

Bureau de la sécurité des transports
du Canada



Transportation Safety Board
of Canada

RAPPORT D'ENQUÊTE FERROVIAIRE
R04Q0040



DÉRAILLEMENT EN VOIE PRINCIPALE

DU TRAIN U-781-21-17

EXPLOITÉ PAR LE CANADIEN NATIONAL

AU POINT MILLIAIRE 3,87 DE LA SUBDIVISION LÉVIS

À SAINT-HENRI-DE-LÉVIS (QUÉBEC)

LE 17 AOÛT 2004

Canada



Le Bureau de la sécurité des transports du Canada (BST) a enquêté sur cet événement dans le seul but de promouvoir la sécurité des transports. Le Bureau n'est pas habilité à attribuer ni à déterminer les responsabilités civiles ou pénales.

Rapport d'enquête ferroviaire

Déraillement en voie principale

du train U-781-21-17

exploité par le Canadien National

au point milliaire 3,87 de la subdivision Lévis

à Saint-Henri-de-Lévis (Québec)

le 17 août 2004

Rapport numéro R04Q0040

Résumé

Le 17 août 2004, vers 14 h 40, heure avancée de l'Est, 18 wagons-citernes du train U-781-21-17, un train-bloc de produits pétroliers du Canadien National en provenance de la raffinerie d'Ultramar Canada Inc. à Lévis, arrondissement de Saint-Romuald (Québec) et à destination de Montréal (Québec), ont déraillé au point milliaire 3,87 de la subdivision Lévis, dans la zone marécageuse de la Grande Plée Bleue, près de Saint-Henri-de-Lévis (Québec). Environ 200 000 litres d'essence et d'huile de chauffage se sont déversés mais ont pu être récupérés sans causer de dommages permanents à l'environnement. L'accident n'a pas fait de blessés.

This report is also available in English.

1.0	Renseignements de base.....	1
1.1	L'accident	1
1.2	Dommages.....	1
1.3	Intervention d'urgence	3
1.4	Renseignements sur le train.....	3
1.5	Renseignements sur le personnel.....	3
1.6	Renseignements consignés.....	3
1.7	Renseignements météorologiques	4
1.8	Renseignements sur le lieu de l'événement.....	4
1.9	Particularités de la voie et de la plate-forme	4
1.10	Renseignements sur la subdivision	4
1.11	Inspections de la voie.....	5
1.12	Infrastructure de la voie	6
1.12.1	Profil stratigraphique.....	6
1.12.2	Collecte de données lors du passage des trains	8
1.12.3	Déplacements verticaux et pressions interstitielles	8
1.12.4	Tassements cumulatifs.....	8
1.12.5	Influence du niveau de la nappe phréatique.....	8
1.12.6	Influence de la charge d'essieu et de la vitesse	9
1.12.7	Étendue de la zone d'influence	9
1.13	Études géotechniques	9
1.13.1	Études géotechniques mandatées par le BST	9
1.13.1.1	Firme de géotechnique de Québec.....	9
1.13.1.2	Université Laval	9
1.13.2	Évaluation géotechnique du Canadien National.....	11
1.14	Initiatives de l'industrie.....	11
1.15	Construction des wagons-citernes	12
2.0	Analyse	15
2.1	Stabilité de la plate-forme	15
2.1.1	Résistance au glissement de pente et capacité portante	15
2.1.2	Rupture par poinçonnement	15
2.1.3	Identification des sites susceptibles au poinçonnement.....	16
2.1.4	Méthodes d'inspection et d'entretien de la voie et de la plate-forme.....	16
2.2	Résistance aux impacts des wagons-citernes de catégorie 111A.....	17
2.3	Intervention d'urgence	17
3.0	Conclusions.....	19
3.1	Faits établis quant aux causes et aux facteurs contributifs.....	19
3.2	Faits établis quant aux risques.....	19
3.3	Autres faits établis.....	19
4.0	Mesures de sécurité	21
4.1	Mesures prises	21
4.2	Mesures nécessaires	21
4.2.1	Stabilité de la plate-forme	21
4.2.2	Normes sur les wagons-citernes non pressurisés.....	22

Annexes

Annexe A – Déplacements verticaux et pressions interstitielles	25
Annexe B – Tassements cumulatifs	27
Annexe C – Analyse de stabilité (glissement de pente).....	29
Annexe C1 – Déplacements verticaux et pressions interstitielles	30
Annexe C2 – Analyse de stabilité des pentes du remblai de la voie au point milliaire 3,87	31
Annexe D – Sigles et abréviations.....	32

Photos

Photo 1. Vue aérienne du lieu du déraillement	2
Photo 2. Dépression au centre de la voie	2

Figures

Figure 1. Lieu de l'accident.....	1
Figure 2. Coupe stratigraphique longitudinale	7
Figure 3. Coupe transversale au point milliaire 3,87	7
Figure 4. Évolution des tassements et de la distorsion des fibres de tourbe	10
Figure 5. Rupture en cisaillement par poinçonnement au point milliaire 3,87	11

1.0 Renseignements de base

1.1 L'accident

Le 17 août 2004 vers 14 h 40, heure avancée de l'Est¹, le train U-781-21-17 (le train) du Canadien National (CN)², en provenance de la raffinerie d'Ultramar Canada Inc. (Ultramar) à Lévis, arrondissement de Saint-Romuald (Québec), roule en direction de Montréal (Québec). Le train couvre une distance de 11,2 milles lorsqu'un freinage intempestif provenant de la conduite générale se déclenche. L'équipe du train suit les mesures d'urgence et constate que 18 wagons (du 22^e au 39^e) ont déraillé.

Avant le freinage d'urgence, l'équipe n'a relevé aucune irrégularité dans la conduite du train ou dans l'état de la voie.

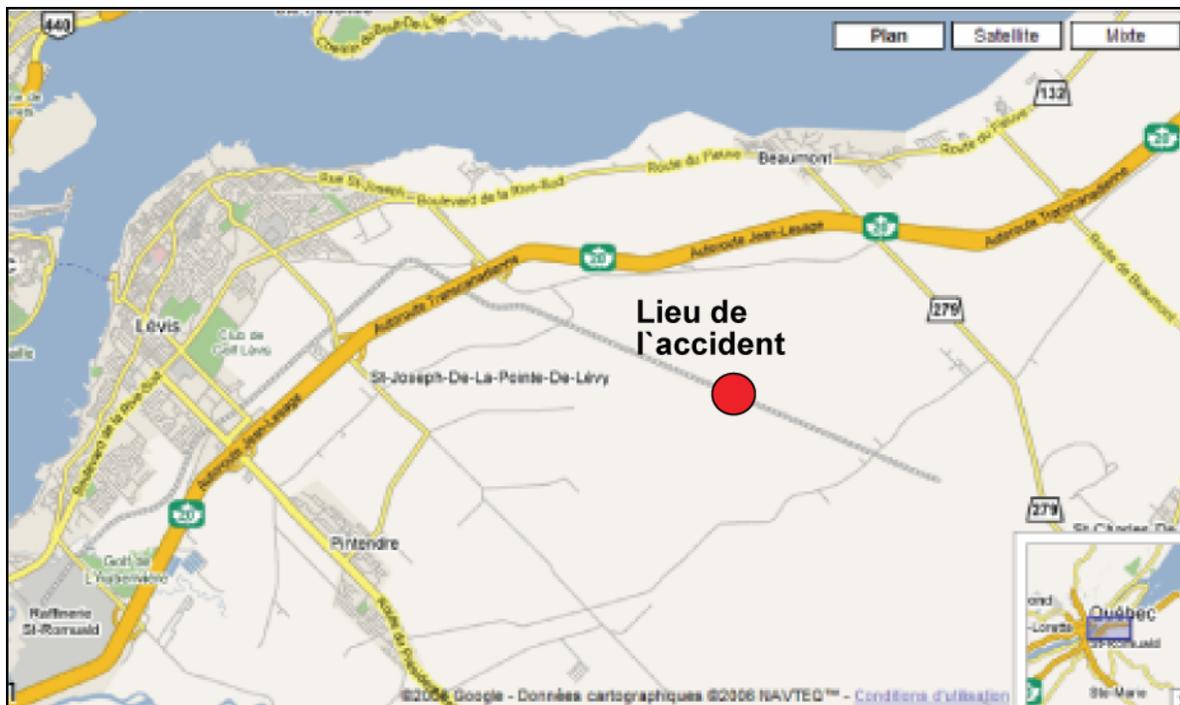


Figure 1. Lieu de l'accident

1.2 Dommages

Le 39^e wagon du train est resté sur ses roues à une distance de 100 m au nord de la zone principale du déraillement; son bogie menant a déraillé du côté est de la voie principale. Les huit wagons précédents se sont mis en portefeuille et se sont enfoncés dans la tourbe (voir la photo 1). Les autres wagons se sont renversés du côté est, parallèlement à la voie.

¹ Toutes les heures sont en heure avancée de l'Est (temps universel coordonné moins quatre heures).

² Voir l'annexe D pour la signification des sigles et abréviations.

Immédiatement derrière le 29^e wagon, la voie s'est effondrée et on distingue la présence d'une dépression au centre de la voie (voir la photo 2). La voie ferrée a été détruite sur une distance de 250 m.



Photo 1. Vue aérienne du lieu du déraillement



Photo 2. Dépression au centre de la voie

Les wagons déraillés ont subi des dommages aux châssis, aux bogies, aux traverses de caisse et à la timonerie de frein. Les parois des citernes ont été perforées sur trois wagons. Trois wagons ont subi des perforations sur les têtes de citerne et les autres wagons ont été légèrement bosselés. Les raccords flexibles de chargement se sont détachés entre certains wagons et le

coude de chargement d'un wagon a été endommagé. Environ 200 000 litres d'essence et d'huile de chauffage se sont déversés mais ont pu être récupérés sans causer de dommages permanents à l'environnement.

1.3 *Intervention d'urgence*

Le service de la Sécurité publique de la ville de Lévis a été averti immédiatement après l'accident. Les responsables de la Sécurité publique ont déclenché le plan des mesures d'urgence de la ville. En plus du corps du service des incendies de Lévis et du personnel du CN, des représentants des différents paliers de gouvernement, de l'industrie pétrolière ainsi que des compagnies d'assainissement sont arrivés sur les lieux à divers intervalles.

Les vapeurs des hydrocarbures ont affecté la qualité de l'air dans les environs immédiats du lieu de l'accident, ce qui a nécessité le bouclage et l'évacuation de la zone de l'accident dans un rayon de un kilomètre durant quatre jours. Les opérations de nettoyage et de récupération des hydrocarbures ont commencé dès que les fuites de liquides et de vapeurs ont été contrôlées. Les hydrocarbures déversés dans les fossés et dans le marécage ont été contenus par des estacades et des digues pour limiter la contamination. Deux compagnies de nettoyage ont procédé par la suite à la récupération des hydrocarbures et à la décontamination de l'eau et du sol.

1.4 *Renseignements sur le train*

Le train est constitué de 2 locomotives, mesure environ 4040 pieds et pèse quelques 8170 tonnes. Il est formé de 68 wagons-citernes chargés répartis en quatre rames. Les deux premières rames sont chargées d'huile de chauffage (UN 1202), et les deux dernières rames sont chargées d'essence (UN 1203). Une inspection du train et un essai de freins ont été faits avant le départ du train de Saint-Romuald. Aucune irrégularité n'y a été relevée.

Les wagons sont attelés en permanence en rames de 17 wagons avec des raccordements et de l'équipement connexe permettant de charger ou de décharger chaque rame à partir d'un seul raccordement du wagon situé à un bout de la rame. Les wagons sont affectés au transport d'hydrocarbures entre la raffinerie d'Ultramar à Saint-Romuald et des centres de distribution à Montréal (Québec), Maitland (Ontario) et Miramichi (Nouveau-Brunswick).

1.5 *Renseignements sur le personnel*

L'équipe de train se compose d'un mécanicien et d'un chef de train. Ils répondent aux exigences de leurs postes respectifs et satisfont aux exigences en matière de repos et de condition physique.

1.6 *Renseignements consignés*

Le consignateur d'événements de la locomotive de tête indique qu'au moment du serrage des freins d'urgence, le train circulait à une vitesse de 38 mi/h, la manette des gaz étant à la position n° 8.

1.7 Renseignements météorologiques

La température était de 23 °C, des vents faibles soufflaient de l'ouest à 15 km/h et le ciel était clair. Au cours des 30 jours précédant le déraillement, la région avait reçu 96 mm de pluie, ce qui est proche de la normale saisonnière.

1.8 Renseignements sur le lieu de l'événement

Le déraillement a eu lieu dans une zone où la voie traverse la zone marécageuse de la Grande Plée Bleue. Au mois d'avril 1999, il y a eu dans la même zone, au point milliaire 3,85³, un déraillement de 10 wagons (rapport R99Q0019 du BST), attribué au bris d'une éclisse de rail causé par des défauts de nivellement transversal de la voie.

L'examen des wagons déraillés n'a identifié aucune défectuosité préexistante ayant pu contribuer au déraillement. Un essieu dont une roue s'est désaxée ainsi que trois morceaux de rail brisés ont été récupérés sur les lieux et envoyés au Laboratoire technique du BST pour fins d'analyse. L'examen de la roue déplacée et des trois morceaux de rail brisés (rapport LP 157/2004) par le Laboratoire technique du BST a révélé que le déplacement de la roue et les ruptures du rail étaient dus à des contraintes instantanées excessives survenues lors du déraillement.

Le nivellement transversal de la voie mesuré au nord du dernier wagon déraillé, entre le point milliaire 3,905 et le point milliaire 3,955, varie de 12 à 20 mm, la limite permise par la Circulaire sur les méthodes normalisées (CMN) 3101 du CN et le *Règlement sur la sécurité de la voie* (RSV) approuvé par Transports Canada étant de 44 mm.

1.9 Particularités de la voie et de la plate-forme

À la suite du déraillement de 1999, la plate-forme a été renforcée par des travaux de réhabilitation d'envergure entre les points milliaires 3 et 5,9. Les joints de rail ont été éliminés et de longs rails soudés de 132 livres ont été installés. De nouvelles traverses en bois dur n° 2 ont été posées à raison de 3200 traverses par mille de voie. Les selles de rail à double épaulement ainsi que les anticheminants ont été renouvelés. La couche de ballast a été augmentée et la voie a été renivelée. Une berme et un nouveau fossé ont été construits sur le côté est de la voie.

1.10 Renseignements sur la subdivision

La subdivision Lévis s'étend sur une distance d'environ 15 milles entre Saint-Charles (point milliaire 0,0) et la raffinerie d'Ultramar à Saint-Romuald (point milliaire 14,97). La voie principale se compose d'une voie simple et est orientée dans l'axe nord-sud. La circulation des trains est régie par la régulation de l'occupation de la voie (ROV), en vertu du *Règlement d'exploitation ferroviaire du Canada* (REF) et des instructions spéciales du CN, sous la surveillance d'un contrôleur de la circulation ferroviaire posté à Montréal. La voie est de catégorie 3 selon le RSV. La vitesse maximale permise pour les trains de marchandises était de 40 mi/h.

³ Anciennement point milliaire 105,5 de la subdivision Montmagny.

La ligne a été construite entre 1879 et 1884. De 1987 à 1995, le trafic ferroviaire annuel était d'environ 850 000 tonnes et était composé de trains de voyageurs⁴ et de marchandises. À la suite de l'introduction, en 1996, de trains-blocs transportant des hydrocarbures de la raffinerie de Saint-Romuald, le tonnage annuel a augmenté progressivement pour atteindre environ 6 millions de tonnes. La fréquence des trains est dictée par la demande d'hydrocarbures; il y a en moyenne quatre trains par jour en période de pointe. Les charges autorisées sur la voie sont présentées au tableau 1.

Période	Locomotives	Wagons	
		Voyageurs	Marchandises
1879 à 1920	75 (8 à 10 essieux)	50 (4 essieux)	40 (4 essieux)
1920 à 1950	140 (14 essieux)	90 (6 essieux)	75 (4 essieux)
1950 à 1960	135 (4 essieux)	70 (4 essieux)	100 (4 essieux)
1960 à 1990	175 (6 essieux)	70 (4 essieux)	131,5 (4 essieux)
Depuis 1990	195 (6 essieux)	70 (4 essieux)	131,5 (4 essieux)

Tableau 1. Charges autorisées des locomotives et des wagons (en tonnes)

Une analyse détaillée des mouvements de trains et de la répartition du trafic, effectuée sur une période de deux mois précédant l'accident, n'a révélé aucun changement notable de trafic en termes de fréquence ou de tonnage des trains.

1.11 Inspections de la voie

La voie a été inspectée trois fois par semaine depuis l'accident de 1999, alors que la fréquence requise par le RSV est de deux fois par semaine.

Lors de l'inspection par un véhicule de contrôle de l'état géométrique de la voie, le 7 mai 2004, le nivellement transversal était d'environ 20 mm au voisinage du point de déraillement. Le CN a indiqué que la voie a été renivelée, le 30 juillet 2004, soit deux semaines avant l'accident.

La dernière auscultation en continu des défauts internes des rails dans le secteur du déraillement a eu lieu le 3 août 2004 et aucune anomalie n'a été relevée.

Le superviseur adjoint de la voie, accompagné de l'ingénieur en chef régional du CN et de l'inspecteur de l'infrastructure de Transports Canada, a effectué la dernière inspection visuelle le 16 août 2004 à bord d'un véhicule rail-route et n'a noté aucun défaut de géométrie.

⁴ Le service voyageurs a été supprimé en octobre 1998.

1.12 *Infrastructure de la voie*

1.12.1 *Profil stratigraphique*

Plusieurs campagnes de forages, effectuées entre les points milliaires 4,2 et 3,75, ont permis d'établir le profil stratigraphique le long de la ligne de centre de la voie ferrée et de mettre en place l'instrumentation requise pour les systèmes d'acquisition en continu des données visant à mesurer les variations de pression d'eau interstitielle et la déformation verticale causée par la pression dans le sol. Le profil stratigraphique le long de la ligne de centre de la voie ferrée a été établi tel que présenté à la figure 2 alors que la figure 3 montre la coupe transversale de la voie ferrée. Le socle rocheux se trouve à des profondeurs comprises entre 3 et 5 m. Il s'agit d'un schiste brun rougeâtre à gris verdâtre, fracturé et très friable. Le niveau de la nappe phréatique est à environ 1,0 m sous la voie ferrée et se situe dans la couche de remblai.

L'épaisseur de la couche de ballast varie de 0,3 à 0,9 m. Le ballast est constitué de pierres concassées dont la granulométrie est composée de 94 % de granulats grossiers (gravier) et de 6 % de granulats fins (sable et limon). Le ballast repose sur une couche de remblai constitué de sable graveleux brun à gris contenant un peu de limon. L'épaisseur de la couche de remblai varie de 0,6 à 1,2 m.

Le remblai repose sur une couche de tourbe dont l'épaisseur varie entre 1,5 et 3,0 m en diminuant en direction sud. Il s'agit d'une tourbe noire fibreuse très compressible dont la teneur en eau⁵ est comprise entre 325 % et 841 % avec des valeurs de l'ordre de 500 % sous la voie ferrée. La masse volumique de la tourbe est d'environ 1000 kg/m³.

⁵ La quantité d'eau dans une masse de sol exprimée en pourcentage du poids d'eau dans la masse.

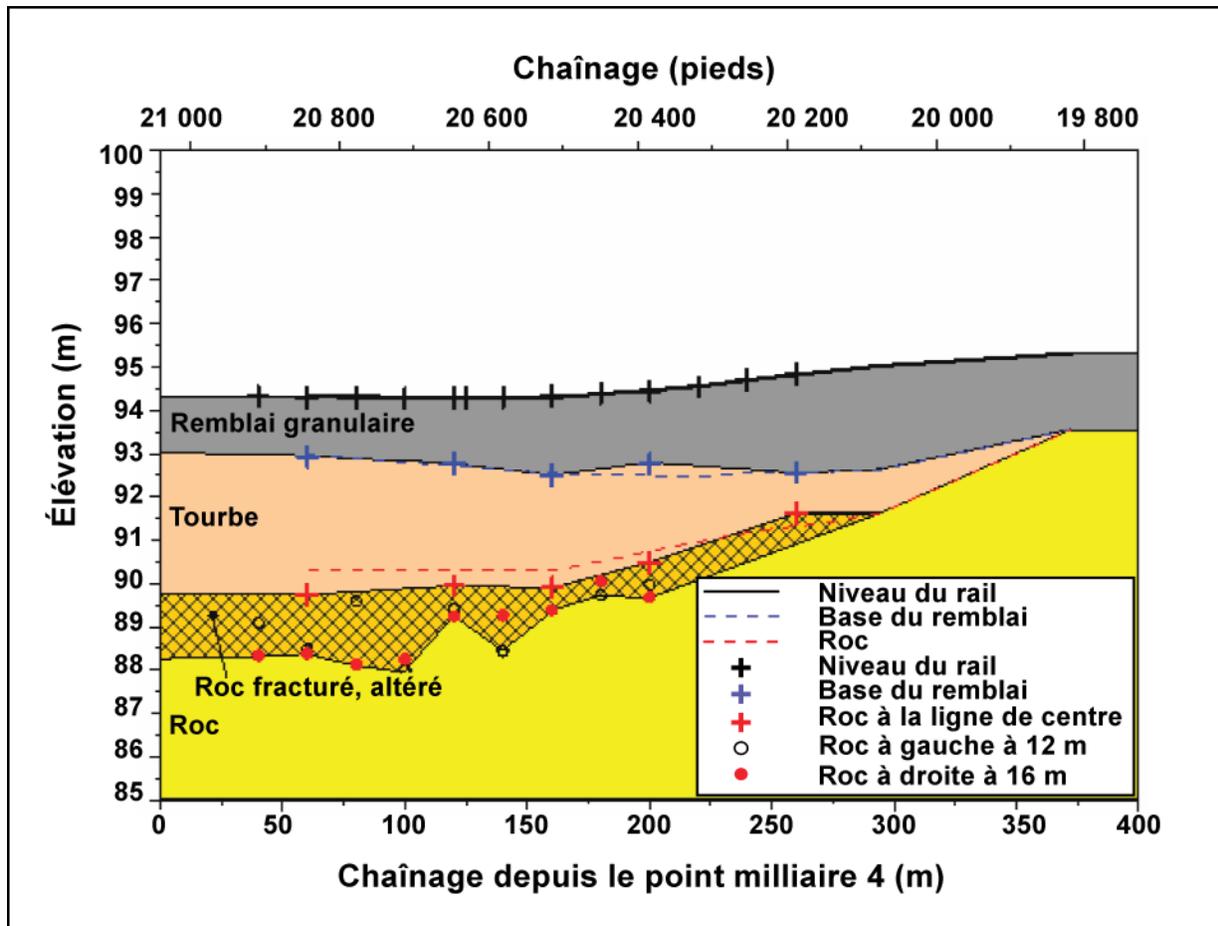


Figure 2. Coupe stratigraphique longitudinale

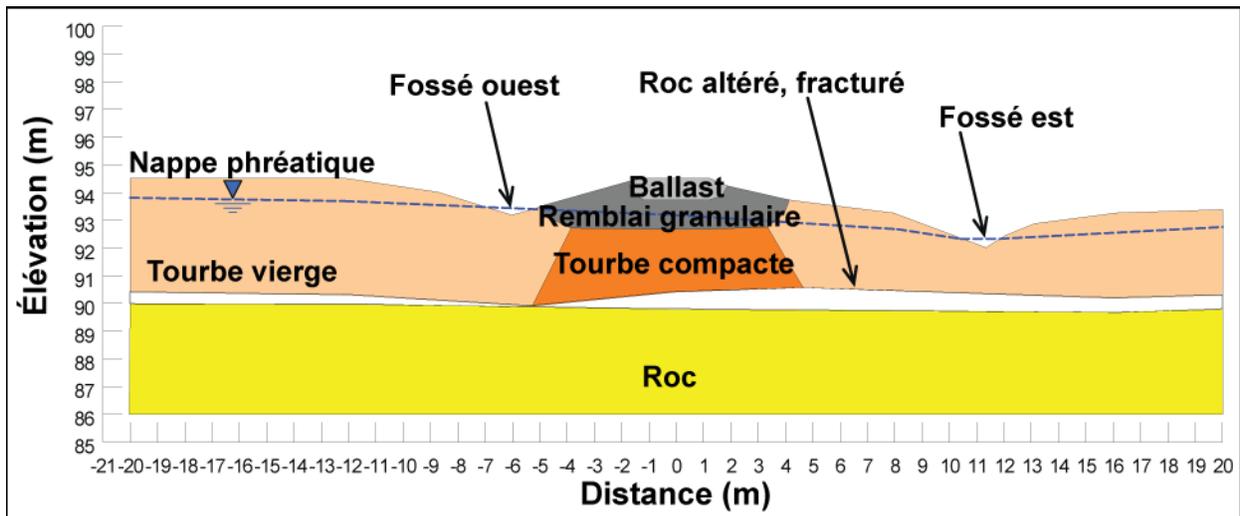


Figure 3. Coupe transversale au point milliaire 3,87

1.12.2 *Collecte de données lors du passage des trains*

Les pressions interstitielles et les vibrations dans la tourbe et les déplacements verticaux des traverses sous l'action des charges répétées imposées par les essieux des wagons ont été mesurés à l'aide de capteurs de pressions et de capteurs de déplacements et enregistrés automatiquement à l'aide de systèmes d'acquisition de données.

Au total, 10 enregistrements de données lors du passage de trains chargés et 5 enregistrements de données lors du passage de trains vides ont été réalisés du 21 juin au 6 novembre 2006. Deux trains sont passés à 15 mi/h, sept autres ont circulé à une vitesse de 10 mi/h et le dernier est passé à 5 mi/h. De plus, un train s'est arrêté le 8 octobre 2006 sur les lieux pour déterminer le comportement de la voie ferrée dans le cas d'un chargement statique.

1.12.3 *Déplacements verticaux et pressions interstitielles*

Lors du passage des trains, des valeurs maximales de déplacement vertical instantané de 2,0 à 2,5 cm et des augmentations de pressions interstitielles de 5 à 20 kPa⁶ ont été enregistrées selon les différents points de mesure. Les déplacements moyens et les pressions interstitielles moyennes ont tendance à augmenter avec le nombre de wagons qui passent, ce qui crée une accumulation en fin de passage du train. Après le passage du dernier wagon, les surpressions interstitielles se dissipent progressivement; cependant, des tassements résiduels de l'ordre de quelques dixièmes de millimètres subsistent (voir l'annexe A).

1.12.4 *Tassements cumulatifs*

Les tassements résiduels causés par chaque train s'accumulent sous l'effet des passages répétés des trains, notamment les trains les plus chargés. Les tassements résiduels mesurés à l'aide des potentiomètres à corde, après le passage d'une centaine de trains, sont de l'ordre de 0,5 cm au point milliaire 3,93 et de l'ordre de 1,0 cm au point milliaire 3,96. De plus, les mesures d'arpentage, qui ont été effectuées le 13 juin et le 20 octobre 2006, indiquent que, durant cette période de quatre mois, des tassements résiduels de l'ordre de 0,5 cm à 2 cm sont apparus entre les points milliaires 3,87 et 3,96. Entre 1996 et 2004, le tassement cumulatif dans la tourbe serait de l'ordre de 30 cm (voir l'annexe B).

1.12.5 *Influence du niveau de la nappe phréatique*

Le fossé latéral a été bloqué temporairement le 5 octobre 2006, à la hauteur du point milliaire 4, avec des palplanches en bois pour élever le niveau de la nappe phréatique. Le niveau d'eau en amont des palplanches s'est stabilisé à une hauteur de 80 cm au-dessus du niveau d'eau initial dans le fossé. La remontée de la nappe phréatique avait pour objectif de recréer les conditions hydriques qui prévalaient lors des déraillements de 1999 et 2004. L'augmentation du niveau de la nappe phréatique touche essentiellement la pression hydrostatique, alors que les variations des pressions interstitielles lors du passage des trains ne sont pratiquement pas influencées par ce facteur. Les palplanches ont été démantelées le 23 octobre 2006 pour rétablir l'écoulement normal dans le fossé et permettre à la nappe phréatique de retourner à son niveau naturel.

⁶ 1 kPa = 1000 pascals = 20,83 livres au pied carré

1.12.6 *Influence de la charge d'essieu et de la vitesse*

Le passage répété des trains engendre des pressions interstitielles qui sont maximales au centre de la couche de tourbe. Les résultats indiquent que l'intensité des surpressions interstitielles dépend de la charge des essieux et de la vitesse de passage des trains. Les données enregistrées par les piézomètres électriques de grande précision à des vitesses de 5, 10 et 15 mi/h permettent d'estimer que les surpressions interstitielles dans la tourbe pour une vitesse de passage de 38 mi/h seraient d'environ 25 kPa.

1.12.7 *Étendue de la zone d'influence*

D'après les relevés des pressions interstitielles, la zone d'influence de l'effet de chargement par le train est essentiellement limitée à un secteur situé directement sous la voie ferrée. Les enregistrements des piézomètres électriques différentiels montrent que les surpressions interstitielles dans la tourbe sous le passage des trains ont lieu dans une zone limitée transversalement à environ 2 à 3 m de part et d'autre du milieu de la voie ferrée.

1.13 *Études géotechniques*

1.13.1 *Études géotechniques mandatées par le BST*

1.13.1.1 *Firme de géotechnique de Québec*

Au mois de septembre 2004, une étude géotechnique a été confiée par le BST à une firme de géotechnique de Québec, travaillant en collaboration avec le département de génie civil de l'Université Laval. L'étude, qui a inclus des essais triaxiaux de chargement cyclique, a été terminée à la fin du mois de mai 2005. Elle a déterminé que la capacité portante de la tourbe est suffisante pour supporter le poids des locomotives et des wagons mais que le sol sous la voie ferrée se comprime et subit des tassements dont l'intensité augmente exponentiellement sous l'augmentation d'une sollicitation cyclique.

1.13.1.2 *Université Laval*

Au mois de mai 2006, le BST a confié un mandat au département de génie civil de l'Université Laval pour entreprendre une étude géotechnique additionnelle. L'étude consistait à caractériser le comportement géotechnique de la tourbe sous le passage des trains, notamment en quantifiant l'évolution des pressions d'eau interstitielle, des déplacements verticaux et des tassements permanents en fonction du nombre de passages d'essieux.

L'étude, terminée au mois de janvier 2007, a conclu que le remblai de la voie ferrée construit sur le dépôt de tourbe est stable vis-à-vis d'un glissement de pente sous les charges des wagons (voir l'analyse de stabilité à l'annexe C). Le déraillement ne serait pas lié à un problème d'instabilité de pente (instabilité globale du massif) mais plutôt à une rupture par poinçonnement.

Selon l'étude, l'accumulation des tassements dans la tourbe a lieu uniquement sous la voie ferrée, ce qui engendre une distorsion des fibres, vu que la tourbe à l'extérieur de la zone d'influence ne subit pas de tassement (voir la figure 4). Cette distorsion entraîne un

réalignement des fibres de la tourbe jusqu'à former deux plans de cisaillement qui se développent progressivement à mesure que le tassement permanent sous la voie ferrée augmente.

À chaque passage de train chargé, les fibres subissent des contraintes de cisaillement élevées et, comme au centre de la couche, les surpressions interstitielles réduisent les contraintes effectives et un mécanisme de rupture progressive se met en place. Les fibres sont brisées progressivement à partir du centre de la tourbe. Lorsque la sollicitation imposée par les trains le long de ces plans de cisaillement atteint la résistance au cisaillement de la tourbe, il y aura rupture par poinçonnement (voir la figure 5). Ce genre de rupture est accompagné par des tassements soudains très importants.

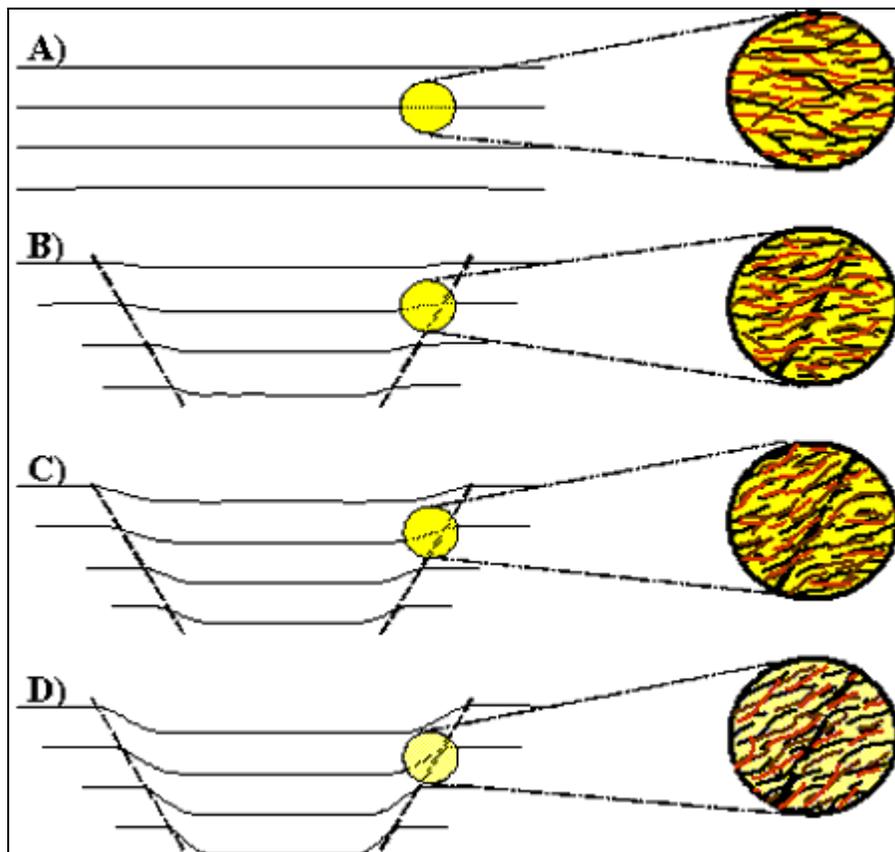


Figure 4. Évolution des tassements et de la distorsion des fibres de tourbe

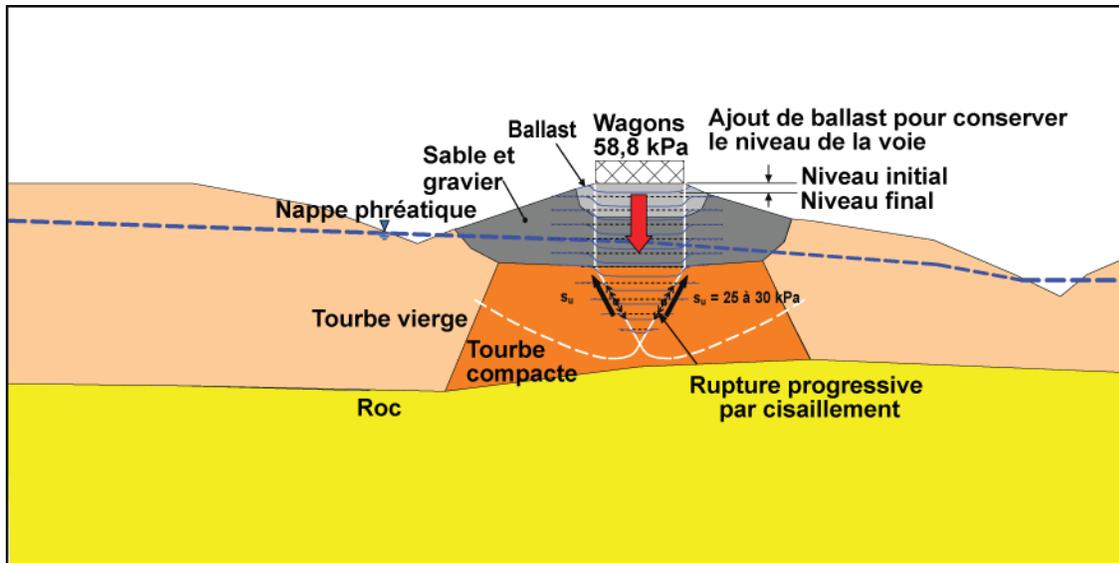


Figure 5. Rupture en cisaillement par poinçonnement au point milliaire 3,87

1.13.2 Évaluation géotechnique du Canadien National

Parallèlement aux études entreprises par le BST, le CN a retenu les services d'une autre firme spécialisée pour effectuer une investigation géotechnique des sols et des conditions hydriques du site. L'étude, terminée au mois de juillet 2005, a conclu que les pressions interstitielles et les vibrations dans la tourbe mesurées lors du passage de trains circulant à une vitesse de 10 mi/h étaient relativement faibles et que la stabilité du remblai et de la tourbe sous-jacente était suffisante, ayant un facteur de sécurité de 1,64⁷ sous l'effet du poids du matériel roulant.

1.14 Initiatives de l'industrie

Au Canada, 2 % des accidents ferroviaires sont liés aux risques géologiques, tels les éboulements, les glissements de terrain et les emportements par les eaux. Cependant, ces accidents représentent 12 % des coûts directs de tous les accidents ferroviaires, notamment parce qu'ils se produisent souvent à des endroits éloignés et qu'ils entraînent de longues interruptions de service.

Depuis 1992, le BST a enquêté sur six accidents liés à la stabilité et l'affaissement de l'infrastructure de la voie construite sur une base de limon glaciolaustre ou de tourbe (rapports R92T0183, R94W0101, R97T0097, R97D0113, R97V0063 et R98V0100). À la suite des accidents de Nakina (Ontario) (rapport R92T0183) et Conrad (Colombie-Britannique) (rapport R97V0063), le Bureau a publié des recommandations afin d'atténuer les risques liés à l'instabilité de la plate-forme causée par une saturation d'eau.

Par suite des recommandations du BST, un programme de recherche sur les risques géologiques en transport ferroviaire a été mis sur pied en partenariat par les chemins de fer canadiens, des organismes fédéraux et des universités.

⁷ Une pente est stable lorsque le facteur de sécurité est plus grand que 1. Plus le facteur de sécurité est élevé, plus la pente est stable.

De concert avec la Commission géologique du Canada de Ressources naturelles Canada, le CN et le Chemin de fer Canadien Pacifique (CFCP) ont créé, en 2003, le Centre for Risk Assessment and Geohazard Studies, rattaché à l'Université de l'Alberta, pour piloter le programme de recherche. L'Université Queen's apporte un soutien technique au programme. Le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie a accordé en avril 2004 une subvention de recherche et développement. Une entente de recherche coopérative a été signée en avril 2005 par Transports Canada, Ressources naturelles Canada, le CN, le CFCP et l'Université de l'Alberta.

Le programme vise la constitution d'une base de données intégrée sur les incidents géologiques, l'élaboration de méthodes de caractérisation et de prévision des risques géologiques ainsi que l'élaboration d'un prototype de technologie de surveillance et de détection. Il a comme objectif de trouver des solutions axées sur la gestion du risque afin d'améliorer la sécurité de l'infrastructure ferroviaire au Canada et de réduire les pertes causées par les incidents géologiques. Une des études menées dans le cadre du programme a consisté à développer une technologie de radar pénétrant pour le profilage de longs tronçons de ballast et de sous-couche de voie ferrée.

1.15 Construction des wagons-citernes

Les wagons-citernes en cause dans le déraillement étaient des wagons-citernes non isolés et non pressurisés qui répondaient aux exigences de la spécification DOT 111A100W1 (catégorie 111A). Ils ont été construits en 1995 et en 1996 en vertu du permis SR 4949 délivré par Transports Canada. Les parois et les têtes des citernes étaient faites d'acier TC-128 de l'Association of American Railroads (AAR) de nuance B, mesurant 7/16 de pouce d'épaisseur. Les wagons n'étaient pas munis de boucliers protecteurs. Le certificat de construction indique qu'ils ont été construits pour un poids ultime de 286 000 livres; cependant, leur poids total en charge était limité à 263 000 livres.

Dans ses rapports d'enquête R94C0137, R95D0016, R99D0159 et R05H0011, le BST a signalé que les wagons de catégorie 111A étaient particulièrement susceptibles d'être perforés et de laisser fuir leur contenu en cas d'accident. Dans son rapport d'enquête R94C0137, le Bureau a recommandé que :

Le ministère des Transports prenne immédiatement les mesures qui s'imposent pour réduire davantage la possibilité d'un déversement accidentel des marchandises dangereuses les plus toxiques et les plus volatiles qui sont transportées dans les wagons-citernes de catégorie 111A – par exemple, exiger que la conception des wagons-citernes soit modifiée afin d'améliorer leur intégrité structurale lors d'accidents ou limiter davantage les produits qui peuvent être transportés dans ces wagons.
(R96-13, émise en novembre 1996)

Transports Canada s'est dit d'accord avec la recommandation et a supervisé l'amélioration de la conception des wagons-citernes neufs de catégorie 111A, dont les vannes sont maintenant mieux protégées en cas de renversement. De plus, on a modifié la norme canadienne sur les

wagons-citernes (CAN/CGSB-43.147), adoptée en référence dans le *Règlement sur le transport des marchandises dangereuses*, de façon à limiter le nombre de produits qui peuvent être transportés par les wagons-citernes de catégorie 111A.

Le poids total en charge autorisé par la norme CAN/CGSB-43.147 pour les wagons-citernes transportant des marchandises dangereuses est de 263 000 livres. En 1999, Transports Canada, le Department of Transportation (DOT) des États-Unis et la Federal Railroad Administration (FRA) ont publié le « livre blanc », un document commun établissant des normes de conception supplémentaires selon lesquelles Transports Canada et les États-Unis pourraient obtenir des exemptions pour la construction des wagons-citernes de catégorie 111A dont le poids total en charge est de 286 000 livres. Ces normes supplémentaires ont été incorporées dans les spécifications sur les wagons-citernes de l'AAR (M-1002-2003). Depuis 2003 au Canada, Transports Canada exige que tout wagon de catégorie 111A transportant plus de 263 000 livres réponde à ces normes, qui prévoient une meilleure résistance à la perforation grâce à la sélection de meilleurs matériaux, à l'ajout de demi-boucliers et à une amélioration de la protection du matériel de service comme les vannes.

2.0 Analyse

L'examen du matériel roulant et de l'exploitation du train ont permis de déterminer qu'ils n'ont pas contribué à l'accident. Une étude détaillée de l'exploitation des trains, effectuée sur une période de deux mois précédant l'accident, n'a révélé aucun changement notable de trafic en termes de fréquence, d'intervalle ou de tonnage des trains. Au cours des 30 jours précédant le déraillement, les précipitations dans la région ont été proches des normales saisonnières. Donc, ni le mode d'exploitation des trains, ni les conditions météorologiques n'ont joué de rôle dans l'accident. Par conséquent, l'analyse se concentrera sur l'infrastructure de la voie ainsi que l'intégrité et la résistance des wagons-citernes utilisés pour le transport des hydrocarbures.

2.1 Stabilité de la plate-forme

2.1.1 Résistance au glissement de pente et capacité portante

Aussi bien les études entreprises par le BST que par le CN ont déterminé que la stabilité au glissement de pente et la capacité portante de la tourbe sont suffisantes pour supporter le poids des locomotives et des wagons, mais que le sol sous la voie ferrée se comprime et subit des tassements. Une évaluation conservatrice des risques de glissement de pente démontre que le remblai de la voie ferrée construit sur le dépôt de tourbe est stable vis-à-vis un glissement de pente sous les charges des wagons et locomotives.

2.1.2 Rupture par poinçonnement

Les observations réalisées lors du suivi du comportement de la tourbe sous les chargements répétés induits par le passage des trains ont permis de déduire que les surpressions interstitielles au centre de la tourbe pouvaient atteindre des valeurs d'au moins 25 kPa lorsque les trains chargés circulent à 38 mi/h. Ces surpressions réduisent la résistance au cisaillement de la tourbe en diminuant la contrainte effective de confinement et, d'autre part, elles entraînent un tassement permanent lors de leur dissipation.

Les mesures en continu des déplacements verticaux sous la voie ferrée ont confirmé que ces tassements permanents peuvent atteindre plusieurs centimètres par année. Même si des travaux d'entretien sont effectués régulièrement par les équipes d'entretien du CN pour corriger la voie en surface et assurer que les normes de géométrie sont observées en tout temps, les tassements permanents ont continué à s'accumuler dans la tourbe et ce, uniquement sous la voie ferrée. Au cours des huit années précédant le déraillement, ces tassements auraient pu atteindre une valeur de l'ordre de 30 cm.

Selon la thèse avancée par le département de génie civil de l'Université Laval, ce phénomène engendre une distorsion et un réalignement des fibres de la tourbe jusqu'à former deux plans de cisaillement qui se développent progressivement à mesure que le tassement permanent sous la voie ferrée augmente. Lorsque la résistance au cisaillement de la tourbe est atteinte, il peut y avoir une rupture soudaine par poinçonnement. Ce genre de rupture est accompagné par un effondrement soudain de la voie ferrée, tel que confirmé d'ailleurs par la dépression observée

au centre de la voie derrière le 29^e wagon. Selon toute vraisemblance, l'accident est survenu lorsque les wagons n'ont pas pu négocier l'affaissement soudain de la voie provoqué par la rupture par poinçonnement de la plate-forme et ont déraillé.

2.1.3 *Identification des sites susceptibles au poinçonnement*

L'étude mandatée par le BST a permis de relever certains facteurs contributifs au phénomène de poinçonnement tels que le poids des essieux, le tonnage et la vitesse des trains. Elle a aussi montré que les endroits où la plate-forme de la voie a été bâtie sur de la tourbe saturée et où des travaux de nivellement sont requis régulièrement pour maintenir le profil de la voie sont des endroits susceptibles au poinçonnement. En effet, les travaux de nivellement fréquents suggèrent l'existence de tassements cumulatifs et permanents dans la tourbe, donc éventuellement la formation de plans de cisaillement et ultimement une rupture par poinçonnement. Le mécanisme de rupture par poinçonnement intègre les résultats de tests réalisés en laboratoire et sur le terrain; de plus, il concorde avec les observations faites sur les lieux. Il est, par conséquent, le mécanisme de défaillance de la plate-forme le plus plausible; cependant, des études additionnelles sont requises pour mieux cerner ce phénomène.

L'industrie a pris des initiatives importantes, telles que le programme de recherche sur les risques géologiques en transport ferroviaire, pour mieux comprendre, identifier et atténuer les risques liés à la géologie et au comportement des sols sous les infrastructures ferroviaires. Ces initiatives sont axées principalement sur la stabilité des pentes en terrain montagneux et sur le comportement des sols d'origine glaciolacustre, même si le récent développement de la technologie de radar pénétrant pourrait éventuellement faciliter la détection de zones de tassement cumulatif dans la tourbe. L'inclusion d'autres types de sol tels que les tourbes et l'examen d'autres types de rupture comme le poinçonnement permettront à l'industrie de mieux comprendre, identifier et prévenir les risques d'affaissement dans divers types de sol et diminuer les risques de déraillement.

2.1.4 *Méthodes d'inspection et d'entretien de la voie et de la plate-forme*

À la suite du déraillement de 1999, le CN a pris des mesures pour renforcer l'infrastructure de la voie et a augmenté la fréquence des inspections. La pose de traverses neuves, de longs rails soudés ainsi que le rajout de ballast attestent du bon état de la voie. Des travaux d'entretien ont été effectués régulièrement pour maintenir la surface de la voie, les derniers ayant été exécutés deux semaines avant l'accident. Le superviseur adjoint de la voie, l'ingénieur en chef régional du CN et l'inspecteur de l'infrastructure de Transports Canada sont passés sur les lieux deux jours avant l'accident et n'ont noté aucun défaut de géométrie. Par conséquent, il y a lieu de penser qu'il n'y avait pas eu de signe avant-coureur et que la voie paraissait en bon état; la défaillance de la voie est arrivée soudainement et sans avertissement.

Les procédures et technologies d'inspection des chemins de fer sont essentiellement basées sur des évaluations de l'état de la voie en surface. Elles sont efficaces pour observer les tassements de la voie; par contre, la distorsion des fibres ou plutôt son niveau d'avancement dans la couche de tourbe reste invisible à l'œil nu et aux inspections de surface. Par conséquent, l'imminence d'un risque d'affaissement est difficilement décelable dans de telles circonstances.

2.2 *Résistance aux impacts des wagons-citernes de catégorie 111A*

Les wagons-citernes en cause dans le déraillement, même s'ils répondaient à la norme S-259-94 de l'AAR, n'étaient pas munis de demi-boucliers protecteurs car leur construction est antérieure à la parution du document commun « livre blanc » et des spécifications sur les wagons-citernes de l'AAR (M-1002-2003).

Les parois et les têtes des citernes ont été perforées à cause des impacts subis lors de la mise en portefeuille des wagons; de plus, les robinets d'isolement et les dispositifs de protection en cas de renversement n'ont pas rempli leur rôle tel que prévu, entraînant de ce fait un déversement important d'hydrocarbures.

La vulnérabilité des wagons-citernes de catégorie 111A utilisés pour le transport des hydrocarbures a été clairement démontrée à plusieurs reprises par le BST, ce qui a amené l'industrie et Transports Canada à prendre certaines mesures pour atténuer les risques en cas de déraillement. Le nombre de produits que ces wagons peuvent transporter a été réduit lors de la modification du *Règlement sur le transport des marchandises dangereuses* et de nouvelles normes de construction pour les wagons-citernes ont été établies.

Les améliorations à la sécurité comprises dans les normes ne s'appliquent pas aux wagons-citernes de catégorie 111A dont le poids total en charge est de 263 000 livres ou moins, ni aux autres wagons non pressurisés, et ce même si ces wagons constituent la majorité des wagons de construction récente. De plus, le projet « Next Generation Tank Car », lancé par Transports Canada, la FRA et l'industrie, traite uniquement des normes de construction des wagons-citernes à haute pression utilisés pour le transport des marchandises dangereuses. Par conséquent, un grand nombre de wagons-citernes transportant des marchandises dangereuses ne sont pas renforcés et présentent et continueront de présenter des risques de perforation, même dans des déraillements à des vitesses d'exploitation modérées.

2.3 *Intervention d'urgence*

La rapidité de l'intervention du service des incendies de la ville de Lévis et la mise en œuvre immédiate du plan des mesures d'urgence ont permis de bien contrôler l'accès au site et de protéger le public et les autres intervenants sur les lieux. Les opérations de nettoyage et de récupération des hydrocarbures et des sols contaminés se sont déroulées de façon méthodique, dans un souci de préservation de l'environnement.

3.0 *Conclusions*

3.1 *Faits établis quant aux causes et aux facteurs contributifs*

1. Les tassements de la plate-forme de la voie se sont accumulés sous l'effet des chargements répétitifs et ont créé progressivement une distorsion et un réalignement des fibres de la tourbe, ce qui a vraisemblablement engendré une rupture soudaine par poinçonnement.
2. Les wagons n'ont pas pu négocier l'affaissement soudain de la voie provoqué par la rupture de la plate-forme et ont déraillé.

3.2 *Faits établis quant aux risques*

1. Les endroits où la plate-forme de la voie a été bâtie sur de la tourbe saturée et où des travaux de nivellement sont requis régulièrement pour maintenir le profil de la voie sont des endroits susceptibles au poinçonnement.
2. Le poids des essieux, le tonnage et la vitesse des trains sont des facteurs qui pourraient contribuer au phénomène de poinçonnement.
3. Les procédures et technologies d'inspection des chemins de fer, basées sur les observations de surface, ne sont pas en mesure de déceler l'imminence d'un risque d'affaissement.
4. Malgré certaines mesures prises par l'organisme de réglementation et l'industrie, la plupart des wagons-citernes non pressurisés utilisés pour le transport des hydrocarbures et d'autres marchandises dangereuses demeurent vulnérables aux risques de perforation et continuent de présenter des risques, même à la suite d'impacts à vitesse modérée.

3.3 *Autres faits établis*

1. Des études additionnelles sont requises pour mieux comprendre la rupture par poinçonnement.
2. Une évaluation conservatrice des risques de glissement de pente démontre que le remblai de la voie ferrée construit sur le dépôt de tourbe est stable vis-à-vis un glissement de pente sous les charges des wagons et locomotives.
3. L'intervention par le service des incendies de la ville de Lévis a été efficace et a permis de protéger le public et les autres intervenants sur les lieux.

4.0 *Mesures de sécurité*

4.1 *Mesures prises*

Le 19 août 2004, Transports Canada a imposé une réduction de vitesse à 25 mi/h entre le point milliaire 1,0 et le point milliaire 6,0. Dans la zone immédiate du déraillement, la vitesse a été réduite à 10 mi/h.

À la suite de plusieurs accidents aux États-Unis dans le cadre desquels il y a eu des déversements de marchandises dangereuses, la Federal Railroad Administration (FRA) a entamé en juin 2006 une évaluation en profondeur des normes de construction des wagons-citernes utilisés pour le transport des marchandises dangereuses dans le but de minimiser les risques de déversement lors de déraillements. Transports Canada travaille étroitement avec la FRA afin de régler les problèmes communs et d'harmoniser leurs mesures. De plus, dans le cadre d'un projet explorant la prochaine génération de wagons-citernes, « Next Generation Tank Car », Transports Canada, la FRA et l'industrie ont signé un protocole d'entente en avril 2007 afin de mieux comprendre les facteurs ayant une incidence sur la sécurité des wagons-citernes à haute pression et d'améliorer l'efficacité de certains contenants en vrac pour le transport de marchandises dangereuses spécifiques.

4.2 *Mesures nécessaires*

4.2.1 *Stabilité de la plate-forme*

La défaillance de la plate-forme de la voie est arrivée soudainement et sans avertissement alors qu'il n'y avait eu aucun signe avant-coureur et que la voie paraissait en bon état. Les procédures et technologies d'inspection des chemins de fer sont essentiellement basées sur des évaluations de l'état de la voie en surface et n'ont pas été en mesure d'évaluer l'état et le comportement de la plate-forme et de déceler l'imminence d'un risque d'effondrement.

Au Canada, un grand nombre de milles de voie ont été construits le long des rivières ou à travers des zones marécageuses où on trouve de la tourbe. Par conséquent, ces endroits présentent des conditions similaires à celles rencontrées lors de cet événement. Dans de telles circonstances, une meilleure connaissance du mécanisme de rupture et de l'effet des charges ferroviaires sur la tourbe est nécessaire pour atténuer les risques associés à ce type de sol organique.

Le Bureau est conscient des efforts fournis par la compagnie ferroviaire et l'organisme de réglementation pour régler les problèmes liés à la stabilité des pentes et des talus. L'industrie a pris des initiatives importantes, telles que le programme de recherche sur les risques géologiques en transport ferroviaire, pour mieux comprendre, identifier et atténuer les risques liés à la géologie et au comportement des sols sous les infrastructures ferroviaires. Ces initiatives sont axées principalement sur la stabilité des pentes en terrain montagneux et sur le comportement des sols d'origine glaciolacustre, même si le récent développement de la technologie de radar pénétrant pourrait éventuellement s'appliquer à la tourbe.

L'étude mandatée par le BST et entreprise par le département de génie civil de l'Université Laval a présenté le poinçonnement par cisaillement comme mécanisme de rupture. Elle a aussi montré que les endroits où la plate-forme de la voie a été bâtie sur de la tourbe saturée et où des travaux de nivellement sont requis régulièrement pour maintenir le profil de la voie sont des endroits susceptibles au poinçonnement. Le mécanisme de rupture par poinçonnement intègre les résultats de tests réalisés en laboratoire et sur le terrain et concorde avec les observations faites sur les lieux. Cependant, des études additionnelles sont requises pour mieux comprendre ce phénomène et atténuer les risques. Par conséquent, le Bureau recommande que :

Le ministère des Transports et l'industrie ferroviaire effectuent des études en profondeur du comportement des matériaux organiques saturés sous charge cyclique.

R07-03

4.2.2 Normes sur les wagons-citernes non pressurisés

Les dommages subis par les wagons-citernes de catégorie 111A en cause dans cet événement et les risques posés par le déversement de produit par suite de cet événement sont représentatifs des problèmes qui ont déjà été observés par le BST au cours d'enquêtes antérieures. Dans l'événement à l'étude, les parois et les têtes des citernes ont été perforées, entraînant un déversement important d'hydrocarbures, même si le déraillement est survenu dans une zone marécageuse où le sol est particulièrement mou. D'autres événements sur lesquels le BST a mené des enquêtes ont également montré la vulnérabilité de ce type de wagons à la perforation même dans des accidents à basse vitesse (rapport R99D0159 du BST [Cornwall] et rapport R05H0011 du BST [Maxville]).

L'organisme de réglementation et l'industrie ferroviaire sont conscients de la vulnérabilité des wagons-citernes de catégorie 111A, ce qui les a amenés à prendre certaines mesures pour atténuer les risques en cas de déraillement. Le nombre de produits que ces wagons peuvent transporter a été réduit lorsque le *Règlement sur le transport des marchandises dangereuses* a été modifié et que Transports Canada a établi de nouvelles normes de construction pour les wagons. Ces normes, qui ont été incorporées dans les spécifications sur les wagons-citernes de l'AAR (M-1002-2003), exigent que les nouveaux wagons-citernes de catégorie 111A dont le poids total en charge est de 286 000 livres répondent à des critères plus stricts, notamment qu'ils aient une meilleure résistance à la perforation grâce à la sélection de meilleurs matériaux et à l'ajout de demi-boucliers protecteurs. Cependant, les améliorations à la sécurité comprises dans les normes ne s'appliquent pas aux wagons-citernes de catégorie 111A dont le poids en charge est de 263 000 livres ou moins ou à d'autres wagons-citernes non pressurisés. Par conséquent, un grand nombre de wagons-citernes en service transportant des marchandises dangereuses continueront de présenter des risques de perforation, même dans des déraillements à des vitesses d'exploitation modérées.

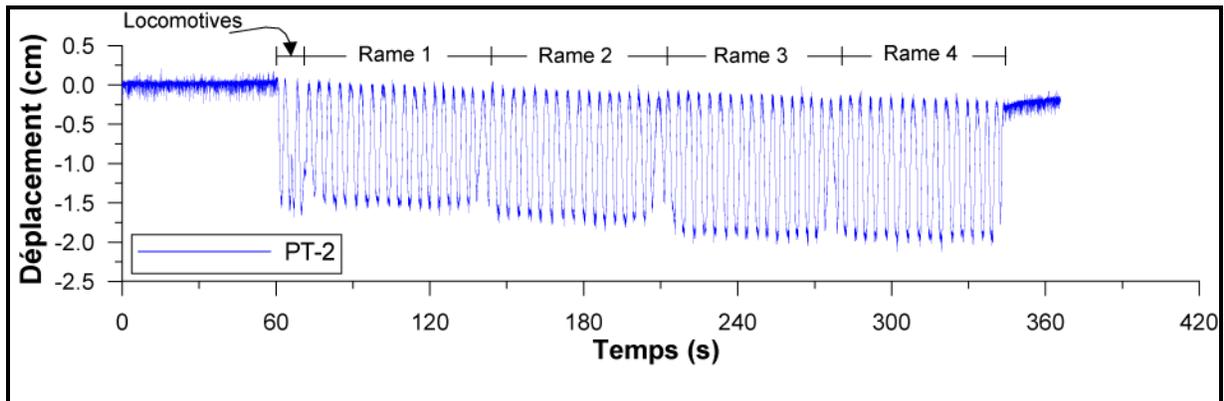
Étant donné que la différence de capacité entre les deux types de wagons est de moins de 9 %, les risques encourus lors d'un déversement de produit en provenance d'un wagon de 263 000 livres ne seraient pas tellement moindres que dans le cas d'un wagon de 286 000 livres. Par conséquent, le Bureau croit que des mesures additionnelles s'imposent pour traiter de la question de la résistance à la perforation des wagons de moindre poids et recommande que :

Le ministère des Transports étende les dispositions de sécurité des normes de construction applicables aux wagons de 286 000 livres à tous les nouveaux wagons-citernes non pressurisés transportant des marchandises dangereuses.

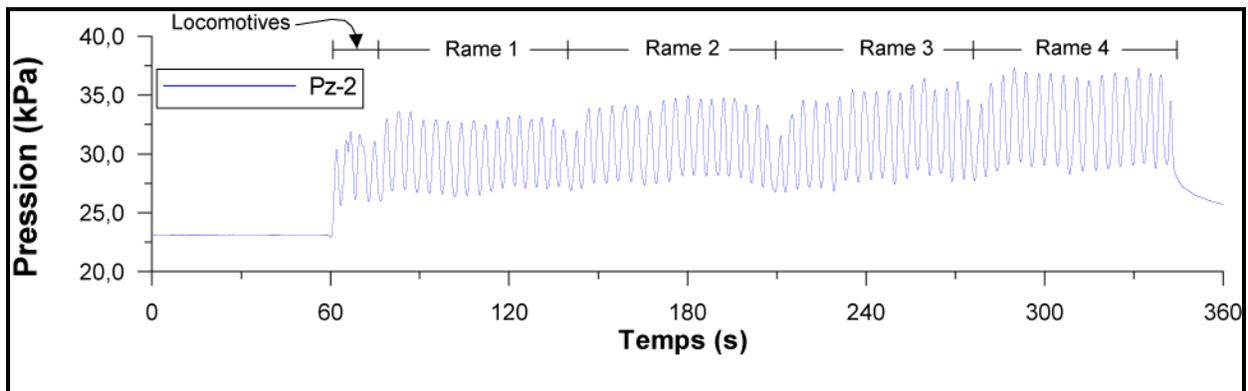
R07-04

Le présent rapport met un terme à l'enquête du Bureau de la sécurité des transports du Canada (BST) sur cet événement. Le Bureau a autorisé la publication du rapport le 27 septembre 2007.

Annexe A – Déplacements verticaux et pressions interstitielles



Mesures des déplacements verticaux de la voie au point milliaire 3,93 lors du passage d'un train chargé roulant à 10 mi/h



Mesures des pressions interstitielles au centre de la voie à 3 m de profondeur au point milliaire 3,93 lors du passage d'un train chargé roulant à 10 mi/h

Annexe B – Tassements cumulatifs

Les tassements cumulatifs depuis 1996 peuvent être estimés de deux façons. La première façon consiste à multiplier la valeur limite d'écart de nivellement transversal en alignement (25 mm pour le niveau d'intervention prioritaire ou 44 mm pour le niveau d'intervention urgent dans le cas d'une voie de catégorie 3) par le nombre d'interventions du Canadien National (CN) entre 1996 et 2004. La deuxième méthode consiste à appliquer la relation (obtenue à partir des résultats des essais triaxiaux en conditions drainées) entre l'évolution du tassement normalisé de la tourbe, s/H_0 , et le nombre de cycles de chargement.

Étant donné que le nombre d'interventions entre 1996 et 2004 se situait entre 8 et 12, à raison d'une correction de 25 mm par intervention, la première méthode donne un tassement cumulatif dans la tourbe de l'ordre de 20 à 30 cm.

En utilisant la relation entre l'évolution du tassement normalisé de la tourbe et le nombre de cycles de chargement, le tassement relatif total pour une épaisseur de tourbe de 2,0 m sera de 32 cm pour un nombre d'essieux entre 1996 et 2004 de l'ordre de 300 000.

Annexe C – Analyse de stabilité (glissement de pente)

Les sollicitations moyennes transmises par un train chargé ont été estimées en tenant comme acquis que les charges des groupes d'essieux se répartissent sur une longueur d'environ 8 m. Pour la locomotive, la contrainte verticale équivalente appliquée sous les traverses est alors de 40,2 kPa et pour les wagons, cette contrainte est de 58,8 kPa (voir l'annexe C1).

Les calculs de stabilité ont été réalisés à l'aide du logiciel SLOPE/W en utilisant la méthode de Bishop simplifiée pour vérifier les facteurs de sécurité face à la rupture du remblai par un plan de glissement mobilisant la couche de tourbe. La section située au point milliaire 3,87, près du point de déraillement, où le remblai était surélevé d'environ 1,0 m par rapport au niveau du sol naturel sur le côté est de la voie ferrée, a été analysée.

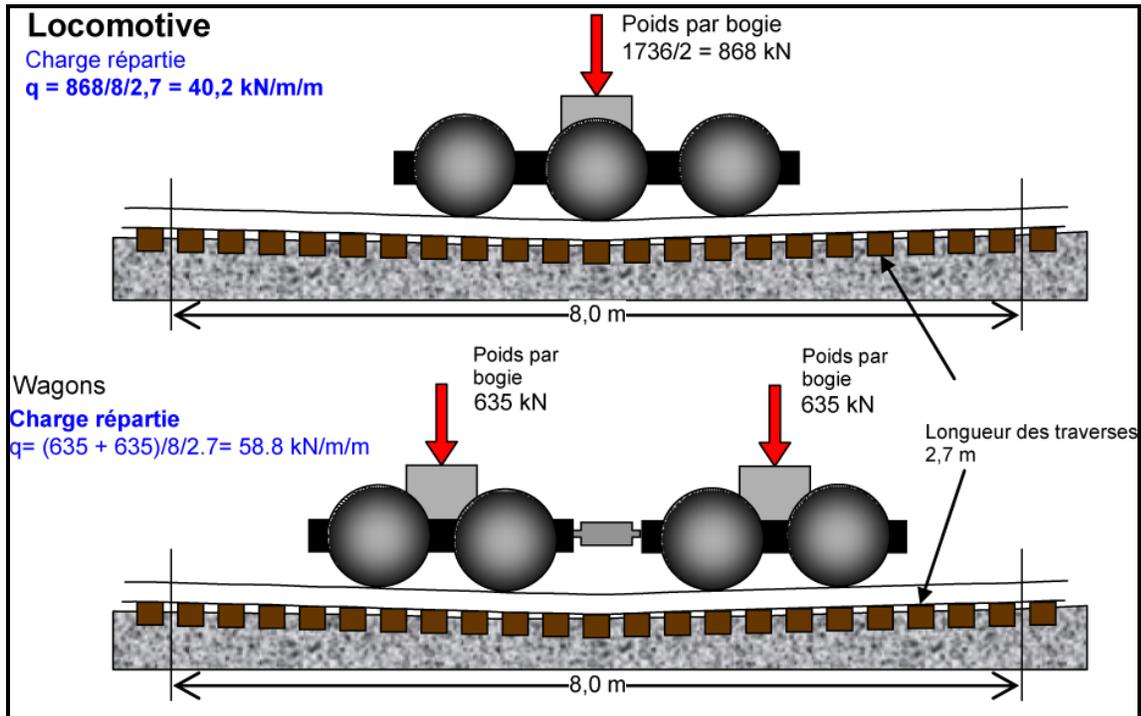
Les calculs de stabilité ont été réalisés en tenant compte des résistances au cisaillement de 24 kPa, 12 kPa et 10 kPa. Les mesures de la résistance au cisaillement ont été obtenues au scissomètre de chantier. La valeur minimale de la résistance au cisaillement (s_{uv}) de la tourbe est d'environ 12 kPa alors que la valeur moyenne est de l'ordre de 24 kPa. Des valeurs maximales de 48 kPa ont également été mesurées. Ces valeurs de s_{uv} tiennent compte uniquement de la surcharge due au poids du remblai. Dans la tourbe vierge adjacente à la voie ferrée, une résistance s_{uv} de 15 kPa a été utilisée.

Pour un train roulant à 38 mi/h, les facteurs de sécurité au glissement suivants ont été obtenus :

Résistance au cisaillement	Facteur de sécurité
24 kPa	1,826
12 kPa	1,492
10 kPa	1,388
5 kPa	1,0

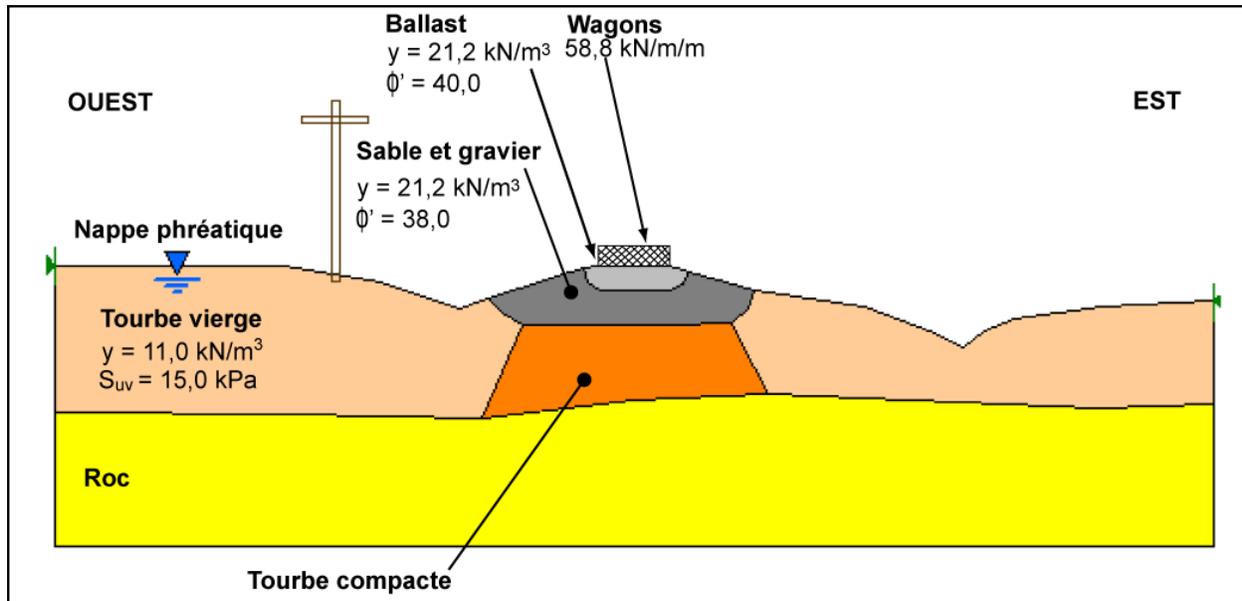
Les résultats de l'analyse de stabilité pour une résistance au cisaillement de 10 kPa sont illustrés à l'annexe C2.

Un facteur de sécurité de 1,0 (pente devenant instable) est obtenu lorsque $s_{uv} = 5$ kPa, ce qui est physiquement irréaliste. Par conséquent, le remblai de la voie ferrée construit sur le dépôt de tourbe est stable dans ces circonstances vis-à-vis un glissement de pente sous les charges des wagons.

Annexe C1 – Déplacements verticaux et pressions interstitielles

Répartition de la charge pour les bogies de la locomotive et ceux de deux wagons consécutifs

Annexe C2 – Analyse de stabilité des pentes du remblai de la voie au point milliaire 3,87



Stabilité des pentes du remblai de la voie ferrée sous les charges des wagons – $s_{uv} = 10,0 \text{ kPa}$ pour la tourbe compacte – Pente stable puisque le facteur de sécurité obtenu est égal à 1,388 (s_{uv} = résistance au cisaillement, γ = poids volumique, ϕ' = angle de frottement interne)

Annexe D – Sigles et abréviations

AAR	Association of American Railroads
BST	Bureau de la sécurité des transports
cm	centimètres
CFCP	Chemin de fer Canadien Pacifique
CMN	Circulaire sur les méthodes normalisées
CN	Canadien National
DOT	Department of Transportation (États-Unis)
FRA	Federal Railroad Administration (États-Unis)
kg/m ³	kilogrammes au mètre cube
km/h	kilomètres à l'heure
kN	kilonewtons
kN/m ³	kilonewtons au mètre cube
kPa	kilopascals
m	mètres
mi/h	milles à l'heure
mm	millimètres
REF	<i>Règlement d'exploitation ferroviaire du Canada</i>
ROV	régulation de l'occupation de la voie
RSV	<i>Règlement sur la sécurité de la voie</i>
s_{uv}	résistance au cisaillement
Ultramar	Ultramar Canada Inc.
γ	poids volumique
ϕ'	angle de frottement interne
°C	degrés Celsius