale de 400 mm du côté nord de cette rue. La conduite d'eau principale de 305 mm du côté sud de la rue a été touchée avant la conduite d'eau principale de 400 mm, qui a été percée parce que l'affaissement s'est étendu dans le sens nord en travers de la rue Rideau.

- Les forages d'essai effectués pendant la phase de l'ingénierie préliminaire du projet et prévus dans l'Entente du projet ont révélé que l'on pouvait s'attendre à des sols sablonneux saturés sous le niveau de la nappe phréatique, là où se trouve le front de taille de la partie ouest de la banquette du tunnel aux environs du chaînage 102+350. On s'attendrait à ce que, pleinement saturés (c'est-à-dire au-dessous du niveau de la nappe phréatique), les sols deviennent très instables et soient fluides lorsqu'ils sont découverts pendant les travaux d'excavation. Le lecteur est invité à consulter la **figure 2-1**.

- Les puits de sondage forés en position subhorizontale à partir du front de taille de la partie ouest de la banquette du tunnel à la fin de mai 2016, lorsque ce front de taille se trouvait aux alentours du chaînage 102+336 (soit à 14 m à l'ouest de sa position le 8 juin 2016), ont révélé qu'il fallait s'attendre à des sols meubles à peu près au chaînage 102+350, ce qui cadre avec l'information apportée par les forages d'essai effectués dans la phase de l'ingénierie préliminaire et prévus dans l'Entente du projet. Ces puits de sondage ont révélé des débits relativement élevés de ruissellement des eaux de la nappe phréatique (soit de 26 à 38 l/min par puits de sondage), ce qui confirme qu'il fallait s'attendre à des sols sablonneux saturés sous le niveau de la nappe phréatique. Le lecteur est invité à consulter le **tableau 5-2** et l'**annexe 4**.

- Durant la période comprise entre le 26 mai et le 7 juin 2016, lorsque le front de taille de la partie ouest de la banquette du tunnel se trouvait dans l'assise rocheuse à peu près au chaînage 102+348,5, on a installé la voûte-parapluie projetée. Selon les comptes rendus, l'installation de cette voûte-parapluie a été laborieuse et difficile, et il est souvent question, dans le rapport, du ruissellement abondant de l'eau (dont le débit déclaré totalise 276 l/min), du lessivage du coulis et des fortes quantités de coulis injecté (dont le volume déclaré de coulis injecté totalise 17 297 l). Ces conditions s'apparentent aux observations précédentes sur les puits de sondage. Le lecteur est invité à consulter le **tableau 5-1** et l'**annexe 3**.

- Le niveau de la nappe phréatique dans les alentours de la partie ouest de la banquette du tunnel avant le début de l'installation de la voûte-parapluie dépassait d'environ 10 m la couronne du tunnel. Lorsqu'on a commencé le forage de cette voûte-parapluie, le niveau de la nappe phréatique a commencé à baisser. À la fin de l'installation de la voûte-parapluie, le niveau de la nappe phréatique, selon le relevé du piézomètre 51046, installé à environ 10 m à l'est du front de taille de la partie ouest de la banquette du tunnel, s'était stabilisé à environ 4 m au-dessus de la couronne du tunnel. La baisse du niveau de la nappe phréatique mesuré grâce au piézomètre est révélatrice du ruissellement des eaux dans la calotte du tunnel dans le cadre du processus d'installation de la voûte-parapluie. Le lecteur est invité à consulter la **figure 7-5**.

- La surface du sol au-dessus de la voûte-parapluie de la partie ouest de la banquette du tunnel au chaînage 102+348,5 s'est tassée pendant l'installation de la voûte-parapluie (soit dans la période comprise entre le 26 mai et le 7 juin 2016). Mesurée grâce aux dispositifs de surveillance du tassement installés directement au-dessus du front de taille du tunnel, l'importance du tassement de la surface du sol a pu atteindre 20 mm environ. Il n'y avait pas de dispositif de surveillance du tassement des sols à moins de 25 m à l'est du front de taille du tunnel; toutefois, on se serait attendu à ce que le tassement de la surface du sol dépasse 20 mm à l'est du front de taille du tunnel dans la zone où la voûte-parapluie a été installée. Si cette conclusion est justifiée, c'est parce qu'on a observé que la surface du sol s'est tassée dans l'ouverture des joints et dans les

fissures préexistantes du trottoir du côté nord de la rue Rideau à côté de la zone dans laquelle la voûte-parapluie a été installée, comme on peut le constater dans la **figure 9-3**, ce que l'on n'a pas pu observer du côté sud de la rue Rideau, puisque de ce côté de la rue, il avait fallu déplacer les trottoirs en raison de l'excavation de l'entrée de la partie ouest de la station Rideau. Si la surface du sol s'est tassée, c'est probablement parce que le terrain a glissé pendant l'installation de la voûte-parapluie. On a observé un lien comparable entre l'installation de la voûte-parapluie et le tassement de la surface des sols dans le cadre de l'installation de la voûte-parapluie de la station Rideau à l'est du secteur où la chaussée s'est affaissée.

Figure 9-3 : Photographie au 47-57 de la rue Rideau : Séparation entre le trottoir et la bordure de la rue Rideau (6 juin 2016)

- L'excavation de l'entrée ouest de la station Rideau, dont l'extrémité ouest se trouvait non loin du secteur où la chaussée s'est affaissée, s'est achevée au milieu de mai 2016. La partie de l'excavation à proximité du secteur où la chaussée s'est affaissée avait environ 5,5 m de profondeur et était étayée par des pieux verticaux et une coque de béton projeté et par des tirants d'ancrage qui se prolongeaient sous la rue Rideau. En outre, des fondations avaient été installées pour les puits forés d'un mètre de diamètre, dans le périmètre au sol de l'entrée ouest de la station Rideau avant le début des travaux d'excavation. On avait installé des dispositifs de surveillance du tassement des sols non loin de l'extrémité est de l'excavation, et on a observé, à proximité de l'excavation, que la surface des sols s'est tassée parce qu'on a foré des puits et installé des tirants d'ancrage et qu'on a procédé à des travaux d'excavation. De même, un DSTSS a permis de constater que la surface des sols s'était tassée du côté ouest de l'excavation.

- On croit savoir qu'à l'origine, selon les plans, le creusage du tronçon de la banquette du tunnel dans les conditions de mixité du front de taille (c'est-à-dire la présence des sols meubles et de l'assise rocheuse sur le front de taille du tunnel) près du chaînage 102+350 consistait à faire

avancer le tunnel d'est en ouest, ce qui revenait à l'excaver d'abord dans les sols, puis dans l'assise rocheuse. À un moment donné, on a décidé d'avancer également la banquette du tunnel d'ouest en est, ce qui explique qu'on ait creusé le tunnel d'abord dans l'assise rocheuse, puis dans les sols. Dans la cadre de la méthode MES pour l'excavation des tunnels, on juge généralement moins risqué de creuser d'abord les sols, puis l'assise rocheuse.

9.2 Scénario probable de la cause fondamentale de l'affaissement

Selon l'information et les observations disponibles, il est très probable que l'affaissement ait essentiellement été provoqué par l'instabilité des sols sablonneux saturés à 4 m environ sous la nappe phréatique du côté sud du front de taille de la partie ouest de la banquette du tunnel près du chaînage 102+350, ce qui a ensuite fait glisser le terrain dans le sol. Ce glissement de terrain s'est probablement produit très rapidement, puisque les sols avaient déjà été déplacés et s'étaient détassés en réaction à l'installation de la voûte-parapluie et à l'excavation de l'entrée ouest de la station Rideau. Ce glissement de terrain a alors probablement entraîné le dispositif de soutènement de la conduite d'eau principale de 305 mm du côté sud de la rue Rideau et sa désastreuse rupture par la suite. Le ruissellement de l'eau à la suite de cette rupture a alors causé l'érosion des sols sablonneux détassés sous la conduite d'eau principale et l'écoulement d'une abondante quantité de sols dans la partie ouest de la banquette du tunnel, ce qui a provoqué l'affaissement d'un vaste pan de la chaussée.

9.3 Autres scénarios de la cause fondamentale de l'affaissement

9.3.1 Fuites préexistantes dans la conduite d'eau principale

L'information et les observations disponibles laissent entendre que la fuite, dans la mesure où elle a essentiellement provoqué l'affaissement de la chaussée, ne s'est produite ni dans la conduite d'eau principale de 305 mm du côté sud de la rue Rideau, ni dans la conduite d'eau principale de 400 mm du côté nord de la rue Rideau avant le 8 juin 2016. Voici l'information et les observations qui justifient cette conclusion :

- On n'a pas observé d'augmentation des niveaux de la nappe phréatique avant le 8 juin 2016, comme on s'y serait attendu s'il s'était produit une fuite abondante dans l'une ou l'autre des deux conduites d'eau principales. Une augmentation des niveaux de la nappe phréatique a en fait été observée relativement à une fuite qui s'est produite dans la conduite d'eau principale de 305 mm à la mi-novembre 2015. En fait, les niveaux de la nappe phréatique à proximité du secteur où la chaussée s'est affaissée ont baissé d'environ 6 m en réaction aux travaux de construction de la partie ouest de la banquette du tunnel dans les jours qui ont précédé l'affaissement de la chaussée.

- Comme l'indique la **figure 9-4**, on n'a pas observé de ruissellement abondant dans l'entrée ouest de la station Rideau comme on s'y serait attendu s'il s'était produit une fuite importante dans la conduite d'eau principale de 305 mm jouxtant cette entrée du côté sud de la rue Rideau.

Figure 9-4 : État de l'entrée ouest (extrémité ouest) le 8 juin 2016 à 8 h (avant l'affaissement)

9.3.2 Rupture de la conduite d'eau principale indépendante des travaux de construction d'OLRTC

Bien que la rupture de la conduite d'eau principale de 305 mm du côté sud de la rue Rideau puisse être attribuable à un mécanisme qui n'a rien à voir avec les travaux de construction d'OLRTC à peu près au moment même où l'on a constaté l'instabilité des sols mixtes du front de taille de la partie ouest de la banquette du tunnel, ce scénario est jugé très improbable, sur la foi de l'information disponible. Dans sa lettre datée du 22 novembre 2016, SGH fait observer que l'« expertise juriscientifique d'ITL ne prouve pas du tout que la conduite d'eau principale en PVC de 300 mm soit liée à la cause fondamentale de l'affaissement de la chaussée ».

9.4 Limites

Le présent rapport s'inspire de l'information et des observations reproduites dans le document intitulé « Rideau Street Shared Data » diffusé sur le site Web e-Builder d'OLRTC en date du 30 novembre 2016. On croit savoir que des données supplémentaires pourraient éventuellement être disponibles. McMillen Jacobs Associates se réserve le droit de réviser les conclusions présentées dans le présent rapport, le cas échéant, à partir d'un examen de l'information supplémentaire qui sera disponible.