



Bureau de la sécurité
des transports
du Canada

Transportation
Safety Board
of Canada



RAPPORT D'ENQUÊTE SUR LA SÉCURITÉ DU TRANSPORT FERROVIAIRE R20W0102

DÉRAILLEMENT DE TRAIN EN VOIE PRINCIPALE

Compagnie de chemin de fer Canadien Pacifique
Train de marchandises 320-227
Point milliaire 12,8, subdivision d'Ignace
Près d'Ignace (Ontario)
25 mai 2020

À PROPOS DE CE RAPPORT D'ENQUÊTE

Ce rapport est le résultat d'une enquête sur un événement de catégorie 3. Pour de plus amples renseignements, se référer à la Politique de classification des événements au www.bst.gc.ca.

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

CONDITIONS D'UTILISATION

Utilisation dans le cadre d'une procédure judiciaire, disciplinaire ou autre

La *Loi sur le Bureau canadien d'enquête sur les accidents de transport et de la sécurité des transports* stipule que :

- 7(3) Les conclusions du Bureau ne peuvent s'interpréter comme attribuant ou déterminant les responsabilités civiles ou pénales.
- 7(4) Les conclusions du Bureau ne lient pas les parties à une procédure judiciaire, disciplinaire ou autre.

Par conséquent, les enquêtes du BST et les rapports qui en découlent ne sont pas créés pour être utilisés dans le contexte d'une procédure judiciaire, disciplinaire ou autre.

Avisez le BST par écrit si le présent rapport d'enquête est utilisé ou pourrait être utilisé dans le cadre d'une telle procédure.

Reproduction non commerciale

À moins d'avis contraire, vous pouvez reproduire le contenu du présent rapport d'enquête en totalité ou en partie à des fins non commerciales, dans un format quelconque, sans frais ni autre permission, à condition :

- de faire preuve de diligence raisonnable quant à la précision du contenu reproduit;
- de préciser le titre complet du contenu reproduit, ainsi que de stipuler que le Bureau de la sécurité des transports du Canada est l'auteur;
- de préciser qu'il s'agit d'une reproduction de la version disponible au [URL où le document original se trouve].

Reproduction commerciale

À moins d'avis contraire, il est interdit de reproduire le contenu du présent rapport d'enquête, en totalité ou en partie, à des fins de diffusion commerciale sans avoir obtenu au préalable la permission écrite du BST.

Contenu faisant l'objet du droit d'auteur d'une tierce partie

Une partie du contenu du présent rapport d'enquête (notamment les images pour lesquelles une source autre que le BST est citée) fait l'objet du droit d'auteur d'une tierce partie et est protégé par la *Loi sur le droit d'auteur* et des ententes internationales. Pour des renseignements sur la propriété et les restrictions en matière des droits d'auteurs, veuillez communiquer avec le BST.

Citation

Bureau de la sécurité des transports du Canada, *Rapport d'enquête sur la sécurité du transport ferroviaire R20W0102* (publié le 21 mars 2023).

Bureau de la sécurité des transports du Canada
200, promenade du Portage, 4^e étage
Gatineau QC K1A 1K8
819-994-3741; 1-800-387-3557
www.bst.gc.ca
communications@bst.gc.ca

© Sa Majesté le Roi du chef du Canada, représenté par le Bureau de la sécurité des transports du Canada, 2023

Rapport d'enquête sur la sécurité du transport ferroviaire R20W0102

N° de cat. TU3-11/20-0102F-PDF
ISBN 978-0-660-47857-9

Le présent rapport se trouve sur le site Web du Bureau de la sécurité des transports du Canada à l'adresse www.bst.gc.ca

This report is also available in English.

Table des matières

1.0 Renseignements de base	5
1.1 L'événement	6
1.2 Examen des lieux	7
1.3 Renseignements sur la subdivision	9
1.4 Particularités de la voie	9
1.5 Composition de la plateforme	10
1.6 Fondations en tourbe	12
1.6.1 Propriétés mécaniques de la tourbe	12
1.6.2 Remblais de chemin de fer construits sur des fondations en tourbe	13
1.6.3 Rapport d'enquête ferroviaire R04Q0040 du BST	13
1.7 Inspections de la voie	15
1.7.1 Inspections par véhicule rail-route	15
1.7.2 Inspections de détection des défauts de rail	15
1.7.3 Inspections à l'aide du système autonome de mesure de la géométrie de la voie	16
1.7.4 Inspections par voiture d'évaluation de la voie	17
1.8 Entretien de la voie	18
1.9 Technologies d'inspection des géorisques	19
1.10 Réparations, entretien et inspections de la voie après l'événement	19
1.11 Autre événement survenu dans le secteur du déraillement	20
1.12 Données du consignateur d'événements de locomotive	21
1.13 Simulations des forces dynamiques du train	22
1.14 Gestion des forces exercées le long du train	23
1.14.1 Exploitation d'un train à traction répartie	24
1.14.2 Classement zonal dans les trains	25
1.15 Augmentation de la taille des trains-blocs céréaliers	25
1.16 Systèmes de gestion de la sécurité ferroviaire	26
1.16.1 Système de gestion de la sécurité du Canadien Pacifique	27
1.16.2 Évaluation par le Canadien Pacifique des changements dans l'exploitation des trains	27
1.16.3 Enquêtes antérieures du BST liées à des changements dans les activités d'exploitation du Canadien Pacifique	28
1.17 Rapport d'enquête sur des problèmes de sécurité SII R05-01 du BST	28
1.18 Liste de surveillance du BST	29
2.0 Analyse	30
2.1 Nature et qualité de la plateforme de la voie	30
2.2 Inspections de la voie	31
2.3 Charges cycliques sur les fondations en tourbe	32
2.4 Gestion des forces exercées le long du train	32
2.5 Changement dans les activités d'exploitation dans la subdivision d'Ignace	33

3.0	Faits établis	35
3.1	Faits établis quant aux causes et aux facteurs contributifs.....	35
3.2	Faits établis quant aux risques	35
3.3	Autres faits établis.....	35
4.0	Mesures de sécurité	36
4.1	Mesures de sécurité prises	36
4.1.1	Compagnie de chemin de fer Canadien Pacifique	36

RAPPORT D'ENQUÊTE SUR LA SÉCURITÉ DU TRANSPORT FERROVIAIRE R20W0102

DÉRAILLEMENT DE TRAIN EN VOIE PRINCIPALE

Compagnie de chemin de fer Canadien Pacifique
Train de marchandises 320-227
Point milliaire 12,8, subdivision d'Ignace
Près d'Ignace (Ontario)
25 mai 2020

Le Bureau de la sécurité des transports du Canada (BST) a enquêté sur cet événement dans le but de promouvoir la sécurité des transports. Le Bureau n'est pas habilité à attribuer ni à déterminer les responsabilités civiles ou pénales. **Le présent rapport n'est pas créé pour être utilisé dans le contexte d'une procédure judiciaire, disciplinaire ou autre.** Voir Conditions d'utilisation à la page 2.

Résumé

Le 25 mai 2020, vers 14 h 43, heure avancée de l'Est, le train 320-227 de la Compagnie de chemin de fer Canadien Pacifique roulait vers l'est à 46 mi/h dans la subdivision d'Ignace lorsque 53 wagons-trémies chargés de céréales ont déraillé au point milliaire 12,8 près d'Ignace (Ontario). Plusieurs wagons ont déversé des céréales. Aucune marchandise dangereuse n'était en cause et aucun incendie n'a été signalé. Personne n'a été blessé.

1.0 RENSEIGNEMENTS DE BASE

Le 25 mai 2020, le train 320-227 de la Compagnie de chemin de fer Canadien Pacifique (Canadien Pacifique ou CP) a quitté Winnipeg (Manitoba) à destination de Thunder Bay (Ontario). Avant le départ, le train a fait l'objet d'un essai de frein n° 1¹ réussi et d'une inspection de sécurité et d'entretien².

¹ L'essai de frein n° 1, effectué par des inspecteurs accrédités de matériel remorqué, permet de vérifier l'intégrité et la continuité de la conduite générale, l'état de la timonerie de frein, le serrage et le desserrage des freins à air et la course du piston sur chaque wagon.

² L'inspection de sécurité et d'entretien est une inspection des principaux composants des wagons de marchandises et des locomotives. Transports Canada exige que cette inspection soit effectuée sur chaque train partant d'un lieu désigné pour les inspections de sécurité; la compagnie de chemin de fer communique la liste de ces lieux à Transports Canada.

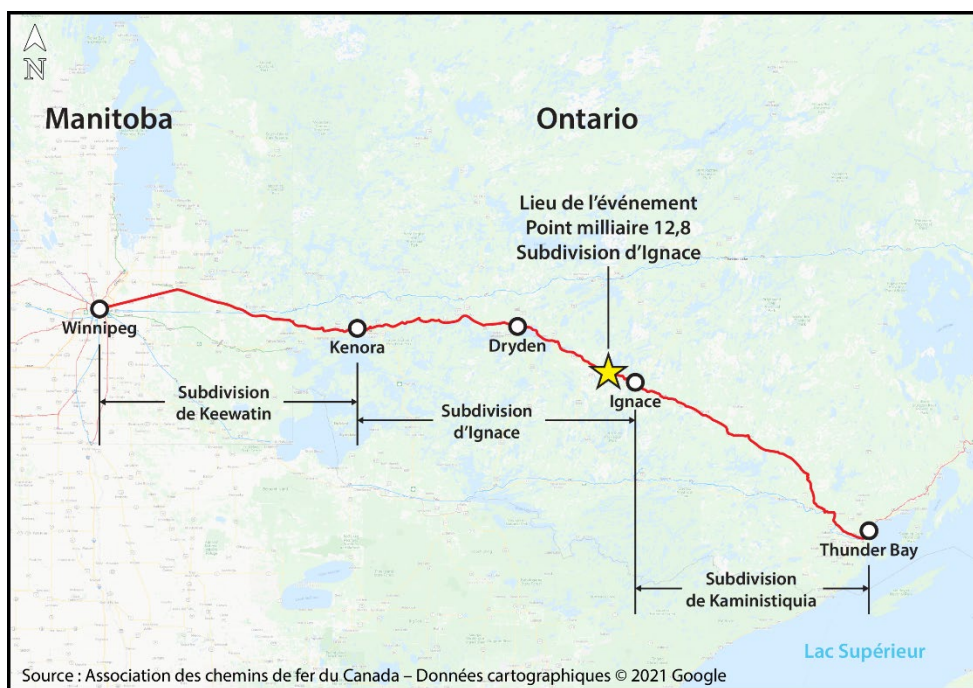
Le train-bloc à traction répartie (TR)³ était composé de 2 locomotives de tête, de 1 locomotive télécommandée en milieu de train, située après le 112^e wagon, et de 222 wagons-trémies chargés de céréales. Il pesait 30 307 tonnes⁴ et mesurait 12 896 pieds. La composition du train répondait aux exigences du CP en matière de formation des trains.

L'équipe d'exploitation était formée d'un mécanicien de locomotive et d'un chef de train; les 2 répondaient aux exigences établies relatives au repos et à la condition physique et étaient qualifiés pour leur poste respectif.

1.1 L'événement

Vers 14 h 43⁵, alors que le train roulait à 46 mi/h en direction est dans la subdivision d'Ignace, un freinage d'urgence provenant de la conduite générale a été déclenché près d'Ignace (Ontario). Une fois le train immobilisé, l'équipe a effectué une inspection et a constaté que 53 wagons avaient déraillé au point milliaire 12,8 (figure 1). Plusieurs wagons déraillés avaient subi une brèche, ce qui a entraîné le déversement de leur chargement de céréales (blé et lin). Personne n'a été blessé.

Figure 1. Lieu de l'événement (Source : Association des chemins de fer du Canada, Atlas du rail canadien, avec annotations du BST)



Avant le freinage d'urgence, l'équipe n'avait remarqué aucune anomalie de la voie ou dans la conduite du train. Au moment de l'événement, le ciel était dégagé et la température était de 20 °C.

³ Un train-bloc est un train transportant une seule marchandise dans des wagons de type, de longueur et de poids semblables.

⁴ Dans le présent rapport, « tonne » désigne une tonne courte, soit 2000 livres ou environ 907 kg.

⁵ Toutes les heures sont exprimées en heure avancée de l'Est.

1.2 Examen des lieux

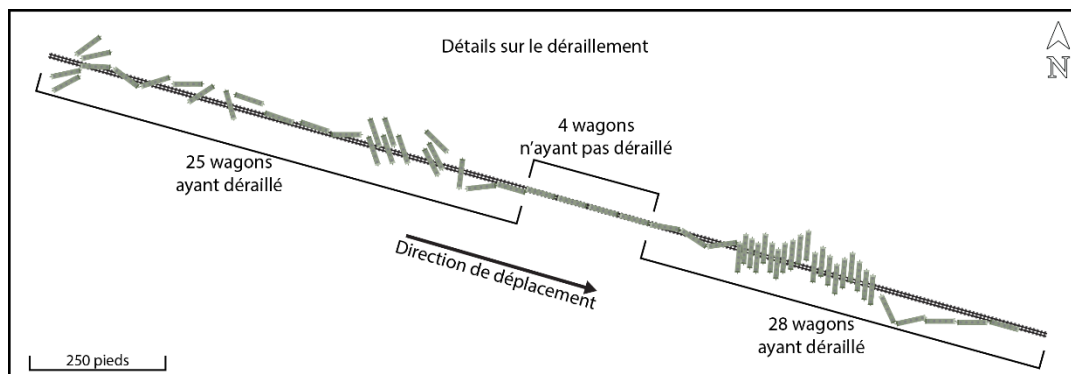
Les 53 wagons ayant déraillé se sont mis en portefeuille en 2 empilements distincts (figure 2).

Figure 2. Lieu de l'événement montrant les 2 empilements de wagons déraillés
(Source : Canadien Pacifique, avec annotations du BST)



Le train s'était séparé après le 26^e wagon. Il y avait un écart d'environ 30 longueurs de wagon entre ce wagon et les 2 empilements de wagons déraillés. Le 1^{er} empilement comptait 28 wagons (de la 27^e à la 54^e position), et le 2^e empilement en comptait 25 (de la 59^e à la 83^e position). Entre eux, 4 wagons étaient restés sur la voie et n'avaient pas déraillé (figure 3).

Figure 3. Schéma du lieu de l'événement montrant la position des wagons déraillés (Source : BST)



Un tronçon de voie d'environ 1600 pieds a été endommagé ou détruit dans le secteur de l'événement.

En raison de pluies excessives en mai 2020, il y avait une accumulation d'eau du côté nord (gauche) de la voie, à proximité immédiate des 2 empilements (figure 4). Un pontceau d'égalisation situé dans le secteur était en bon état.

Figure 4. Accumulation d'eau à côté de la voie nord (Source : Canadien Pacifique)



Après le déraillement, une limitation temporaire de vitesse de 10 mi/h a été imposée du point milliaire 12,2 au point milliaire 13,5. Cette mesure a ensuite été remplacée par une limitation temporaire de vitesse de 25 mi/h du point milliaire 12,5 au point milliaire 13,2.

1.3 Renseignements sur la subdivision

La subdivision d'Ignace s'étend d'Ignace (point milliaire 0,0) jusqu'à Kenora (Ontario) (point milliaire 146,12). Elle constitue le milieu de 3 subdivisions de la ligne du CP qui relie Winnipeg et Thunder Bay, la subdivision de Keewatin étant située à l'ouest et la subdivision de Kaministiquia, à l'est. La construction de la voie sur ce parcours a commencé en 1875, il y a plus d'un siècle. Elle franchit une variété de topographies difficiles à travers le Bouclier canadien, y compris des centaines de milles de terrain accidenté, de marécages et de tourbières.

Avant 1990, le CP disposait d'une voie double entre Winnipeg et Thunder Bay. Les trains vraciers lourds se dirigeant vers l'est empruntaient la voie nord, et les trains vraciers vides et intermodaux circulaient vers l'ouest sur la voie sud. Vers 1990, le chemin de fer a retiré la voie sud, en laissant des tronçons pour des voies de dédoublement et d'évitement. Par conséquent, la majeure partie du territoire comporte une seule voie.

Dans cette subdivision, les mouvements de train sont régis par le système de commande centralisée de la circulation, conformément au *Règlement d'exploitation ferroviaire du Canada*. Leur répartition est effectuée par un contrôleur de la circulation ferroviaire du CP à Calgary (Alberta).

Le tableau 1 présente les volumes de trafic marchandises dans la subdivision d'Ignace de 2018 à 2020.

Tableau 1. Volumes de trafic marchandises dans la subdivision d'Ignace de 2018 à 2020 (Source : Canadien Pacifique)

Année	Volume (millions de tonnes-milles brutes par mille)
2018	34,17
2019	35,85
2020	37,88

1.4 Particularités de la voie

La voie de la subdivision d'Ignace est de catégorie 4 selon le *Règlement concernant la sécurité de la voie* (aussi appelé le Règlement sur la sécurité de la voie, ou RSV) approuvé par Transports Canada⁶.

Dans le secteur du déraillement, la voie traverse un terrain bas, humide, mou et marécageux. La voie est en alignement et en palier, passant à une pente descendante de 0,2 % au point milliaire 12,8 en direction est. Il y a également une courbe à droite de 0,3° du point milliaire 12,95 au point milliaire 13,14. Une route se trouve sur le côté sud.

⁶ *Règlement concernant la sécurité de la voie* (Règlement sur la sécurité de la voie) (approuvé par Transports Canada le 25 novembre 2011, entré en vigueur le 25 mai 2012).

La structure de la voie était constituée de longs rails soudés de 136 livres RE⁷ fabriqués par IAT International, Inc. en République tchèque, laminés en 2015 et installés en 2016. Les rails reposaient sur des traverses de bois dur, retenus par des selles à double épaulement de 14 pouces et fixés avec 3 crampons par selle. Dans le secteur du déraillement, les rails étaient généralement encadrés d'anticheminants⁸ toutes les 2 traverses, et peu de mouvement des rails a été constaté. Un programme de remplacement des traverses avait été mené en 2017.

Le ballast était de calibre 4,5 du CP⁹ et provenait de la carrière Dymont, avec des cases pleines et des épaulements de 12 pouces.

En 2020, avant le déraillement et au moment de celui-ci, aucune limitation de vitesse en raison de l'état de la voie n'était en vigueur.

1.5 Composition de la plateforme

Le CP a chargé un expert-conseil en géotechnique de réaliser une enquête afin de déterminer quelle était la composition de la plateforme et si un problème sous-jacent lié à la plateforme pouvait avoir joué un rôle dans l'événement à l'étude.

Pour déterminer la nature et la qualité de la plateforme sous la voie, des échantillons géotechniques ont été prélevés dans le secteur du déraillement.

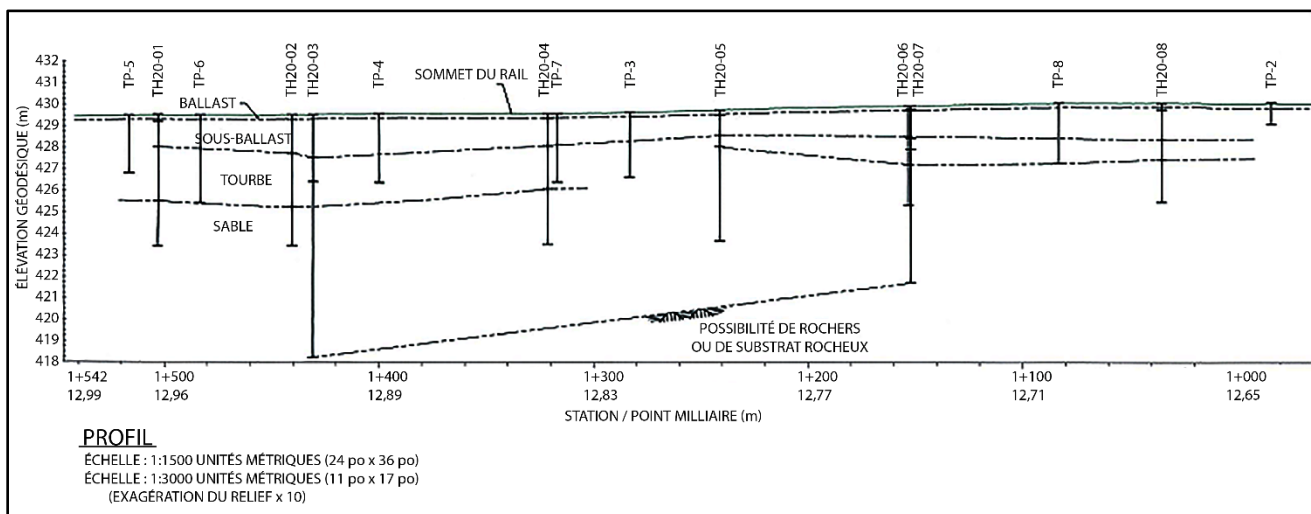
La figure 5 montre les endroits où 8 forages d'essai ont été effectués et où des puits d'exploration ont été creusés entre les points milliaires 12,67 et 12,99, ainsi que le profil de sol à ces endroits.

⁷ « RE » est une abréviation qui fait référence à la section de rail en particulier, avec les dimensions établies par l'American Railway Engineering Association (AREA). Elle est estampillée sur les rails fabriqués conformément à cette spécification de l'AREA. L'AREA a fusionné avec l'American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association en 1997.

⁸ Les anticheminants servent à limiter le mouvement longitudinal du rail sous l'effet de la dilatation et de la contraction thermiques ou du passage des trains. Ils sont posés perpendiculairement au patin de rail, de part et d'autre de la traverse à l'emplacement de la selle de rail, à l'aide d'une clé, d'une masse ou d'une machine.

⁹ Pour le CP, le ballast de calibre 4,5 doit présenter 3 à 4 faces de rupture; 100 % des pierres doivent passer dans un tamis de 2 ½ pouces, 90 % à 100 % dans un tamis de 2 pouces, 60 % à 80 % dans un tamis de 1 ½ pouce, 15 % à 35 %, dans un tamis de 1 pouce, et 0 % à 5 % dans un tamis de ¾ pouce. Le ballast est surtout d'une taille entre 2 ½ pouces et 1 ½ pouce.

Figure 5. Schéma montrant les lieux des forages d'essai et des puits d'exploration, ainsi que le profil de sol à ces endroits (Source : Canadien Pacifique)



Remarque : Dans cette figure, les forages d'essai sont indiqués par le préfixe « TH » suivi du numéro du forage. TP signifie « puits d'exploration ».

Un examen des 8 échantillons (1 à chaque forage d'essai) a permis de déterminer ce qui suit :

- La couche de ballast avait une profondeur de 0,3 m et était constituée d'un mélange de gravier à grains fins et à grains grossiers. Le gravier était gris, sec et compact.
- La couche de sous-ballast avait une profondeur de 1,2 à 1,5 m et était constituée de sable à granulométrie médiocre (classé SP-SM selon le système unifié de classification des sols), noir et brun, humide, meuble et à grains fins. Elle contenait également des traces de limon (16 % dans le 2^e forage d'essai) ainsi qu'un mélange de gravier à grains fins et à grains grossiers. À partir d'une profondeur de 0,5 à 0,8 m, il y avait de l'eau libre, ce qui indique que le niveau de la nappe phréatique était très élevé dans le secteur du déraillement.
- Sous les couches de ballast et de sous-ballast, on a trouvé de la tourbe à une profondeur de 1,5 à 2,0 m. En général, elle était de couleur brune à brun foncé, saturée et meuble. L'épaisseur de la tourbe variait de 0,5 à 1,7 m du point milliaire 12,67 au point milliaire 12,80, et de 1,1 à 2,6 m du point milliaire 12,80 au point milliaire 12,90. Les échantillons contenaient différents types de tourbe, selon le lieu des forages d'essai :
 - Dans la partie supérieure de certains échantillons, il y avait de la tourbe à fibres grossières s'entrecroisant avec de la tourbe à fibres fines. La structure végétale était reconnaissable. Cette tourbe était principalement fibreuse et présentait une décomposition légère à modérée.
 - Dans la partie supérieure à médiane de certains échantillons, à une profondeur allant de 1,3 à 3,0 m, la tourbe contenait des particules ligneuses reconnaissables retenues dans une tourbe à fibres fines, composée principalement de matières non ligneuses. Les particules ligneuses étaient des

morceaux du chemin de rondins¹⁰ posés à l'origine sur la tourbe lors de la construction du chemin de fer.

- Dans la partie inférieure de certains échantillons, à une profondeur d'environ 1,3 à 3,0 m, la tourbe était amorphe et présentait une décomposition très élevée à quasi complète. Presque aucune structure végétale n'était reconnaissable.
- On a déterminé que la teneur en humidité était de 102 % à 145 % dans la tourbe fibreuse et de 381 % dans la tourbe amorphe.

1.6 Fondations en tourbe

La tourbe est une substance d'origine naturelle qui se forme lorsque la matière organique (habituellement végétale) est préservée dans des conditions anoxiques sous une nappe phréatique élevée dans des zones de mauvais drainage, comme les marécages ou les terres humides. La tourbe se caractérise par une teneur élevée en matières organiques, une teneur élevée en eau, un mauvais drainage, un indice des vides élevé, une compressibilité élevée et une faible capacité portante.

Dans le domaine de la géotechnique, on considère de manière générale qu'il faut éviter, dans la mesure du possible, d'utiliser la tourbe comme matériau de fondation. Cependant, il n'est pas toujours possible de faire autrement, notamment lors de la construction de structures linéaires et continues telles que les chemins de fer, les pipelines et les routes¹¹.

Le Canada compte plus de tourbières que tout autre pays au monde. Les fondrières de mousse et autres tourbières couvrent jusqu'à 1,2 million km², soit environ 18 % de la superficie du Canada¹². La tourbe se trouve principalement dans les régions du Bouclier canadien et du nord du pays.

Compte tenu de l'étendue des tourbières au Canada, pour la construction de certains parcours de chemin de fer, comme celui du CP entre Thunder Bay et Winnipeg, il n'y avait d'autre choix que de traverser ce type de terrain.

1.6.1 Propriétés mécaniques de la tourbe

La conductivité hydraulique de la tourbe dépend fortement de la profondeur et du degré de décomposition. La tourbe est très perméable près de la surface et l'est moins dans les couches inférieures. Lorsque la tourbe fibreuse est consolidée¹³, les canaux qui permettent l'écoulement de l'eau s'effondrent et l'eau est expulsée. Au cours de la consolidation, la

¹⁰ Un chemin de rondins est un type de chemin réalisé en plaçant des rondins (ou du bois d'œuvre) perpendiculairement à la direction de la voie.

¹¹ M. T. Hendry, « The geomechanical behaviour of peat foundations below rail-track structures », thèse de doctorat (Université de la Saskatchewan, décembre 2011), à l'adresse central.bac-lac.gc.ca/.item?id=TC-SSU-201112237&op=pdf&app=Library&oclc_number=1032940749 (dernière consultation le 9 février 2023).

¹² Ibid.

¹³ La consolidation correspond à une réduction du volume en réponse à une augmentation de la pression et à une diminution de la teneur en eau.

tourbe subit de très fortes diminutions de la conductivité hydraulique, proportionnelles à une forte diminution de l'indice des vides (ou de la teneur en eau).

La rigidité et la résistance de la tourbe sont fortement liées à l'effet de renforcement des fibres végétales imbriquées dans la tourbe : plus la teneur en fibres organiques est élevée, plus la résistance de la tourbe est élevée. La résistance de la tourbe peut augmenter lorsque la teneur en eau est réduite par la consolidation. La consolidation primaire de la tourbe est rapide en raison de la conductivité hydraulique initiale élevée de la tourbe, et peut se mesurer en semaines et en mois. En comparaison, la compression secondaire de la tourbe se mesure en années. L'ampleur de la compression secondaire est élevée et peut représenter plus de 60 % du tassement total. La compression secondaire est souvent le processus de consolidation dominant, au cours duquel il faut procéder à un entretien permanent de la voie, comme le nivellement par calage et le nivellement de la voie.

1.6.2 Remblais de chemin de fer construits sur des fondations en tourbe

Lorsque le tronçon du CP reliant Winnipeg à Thunder Bay a été aménagé il y a plus d'un siècle, le remblai a été construit sur la surface de tourbe d'origine au moyen d'un chemin de rondins, qui a ensuite été chargé de matériaux d'emprunt locaux. Cette technique permettait de renforcer la base du remblai et de répartir la charge sur la fondation en tourbe.

Cependant, les rondins enfouis dans des sols humides, acides et anaérobies, tels que les tourbières ou les fondrières de mousse, se décomposent très lentement. Par conséquent, ces remblais ont continué à se tasser pendant de nombreuses années, jusqu'à aujourd'hui.

La plupart des structures ferroviaires existantes au Canada sont en service depuis plus d'un siècle. La charge des trains n'a cessé d'augmenter depuis la construction initiale du réseau ferroviaire canadien; les wagons plus récents ont actuellement un poids brut sur rail de 286 000 livres ou 125,5 tonnes. La longueur des trains s'est également accrue de façon constante, ce qui entraîne des périodes de charge cyclique de plus en plus longues. Les charges plus élevées ont sollicité davantage l'infrastructure existante, en particulier les structures construites sur des fondations fragiles, comme la tourbe. Les bases molles, les soulèvements par le gel, les pertes de capacité portante, les glissements de pente et les affaissements sont des problèmes courants liés aux remblais et aux voies de chemin de fer construits sur de la tourbe.

1.6.3 Rapport d'enquête ferroviaire R04Q0040 du BST

Le 17 août 2004, 18 wagons-citernes du train U-781-21-17, un train-bloc de produits pétroliers de la Compagnie des chemins de fer nationaux du Canada, ont déraillé dans la zone marécageuse de la Grande Plée Bleue, près de Saint-Henri-de-Lévis (Québec)¹⁴.

L'enquête du BST a porté sur la stabilité de la plateforme et les effets de la charge cyclique d'essieu sur les fondations en tourbe.

¹⁴ Rapport d'enquête ferroviaire R04Q0040 du BST.

Le chargement des trains génère une pression d'eau interstitielle qui peut causer une déformation cyclique excessive, un tassement du remblai ou une rupture rapide en cisaillement des remblais et des fondations en tourbe. Lorsqu'un sol est saturé, l'eau remplit les espaces interstitiels entre les particules du sol. Par conséquent, la pression hydraulique de l'eau dans les vides du sol exerce une pression sur les particules du sol. L'eau supporte initialement une partie de la charge, de sorte qu'elle n'est pas entièrement transmise au sol. Cependant, comme l'eau n'a pas de résistance au cisaillement, la contrainte de contact effective entre les particules du sol détermine la résistance du sol.

Dans le cadre de l'enquête sur le déraillement survenu près de Saint-Henri-de-Lévis, plusieurs trous de forage ont été réalisés pour permettre d'établir le profil stratigraphique le long de la ligne de centre de la voie ferrée et de mettre en place des instruments pour mesurer les variations de pression d'eau interstitielle et la déformation verticale du sol sous la charge d'un train. Les mesures ont indiqué que les valeurs moyennes de déplacement vertical et de pression interstitielle ont tendance à augmenter avec le nombre de wagons qui passent, ce qui crée une accumulation en fin de passage d'un train. Après le passage du dernier wagon, les surpressions se dissipent progressivement; cependant, des tassements résiduels subsistent. Les mesures ont également révélé que les tassements résiduels sont cumulatifs : ils s'accumulent sous l'effet des passages répétés des trains, surtout des trains lourdement chargés. Les mesures en temps réel des déplacements verticaux sous la voie ferrée ont confirmé que ces tassements permanents peuvent atteindre plusieurs centimètres par année.

L'enquête, qui comprenait des études géotechniques réalisées à la demande du BST, a également permis de montrer comment la plateforme peut progressivement se rompre. Elle a établi que le passage répété de trains chargés entraîne une pression interstitielle maximale au centre de la couche de tourbe et que l'intensité de la pression interstitielle dépend de la charge d'essieu et de la vitesse du train. Ces surpressions réduisent la résistance au cisaillement de la tourbe, ce qui engendre une distorsion et un réalignement progressif des fibres de tourbe en 2 plans de cisaillement à mesure que le tassement permanent sous la voie ferrée augmente. Les fibres sont brisées progressivement à partir du centre de la couche de tourbe. Lorsque la résistance au cisaillement de la tourbe est atteinte, la plateforme peut se rompre subitement par poinçonnement, provoquant des tassements importants et soudains et l'affaissement de la voie ferrée.

L'enquête a permis de déterminer que le déraillement survenu près de Saint-Henri-de-Lévis s'est vraisemblablement produit lorsque les wagons n'ont pas pu négocier l'affaissement soudain de la voie provoqué par la rupture de la plateforme, très probablement causée par le poinçonnement de la couche de tourbe sous-jacente. Le poids des essieux, le tonnage, la vitesse et la fréquence de passage des trains peuvent contribuer au poinçonnement.

Étant donné la nécessité de poursuivre les efforts de recherche afin de mieux comprendre ces phénomènes et de réduire les risques, le Bureau a recommandé que

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

Recommandation R07-03 du BST

À la suite d'une étude en profondeur du comportement des matériaux organiques saturés sous charge cyclique menée par l'équipe du programme de recherche sur les risques géologiques en transport ferroviaire du Centre de développement des transports¹⁵ en septembre 2012, le Bureau a estimé que la réponse à la recommandation dénotait une attention entièrement satisfaisante.

1.7 Inspections de la voie

1.7.1 Inspections par véhicule rail-route

La voie dans le secteur du déraillement a été inspectée par un véhicule rail-route à 3 reprises la semaine précédant le déraillement (tableau 2), ce qui dépasse l'exigence de 2 inspections hebdomadaires prévue par le RSV pour les voies de catégorie 4. Aucun défaut n'a été observé.

Tableau 2. Inspections de la voie effectuées par véhicule rail-route dans le secteur du déraillement du 19 au 25 mai 2020

Date	Point milliaire	Méthode
2020-05-19	De 5,0 à 34,15	Véhicule-test léger*
2020-05-21	De 5,0 à 28,0	Véhicule-test léger
2020-05-25	De 5,0 à 12,0	Véhicule-test léger
2020-05-25	De 12,0 à 19,0	Observation**

* Le véhicule-test léger est un véhicule rail-route équipé d'un système de contrôle de la géométrie qui complète les inspections de sécurité ferroviaire effectuées à l'aide d'un système autonome de mesure de la géométrie de la voie ou d'une voiture d'évaluation de la voie en mesurant divers aspects essentiels de la géométrie de la voie, y compris le dévers, la courbure et l'écartement.

** Cette méthode consiste à effectuer une inspection visuelle, qui peut se faire en véhicule rail-route ou à pied.

1.7.2 Inspections de détection des défauts de rail

L'inspection de détection des défauts de rail est un essai non destructif précoce visant à détecter les défauts internes du rail, afin que des mesures correctives puissent être prises avant la rupture du rail.

¹⁵ Le Centre de développement des transports est la direction centrale de la recherche et du développement de Transports Canada. Il gère un programme de recherche et développement multimodal visant à améliorer la sécurité, la protection, l'efficacité énergétique et l'accessibilité du réseau de transport canadien et à protéger l'environnement.

Au cours des 12 mois précédant le déraillement, une inspection de détection des défauts de rail a été effectuée à 4 reprises en 2019 (27 juin, 30 août, 8 novembre et 31 décembre) et à 2 reprises en 2020 (25 février et 1^{er} mai).

L'inspection du 31 décembre 2019 a révélé un trou d'éclissage fissuré à un joint au point milliaire 14,079, et l'inspection du 1^{er} mai 2020 a révélé un trou d'éclissage fissuré à un joint au point milliaire 26,046.

1.7.3 Inspections à l'aide du système autonome de mesure de la géométrie de la voie

Le système autonome de mesure de la géométrie de la voie (ATGMS) fait une lecture optique sans contact au moyen d'un laser fixé sous un wagon couvert afin de détecter les défauts en temps quasi réel. Il peut fonctionner à partir de tout train à la vitesse autorisée sur la voie, jusqu'à 80 mi/h. Il signale les défauts critiques à l'aide de la fonction de cartographie du système d'information géographique. « En regroupant des renseignements sur les défauts, le système est en mesure de prédire la détérioration des voies et ainsi d'améliorer le service, de réduire le nombre de déraillements et d'arrêts non planifiés et de permettre une planification plus poussée de l'entretien des voies¹⁶ ». Le wagon couvert peut être placé en toute position dans le train; il ne requiert aucune formation de train particulière. En général, le wagon est envoyé itérativement sur de longs trajets afin d'obtenir des mesures répétées et de s'assurer que toutes les lignes principales et voies d'évitement parallèles sont inspectées. Le CP exploite actuellement 3 wagons couverts munis d'un ATGMS dans ses trains de marchandises commerciaux.

En 2020, avant l'événement à l'étude, un wagon couvert muni d'un ATGMS a été utilisé dans le secteur du déraillement les 21 et 31 mars, les 15 et 23 avril, et les 1^{er} et 15 mai. Les enregistrements graphiques des essais ont permis de déceler les conditions suivantes entre les points milliaires 12 et 13 :

- S22 – Déplacement vertical d'un cordeau de 22 pieds le long de la surface du rail.
- R31 – Mesure, en pouces, de la gradation du dévers sur un tronçon de voie de 31 pieds; lorsqu'on constate un affaissement de la surface du rail, on le compare à la mesure prise pour les 31 pieds de rail précédents.
- RC55 – Taux de variation du nivellement transversal sur un tronçon de voie de 55 pieds.
- D ELV T – Défauts d'élévation de conception en alignement qui indiquent un dévers excessif de la voie en alignement.

¹⁶ Compagnie de chemin de fer Canadien Pacifique, *Rapport sur la responsabilité sociale d'entreprise 2016*, p. 19, à l'adresse cpr.ca/fr/about-cp-site/Documents/cp-rse-2016.pdf (dernière consultation le 9 février 2023).

Comme les conditions enregistrées par le wagon couvert muni d'un ATGMS n'atteignaient pas les seuils¹⁷ indiqués dans le document *Track Evaluation Cars: Guidelines for Defects & Reports* du CP, elles ont été mises sous surveillance, mais elles n'exigeaient aucune autre mesure.

1.7.4 Inspections par voiture d'évaluation de la voie

Des inspections au moyen d'une voiture d'évaluation de la voie sont effectuées de façon périodique dans la subdivision d'Ignace. Ces inspections visent principalement à mesurer et à évaluer l'alignement de la voie, les variations de surface, les variations du nivellement transversal, l'écartement, la courbure et d'autres propriétés géométriques de la voie, à l'aide d'un véhicule ferroviaire chargé.

Les défauts relevés au cours d'une inspection par voiture d'évaluation de la voie sont classés comme nécessitant une intervention prioritaire, quasi urgente ou urgente¹⁸.

- Un défaut nécessitant une intervention prioritaire n'a pas encore atteint les limites critiques définies par le RSV, mais il tend à s'en approcher. Un tel défaut doit être corrigé le plus rapidement possible pour éviter qu'il se détériore et devienne un défaut nécessitant une intervention urgente.
- Un défaut nécessitant une intervention quasi urgente est un défaut prioritaire qui est à moins de 1/8 pouce de nécessiter une intervention urgente.
- Un défaut nécessitant une intervention urgente dépasse les limites prescrites par le RSV et exige une correction immédiate et l'imposition d'une limitation de vitesse obligatoire (à moins qu'il ne soit corrigé avant le passage du train suivant).

Des essais ont été effectués par voiture d'évaluation de la voie dans la subdivision d'Ignace le 16 septembre 2019, le 24 octobre 2019 et le 7 avril 2020. Les défauts suivants ont été relevés et corrigés dans le secteur du déraillement avant l'événement :

- Le 16 septembre 2019, 4 défauts D ELV T nécessitant une intervention urgente et 10 défauts D ELV T nécessitant une intervention quasi urgente ont été détectés aux environs du point milliaire 12. On a également relevé des conditions RC55 n'exigeant aucune autre mesure.
- Le 24 octobre 2019, 1 défaut D ELV T nécessitant une intervention prioritaire a été détecté.

¹⁷ Sur une voie de catégorie 4, les mesures S22 supérieures à 5/8 pouce sont considérées comme des défauts nécessitant une intervention prioritaire. Les mesures R31 supérieures à 1 pouce et jusqu'à 1 1/2 pouce sont considérées comme des défauts nécessitant une intervention prioritaire. Les mesures R31 supérieures à 1 1/2 pouce sont considérées comme des défauts nécessitant une intervention urgente. Les mesures RC55 supérieures à 1 1/4 pouce et jusqu'à 1 3/4 pouce sont considérées comme des défauts nécessitant une intervention prioritaire. Les mesures RC55 supérieures à 1 3/4 pouce sont considérées comme des défauts nécessitant une intervention urgente. Les mesures D ELV T supérieures à 1 pouce et jusqu'à 1 1/4 pouce sont considérées comme des défauts nécessitant une intervention prioritaire. Les mesures D ELV T supérieures à 1 1/4 pouce sont considérées comme des défauts nécessitant une intervention urgente.

¹⁸ Compagnie de chemin de fer Canadien Pacifique, *Livre rouge des exigences relatives à la voie et aux ouvrages* (révisé le 28 octobre 2019) et *Track Evaluation Cars: Guidelines for Defects & Reports* (2014).

- Le 7 avril 2020, 8 défauts R31, mesurant entre $\frac{3}{4}$ et $1 \frac{1}{4}$ pouce, ont été détectés sur les rails nord et sud entre les points milliaires 11,7 et 13,5. De plus, l'essai a permis de déceler 3 défauts S22 nécessitant une intervention prioritaire au point milliaire 13,5. Ces défauts correspondaient à des soulèvements par le gel et ont été corrigés par un nivellement par calage et un nivellement de la voie. Dans 2 cas, les défauts R31 ont été décelés au même endroit sur les 2 rails, ce qui indique un affaissement de la voie.

1.8 Entretien de la voie

Dans le secteur du déraillement, il y avait des ondulations dans le profil de la voie et des variations dans l'alignement de la voie. Les soulèvements par le gel étaient également fréquents en hiver, entre le gel et le dégel, et se poursuivaient parfois jusqu'en juin. Ils sont causés par le gel de l'excès d'humidité dans le sol de la plateforme. Lorsque l'eau stagnante contenue dans la plateforme gèle, elle forme des lentilles de glace qui provoquent le soulèvement du sol et de la voie au-dessus. Le soulèvement par le gel entraîne des défauts de surface, de profil et d'alignement de la voie qui peuvent être difficiles à corriger du fait que la voie est gelée. L'abaissement d'une voie après son soulèvement est une opération très difficile; la compensation du soulèvement ne peut se faire que par un épandage de sel et un nivellement par calage de la voie dans les sections inégales et ondulées¹⁹.

L'installation de cales de rail exige beaucoup de travail, et les zones corrigées nécessitent un nivellement localisé. Pour effectuer le nivellement par calage, il faut retirer les anticheminants, puis soulever le rail et les selles de rail des traverses. Des cales de rail sont installées entre la selle et la traverse. Le rail et les selles de rail sont ensuite réinstallés, et les anticheminants sont remis en place lorsque la voie se tasse de nouveau dans le ballast.

Dans le secteur du déraillement, durant l'hiver 2019-2020, 5600 cales de rail ont été installées par les équipes de district qui travaillent d'une subdivision à l'autre. Les difficultés liées aux activités de nivellement par calage au cours de l'hiver précédant l'événement ont été aggravées par des problèmes d'équipement²⁰.

En plus des activités de nivellement par calage, les dossiers d'entretien de la voie du CP montrent qu'au point milliaire 12,8, dans le secteur du déraillement, le personnel d'entretien de la voie a procédé à l'élimination de joints par soudage en bout par étincelage les 23 et 24 mai 2019 et le 20 mai 2020, ainsi qu'à un nivellement de la voie le 17 septembre et les 22 et 24 octobre 2019.

¹⁹ S. Wilk et B. Bakkum, « Potential frost heave detection and remediation methods », *Railway Track & Structures* (septembre 2020).

²⁰ Il n'y avait qu'une seule bourreuse et régaleuse à ballast de type Mark IV. Elle était partagée avec la subdivision de Keewatin et il semblerait qu'elle ait fait l'objet de pannes mécaniques fréquentes et de pénuries de pièces.

1.9 Technologies d'inspection des géorisques

Le Programme de recherche sur les géorisques ferroviaires du Centre de développement des transports est une collaboration entre compagnies de chemin de fer canadiennes, organismes fédéraux, universités et autres parties prenantes visant à concevoir et évaluer des solutions scientifiques et techniques afin d'aider les compagnies de chemin de fer à gérer les géorisques²¹.

Les procédures et technologies d'inspection des chemins de fer reposent essentiellement 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 de tourbe, ou plutôt le niveau de compression dans la couche de tourbe, est invisible à l'œil nu ou lors des inspections de surface. Par conséquent, un affaissement imminent est très difficile à déceler. Le géoradar peut mesurer le tassement cumulatif sur la tourbe et aider à évaluer le risque d'affaissement soudain de la plateforme. Les compagnies de chemin de fer ont étudié l'utilisation de la technologie du géoradar pour confirmer l'état sous-jacent de la plateforme, cartographier l'étendue du problème et élaborer des programmes de remise en état²². Le CP n'a pas utilisé cette technologie dans la subdivision d'Ignace.

1.10 Réparations, entretien et inspections de la voie après l'événement

Pour réparer la voie après le déraillement, les rails endommagés du point milliaire 12,5 au point milliaire 12,8 ont été remplacés par 1600 pieds de longs rails soudés neufs de 136 livres, avec des anticheminants à chaque traverse.

Une berme de pied a été aménagée du côté nord, du point milliaire 12,5 au point milliaire 12,8, pour stabiliser le secteur. Le remblai existant du côté sud a également été prolongé jusqu'au point milliaire 12,8. Les bermes de pied sont utilisées pour élargir la base d'un remblai, ce qui répartit la charge sur une plus grande surface et augmente le facteur de sécurité du remblai contre la rupture par glissement circulaire²³.

²¹ Les projets de recherche entrepris dans le cadre de ce programme portent sur la détermination et l'analyse des risques géonaturels, les enquêtes sur les glissements de terrain, les éléments déclencheurs d'événements géonaturels, la technologie permettant d'évaluer, de surveiller et de prédire les géorisques, la détection sismique permettant de prédire les chutes de roches, l'effet des lourdes charges d'essieu sur des plateformes meubles, la cartographie des risques liés aux argiles sensibles, le colmatage du ballast et l'estimation des risques de glissement de terrain pour les chemins de fer. (Source : Transports Canada, « Programme de recherche sur les géorisques ferroviaires », à l'adresse tc.canada.ca/fr/transport-ferroviaire/securite-ferroviaire/programme-recherche-georisques-ferroviaires (dernière consultation le 9 février 2023).

²² A. Roghani, M. Hendry, M. Ruel, T. Edwards, P. Sharpe et J. Hyslip, « A case study of the assessment of an existing rail line for increased traffic and axle loads », présenté à la conférence de 2015 de l'International Heavy Haul Association (Perth [Australie], du 21 au 24 juin 2015).

²³ Une rupture par glissement circulaire est une rupture par rotation (tassement) d'un bloc de remblai de plateforme construit sur des dépôts relativement profonds de sols mous. La surface de rupture a la forme d'un arc.

Les dossiers d'entretien de la voie du CP indiquent que des travaux de nivellement de la voie ont été effectués dans le secteur dans les jours qui ont suivi le déraillement, soit du 26 au 28 mai 2020. Les inspections menées après ces travaux indiquent toutefois que des problèmes de nivellement transversal persistaient.

Les inspections effectuées par voiture d'évaluation de la voie les 27 mai, 19 juin et 5 juillet indiquaient que les conditions RC55 persistaient. Une inspection réalisée le 16 septembre a permis de déceler 4 défauts D ELV T nécessitant une intervention urgente, mesurant entre 1 ¼ et 1 ⅜ pouce, du point milliaire 12,8 au point milliaire 12,9.

Un wagon couvert muni d'un ATGMS a été utilisé le 8 juillet et le 7 août. Dans l'essai du 8 juillet, 2 défauts D ELV T nécessitant une intervention quasi urgente ont été détectés aux environs du point milliaire 12. Dans l'essai du 7 août, 1 défaut D ELV T nécessitant une intervention urgente et 5 défauts D ELV T nécessitant une intervention quasi urgente ont été détectés sur le même tronçon de voie.

Les défauts de dévers, constatés lors de l'inspection réalisée le 27 mai par voiture d'évaluation de la voie et celle réalisée le 7 août au moyen du wagon couvert muni d'un ATGMS, n'étaient pas situés dans une courbe, ce qui indique que 1 rail était plus haut que l'autre sur une voie en alignement. Les rails d'une voie en alignement doivent avoir la même hauteur. Si ce n'est pas le cas, les wagons peuvent se balancer et éventuellement dérailler lorsqu'ils traversent un tel tronçon de voie. Le chargement des wagons, la suspension et l'état des bogies peuvent également accroître le risque de déraillement.

1.11 Autre événement survenu dans le secteur du déraillement

Le 17 juin 2020, 22 jours après l'événement à l'étude, la locomotive en milieu de train et 17 wagons du train 3850-003 du CP, qui roulait en direction est dans la subdivision d'Ignace, ont déraillé près du point milliaire 12,9. Le train était propulsé par 2 locomotives à TR, soit 1 en tête et 1 en milieu de train. Il tirait 157 wagons à charbon chargés, mesurait 8364 pieds et pesait 21 394 tonnes. Le BST n'a pas enquêté sur cet événement.

On a constaté un flambage de la voie, et le CP a estimé que ce déraillement était attribuable à un alignement irrégulier de la voie. Au moment du déraillement, une limitation temporaire de vitesse de 25 mi/h était en vigueur entre le point milliaire 12,5 et le point milliaire 13,2 à la suite du déraillement à l'étude survenu le 25 mai, et une limitation de vitesse en raison de la chaleur était également en vigueur, car la température au moment de l'événement était de 32 °C.

Dans la subdivision d'Ignace, les trains-blocs chargés circulent en direction est, ce qui contribue au mouvement des rails vers l'est. À la suite du déraillement à l'étude survenu le 25 mai, la voie endommagée avait été réparée à l'aide de nouvelles sections de voie préfabriquées encadrées d'anticheminants à chaque traverse; la voie non endommagée à l'ouest de la réparation était toujours encadrée d'anticheminants toutes les 2 traverses. Le tronçon de voie réparé était donc plus solidement fixé que le tronçon non endommagé à

l'ouest, si bien que les rails du tronçon non endommagé étaient poussés contre les rails du tronçon réparé, ce qui a probablement contribué au flambage de la voie.

1.12 Données du consignateur d'événements de locomotive

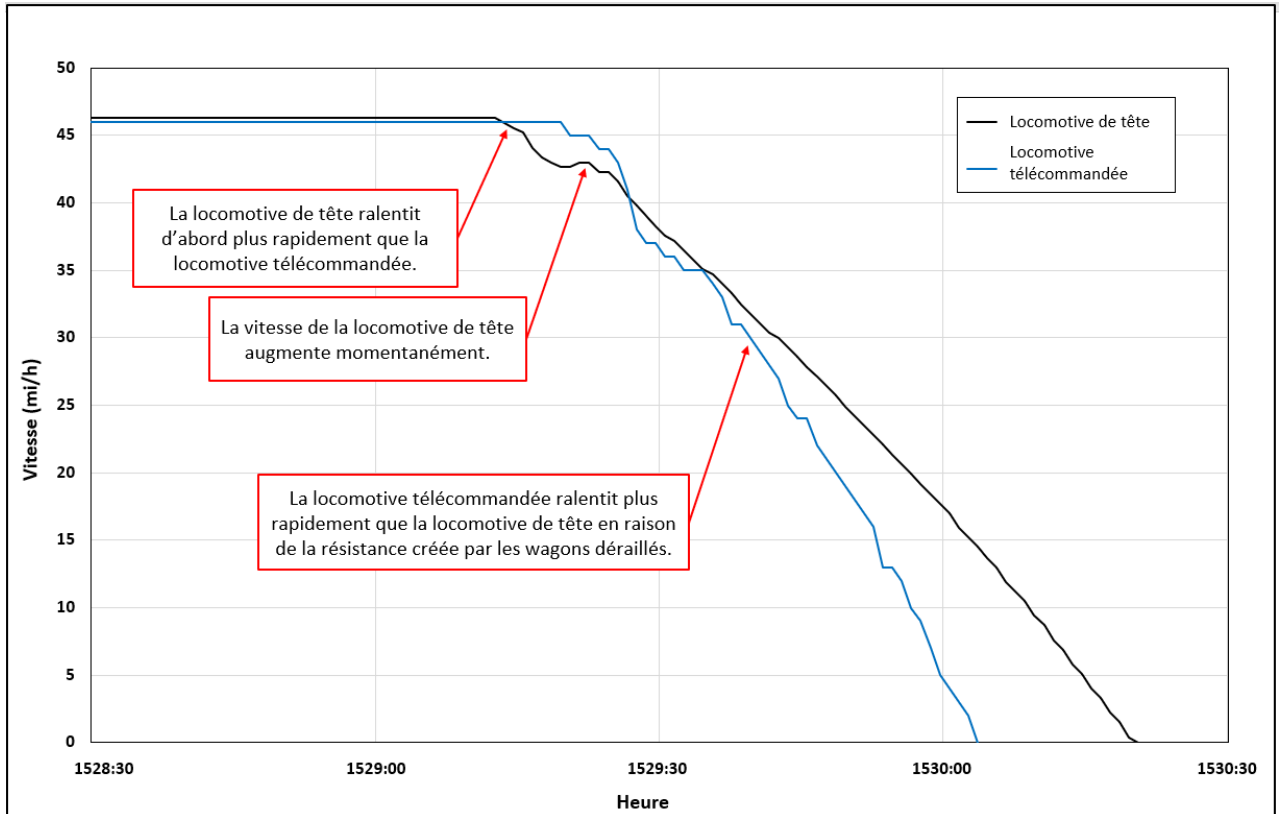
Les locomotives étaient munies de consignateurs d'événements de locomotive (CEL). Un examen des données de la locomotive de tête a confirmé qu'un freinage d'urgence provenant de la conduite générale avait été déclenché juste avant le déraillement. Les données du CEL ont également indiqué qu'avant le freinage d'urgence, il n'y a pas eu de problèmes importants liés à la conduite du train, comme des modulations erratiques du manipulateur ou encore des accélérations ou décélérations soudaines. Au moment du freinage d'urgence, le train roulait à 46 mi/h et le manipulateur était réglé à la position 8 depuis 1 heure et 19 minutes.

Les horodateurs des CEL de la locomotive de tête et de la locomotive télécommandée ont été synchronisés²⁴. Les données des 2 locomotives ont également été analysées afin de comparer les profils de vitesse des 2 groupes de traction (de tête et télécommandé) entre le moment où le freinage d'urgence a été déclenché et celui où le train s'est immobilisé après le déraillement. Avant le déraillement, les profils de vitesse correspondaient à 0,5 mi/h près, ce qui indique que le système de TR a fonctionné comme prévu, même pendant le freinage d'urgence provenant de la conduite générale.

Un examen des renseignements sur le profil de vitesse a permis de déterminer que dans les premiers moments du déraillement, le taux de décélération de la locomotive de tête est devenu plus marqué que celui de la locomotive télécommandée (figure 6). La partie avant s'est séparée derrière le 26^e wagon (plus près de la locomotive de tête) et a poursuivi sa course en freinage d'urgence jusqu'à ce qu'elle s'immobilise. Les wagons situés immédiatement derrière cette séparation (de la 27^e à la 54^e position) se sont arrêtés rapidement en raison du freinage d'urgence, mais la locomotive télécommandée a continué de pousser pendant une autre seconde (ce qui a entraîné une augmentation momentanée de la vitesse) jusqu'à ce qu'elle détecte la commande de freinage d'urgence et qu'elle ralentisse. Pendant cette courte période, un 2^e groupe de wagons (de la 59^e à la 83^e position) a déraillé, laissant 4 wagons sur la voie entre les 2 empilements de wagons déraillés. La différence entre les profils de vitesse de la locomotive de tête et de la locomotive télécommandée (figure 6) explique pourquoi il y a eu 2 empilements distincts de wagons déraillés.

²⁴ Il y avait un délai de transmission de 1 seconde entre la locomotive de tête et la locomotive télécommandée. Ce délai est normal, car il faut au moins 1 seconde pour que le système de TR de la locomotive de tête transmette une commande par radio à la locomotive télécommandée, puis que le système de TR de la locomotive télécommandée reçoive, décode et exécute la commande, et enfin que le CEL enregistre le changement.

Figure 6. Graphique indiquant les profils de vitesse de la locomotive de tête et de la locomotive télécommandée pendant le déraillement (Source : BST, d'après les données provenant des consignateurs d'événements de locomotive)



1.13 Simulations des forces dynamiques du train

En janvier 2021, le BST a effectué une simulation des forces dynamiques du train à l'étude aux environs du point milliaire 12 de la subdivision d'Ignace afin de vérifier les forces exercées le long du train et de déterminer si elles pouvaient être la cause du déraillement. Les résultats suivants ont été obtenus :

- Les forces maximales exercées le long du train avant le freinage d'urgence étaient de 84 kips alors que le train roulait à 46 mi/h et que le manipulateur était réglé à la position 8. Le train circulant à cette vitesse sur une voie en alignement n'aurait pas généré de forces de traction élevées.
- Une simulation du freinage d'urgence déclenché aux environs du point milliaire 12,8 a montré une force maximale de compression le long du train de 216 kips, ce qui n'aurait pas été suffisant pour que la queue du train exerce une force importante sur les wagons qui la précèdent²⁵. Cela correspond aux données enregistrées par les CEL, qui n'indiquaient aucun changement soudain de vitesse.

²⁵ Une voie bien entretenue devrait tolérer des forces de compression exercées le long du train de 325 kips. (Source : W. Egan, TUV Rheinland, « Controlling Train Forces of Larger Trains and the Potential Effects on Track Structure », présenté à la conférence technique de l'International Association of Railway Operating Officers au salon professionnel Railway Interchange 2011, Minneapolis [Minnesota, États-Unis], 20 septembre 2011.)

Les données recueillies et examinées par le BST dans le cadre de son enquête ont également indiqué ce qui suit :

- Les mâchoires d'attelage des wagons à l'étude avaient une capacité nominale de plus de 300 kips à l'état neuf, en l'absence de toute faiblesse ou défectuosité. Les forces maximales exercées le long du train déterminées dans le cadre de la simulation étaient inférieures à cette valeur.
- Sur plusieurs pentes ascendantes précédentes, du point milliaire 67 au point milliaire 61, du point milliaire 44 au point milliaire 40, ainsi qu'au point milliaire 19, les 2 locomotives de tête ont généré des forces de traction de 115 à 155 kips. En raison des forces de traction 50 % plus élevées s'exerçant sur les wagons près de la tête du train, si une mâchoire d'attelage avait été défectueuse, elle se serait fort probablement rompue sur ces pentes ascendantes plutôt que sur le lieu du déraillement.

Le BST a également effectué des simulations des forces dynamiques du train afin de déterminer la différence entre les forces générées le long du train lorsqu'on utilise une locomotive télécommandée en queue de train plutôt qu'une unité de détection et de freinage (UDF) lors du déclenchement ou de la propagation d'un freinage d'urgence. Les résultats ont indiqué que, si le train à l'étude avait été équipé d'une locomotive télécommandée en queue de train (configuration 2-1-1 au lieu de 2-1-0²⁶), les forces maximales exercées le long du train pendant le freinage d'urgence auraient été réduites à 196 kips.

1.14 **Gestion des forces exercées le long du train**

L'exploitation des trains a beaucoup changé ces dernières années. Les locomotives plus récentes ont une capacité de freinage dynamique et des systèmes de gestion de l'énergie améliorés. Ces locomotives, lorsqu'elles sont réparties au milieu et/ou en queue de train, ainsi que l'amélioration des méthodes de formation et de conduite des trains, ont permis aux compagnies de chemin de fer d'exploiter des trains plus longs et plus lourds. Les trains longs et lourds peuvent générer d'importantes forces de compression et de traction en raison du jeu des attelages, ce qui entraîne une augmentation des forces exercées le long du train. Pour minimiser ces forces et prévenir les déraillements et/ou réduire leur gravité, il faut tenir compte des éléments suivants :

- la formation des trains;
- la position des locomotives à TR dans un train;
- la conduite des trains;
- la topographie du territoire sur lequel un train circule ainsi que la pente et la courbure de la voie qui y sont associées.

²⁶

Dans une configuration 2-1-0, il y a 2 locomotives en tête de train, 1 locomotive en milieu de train et aucune en queue de train.

1.14.1 Exploitation d'un train à traction répartie

Les systèmes de TR permettent de commander de manière synchrone ou indépendante jusqu'à 4 locomotives télécommandées réparties le long d'un train. Les commandes de conduite du train utilisées sur la locomotive de tête sont transmises à chacune des locomotives télécommandées par l'entremise d'une radio de TR. Lorsque les locomotives télécommandées reçoivent le message radio, elles répondent en exécutant les commandes de conduite du train. Lorsque le train fonctionne en mode synchrone à TR, les signaux envoyés par la locomotive de tête assurent un fonctionnement synchrone avec les locomotives télécommandées.

Les systèmes de TR réduisent les forces exercées sur les bras d'attelage, ce qui permet d'exploiter en toute sécurité des trains plus lourds. Ils assurent également un freinage plus rapide et des distances de freinage plus courtes.

Les trains à TR peuvent être configurés soit avec une locomotive télécommandée en queue de train, soit avec une UDF. Une UDF est un dispositif électronique installé sur l'attelage arrière du dernier wagon et relié à la conduite générale. L'UDF détecte le mouvement du train, surveille la pression dans la conduite générale en queue de train et transmet les renseignements par radio à la locomotive de commande, où ils sont affichés dans la cabine. Les UDF permettent aux mécaniciens de locomotive de déclencher simultanément un freinage d'urgence à partir des 2 extrémités du train. Lorsqu'un train est muni d'une UDF, il peut serrer d'urgence tous ses freins en 2 fois moins de temps qu'il n'en faudrait à un train semblable dont la configuration ne comporte que des locomotives de tête.

Toutefois, comparativement aux locomotives télécommandées en queue de train, les UDF présentent certaines limites. Elles ont une portée de communication plus courte avec la locomotive de tête (1 ½ à 1 ¾ mille, au lieu de 3 à 4 milles), bien que leur portée puisse être étendue lorsqu'elles sont utilisées avec des répéteurs²⁷. Même avec les répéteurs, les UDF ne transmettent que les commandes de freinage d'urgence, contrairement aux locomotives télécommandées en queue de train, qui transmettent également le serrage des freins de service et d'autres renseignements, notamment le réglage du manipulateur et du frein dynamique. Les UDF ont aussi un étrangleur de la conduite générale de plus petite taille. Par conséquent, elles exigent plus de temps pour propager les signaux de freinage d'urgence, elles peuvent engendrer des forces plus élevées le long du train²⁸ et elles nécessitent des distances d'arrêt plus longues.

²⁷ Un répéteur est un appareil qui reçoit et transmet un signal radio afin d'accroître la portée des transmissions des radios bidirectionnelles.

²⁸ Les forces exercées le long du train sont des forces dynamiques de compression et de traction. Les forces de compression sont exercées lorsque le train se comprime et les forces de traction sont exercées lorsque le train s'étire. Ces forces longitudinales exercent des contraintes sur les wagons et leurs composants.

1.14.2 Classement zonal dans les trains

Le logiciel TrAM (Train Area Marshalling ou classement zonal dans les trains) est le programme de formation des trains exclusif du CP, lancé en décembre 2003 et mis à jour à plusieurs reprises depuis. Le TrAM détermine le positionnement stratégique des wagons et des locomotives télécommandées à TR dans un train permettant d'obtenir une répartition optimale du poids et de la puissance motrice. Le TrAM aide à maintenir les forces exercées le long du train à des niveaux acceptables (en dessous de 200 kips²⁹ de force de compression ou de traction en régime stable) dans une plage normale de conditions de conduite et d'exploitation du train.

Le TrAM est fondé sur l'exploitation normale des trains et comprend un ensemble complet de règles de formation des trains conçues pour appliquer des restrictions de formation des trains en fonction de la topographie du territoire d'exploitation d'un train. Le CP a classé la topographie de ses subdivisions en zones de TrAM allant de 1 à 5, qui se distinguent par leurs pentes ascendantes et descendantes, les courbures de la voie et le profil ondulé de la voie. En fonction de l'itinéraire du train, la zone de TrAM 1 est celle qui présente le moins de restrictions de formation des trains, et la zone de TrAM 5 est celle qui en présente le plus.

Environ 85 % de l'ensemble du réseau de voies ferrées du CP est considéré comme étant de zone de TrAM 1, y compris la subdivision d'Ignace sur l'itinéraire entre Winnipeg et Thunder Bay.

Le train était formé selon une configuration 2-1-0, ce qui était conforme aux exigences du TrAM pour les trains-blocs céréaliers chargés qui sont exploités en zone 1. Il respectait également les instructions du CP relatives aux trains à TR³⁰.

1.15 Augmentation de la taille des trains-blocs céréaliers

Le 4 décembre 2018, le CP a dévoilé un nouveau modèle de train à haute efficacité d'une longueur de 8500 pieds³¹. Il peut transporter plus de 40 % de céréales de plus que le modèle de train de 7000 pieds, lorsqu'il est combiné à la capacité supplémentaire des nouveaux wagons-trémies à haute efficacité du CP. Les nouveaux wagons peuvent transporter 10 % de céréales de plus selon le poids et 15 % de plus selon le volume que les anciens wagons du gouvernement du Canada qu'ils remplacent³². Bon nombre des wagons en cause dans le déraillement étaient de nouveaux wagons-trémies à grande capacité. Ils

²⁹ Un kip est une unité de force égale à 1000 livres.

³⁰ Compagnie de chemin de fer Canadien Pacifique, *Authorized Distributed Power Placement for Trains*, version 2 (avril 2020).

³¹ Compagnie de chemin de fer Canadien Pacifique, « CP showcases new high capacity hopper cars, High Efficiency Product train » (4 décembre 2018), à l'adresse cpr.ca/en/media/cp-showcases-new-high-capacity-hopper-cars (dernière consultation le 9 février 2023).

³² Compagnie de chemin de fer Canadien Pacifique, « CP completes biggest-ever Canadian crop-year haul, stands ready for 2020-2021 harvest » (5 août 2020), à l'adresse cpr.ca/en/media/cp-completes-biggest-ever-canadian-crop-year-haul-stands-ready-for-2020-2021-harvest (dernière consultation le 9 février 2023).

possédaient tous une capacité de charge brute sur rail de 286 000 livres ou moins, selon leur âge et leur conception, et ils avaient été entretenus conformément aux normes de l'industrie.

Après la mise en service des trains à haute efficacité, le CP a de nouveau augmenté la longueur des trains-blocs céréaliers; ceux exploités de Bowden (Alberta) à Vancouver (Colombie-Britannique) étaient composés de 168 nouveaux wagons-trémies à grande capacité chargés de 18 480 tonnes de céréales et mesuraient 9700 pieds.

Le 13 mars 2020, le CP a commencé à exploiter des trains-blocs céréaliers encore plus longs sur l'itinéraire entre Winnipeg et Thunder Bay. Entre le 13 mars 2020 et le moment de l'événement à l'étude, 32 trains de ce type ont été exploités sur cet itinéraire, selon la fréquence suivante :

- mars : 4 trains
- avril : 16 trains
- mai : 12 trains

En moyenne, les 32 trains transportaient 224 wagons, pesaient 30 937 tonnes et mesuraient 13 083 pieds (54 % de plus que les trains à haute efficacité de 8500 pieds). Le train le plus long transportait 243 wagons chargés de céréales, pesait 33 320 tonnes et mesurait 14 219 pieds.

Entre le moment du déraillement et le 31 décembre 2020, le CP a exploité 34 trains longs et lourds semblables sur cet itinéraire.

1.16 Systèmes de gestion de la sécurité ferroviaire

Le *Règlement de 2015 sur le système de gestion de la sécurité ferroviaire* (Règlement sur le SGS), qui est entré en vigueur en 2015, exige que les compagnies de chemin de fer élaborent et mettent en œuvre un système de gestion de la sécurité (SGS). Bien que le Règlement sur le SGS précise les processus à inclure dans le SGS d'une compagnie, il laisse aux compagnies de chemin de fer une certaine marge de manœuvre pour déterminer la façon la plus appropriée de mettre en œuvre ces processus, en fonction des facteurs qui leur sont propres.

Le Règlement sur le SGS³³ exige notamment un processus d'évaluation des risques dans le cadre duquel les compagnies de chemin de fer doivent effectuer des évaluations pour cerner les risques et prendre les mesures correctives nécessaires.

³³ Transports Canada, DORS/2015-26, *Règlement de 2015 sur le système de gestion de la sécurité ferroviaire* (modifié le 1^{er} avril 2015), paragraphe 15(1).

Le paragraphe 15(1) du Règlement sur le SGS prévoit notamment ceci :

La compagnie de chemin de fer effectue une évaluation des risques dans les circonstances suivantes :

[...]

c) lorsqu'un changement proposé à son exploitation ferroviaire [...] peut avoir une incidence sur la sécurité du public ou du personnel ou sur la protection des biens et de l'environnement

[...]

1.16.1 Système de gestion de la sécurité du Canadien Pacifique

Conformément au Règlement sur le SGS, le CP a élaboré et mis en œuvre un SGS. Le SGS du CP comprend une politique et une procédure d'évaluation des risques et fait l'objet de mises à jour et de modifications régulières afin de favoriser une amélioration continue.

La procédure d'évaluation des risques du CP énumère les conditions dans lesquelles il faut effectuer une évaluation des risques. L'une de ces conditions comprend tout changement proposé aux activités d'exploitation du CP qui pourrait [traduction] « créer ou aggraver un risque direct pour la sécurité des employés, des biens de la compagnie, des biens transportés par la compagnie, du public ou des biens adjacents au chemin de fer³⁴ ». La procédure décrit comment évaluer chaque changement dans les activités d'exploitation à l'aide de l'outil d'évaluation des risques du CP. Le processus consiste à déterminer les événements indésirables potentiels et leurs conséquences probables qui pourraient survenir à la suite d'un changement dans les activités d'exploitation et à cerner leurs risques et les mesures d'atténuation requises.

1.16.2 Évaluation par le Canadien Pacifique des changements dans l'exploitation des trains

Le CP a procédé à une simulation pour évaluer et valider ses instructions relatives aux trains à TR avant que les nouveaux trains à haute efficacité soient mis en service en décembre 2018. La simulation tenait compte des conditions de la structure de la voie selon les exigences réglementaires et les normes de la voie du CP. La simulation a été réalisée pour des trains-blocs céréaliers chargés dont la longueur avait été augmentée à 168 wagons (au lieu de 112 wagons) sur l'itinéraire ouest entre Bowden et Vancouver en zone de TrAM 3. La subdivision d'Ignace, qui se trouve en zone de TrAM 1 moins restrictive, n'a pas fait partie de la simulation.

Le CP n'a pas jugé que la mise en service des nouveaux trains à haute efficacité constituait un changement dans les activités d'exploitation exigeant une évaluation des risques, selon son interprétation du Règlement sur le SGS et son propre processus interne. Par conséquent, aucune évaluation des risques n'a été effectuée.

³⁴ Compagnie de chemin de fer Canadien Pacifique, *Risk Assessment Procedure*, version 2.0 (dernière révision le 30 juin 2017), section 2.1.1, p. 2.

1.16.3 Enquêtes antérieures du BST liées à des changements dans les activités d'exploitation du Canadien Pacifique

Depuis l'entrée en vigueur du nouveau Règlement sur le SGS en 2015, le BST a enquêté sur 6 autres événements où le CP n'avait pas jugé que ses changements opérationnels étaient suffisamment importants pour nécessiter une évaluation des risques³⁵.

À la suite de l'enquête du BST sur l'accident survenu à Yoho en février 2019³⁶, quand un train de marchandises a déraillé et 3 membres de l'équipe ont été mortellement blessés, le Bureau a déterminé que les SGS des compagnies de chemin de fer ne permettent pas encore de cerner efficacement les dangers et d'atténuer les risques dans le transport ferroviaire. Lorsque les dangers ne sont pas cernés, que ce soit par les signalements, les analyses des tendances des données ou les évaluations de l'incidence des changements opérationnels, et lorsque les risques qu'ils posent ne sont pas rigoureusement évalués, des lacunes dans les moyens de défense peuvent ne pas être atténuées, ce qui augmente le risque d'accident. Le Bureau a également déterminé que, tant que la culture de sécurité générale et le cadre du SGS du CP n'incluront pas des moyens de cerner les dangers de façon exhaustive, notamment par l'examen des rapports de sécurité et l'analyse des tendances des données, et d'évaluer les risques avant d'apporter des changements opérationnels, le SGS du CP ne sera pas pleinement efficace. Par conséquent, en mars 2022, le Bureau a recommandé que

le ministère des Transports exige que la Compagnie de chemin de fer Canadien Pacifique démontre que son système de gestion de la sécurité permet de cerner efficacement les dangers résultant des opérations, en utilisant toute l'information disponible, comme les signalements de dangers par les employés et les tendances des données; qu'il évalue les risques connexes; et qu'il mette en œuvre des mesures d'atténuation et en valide l'efficacité.

Recommandation R22-03 du BST

1.17 Rapport d'enquête sur des problèmes de sécurité SII R05-01 du BST

En 2005, le BST a réalisé une enquête sur des problèmes de sécurité comprenant une analyse approfondie des déraillements de train et des relations qui existent entre ceux-ci et le tonnage des trains vraciers³⁷. Les trains-blocs constitués de wagons à grande capacité chargés posent des problèmes particuliers pour les lignes principales où des faiblesses de la voie (traverses, ballast et plateforme) peuvent être communes. La composition d'un train-bloc est habituellement uniforme, c'est-à-dire que tous les wagons sont de même conception et portent la même charge, et que leurs châssis et caisses réagissent à peu près de façon uniforme. Par conséquent, chaque wagon du train réagit aux irrégularités de la voie de la même manière que le wagon précédent, ce qui entraîne des impacts cumulatifs

³⁵ Rapports d'enquête sur la sécurité du transport ferroviaire R19C0015, R19C0002, R18H0039, R17D0123, R16C0065 et R16W0074 du BST.

³⁶ Rapport d'enquête sur la sécurité du transport ferroviaire R19C0015 du BST.

³⁷ Rapport d'enquête sur des problèmes de sécurité SII R05-01 du BST.

aux irrégularités rencontrées dans la structure de la voie. Les trains composés de nombreux wagons de même conception et à grande capacité de charge n'offrent que peu ou pas de possibilités de reprise élastique³⁸ de la voie au cours de leur passage. Par conséquent, les trains-blocs à grande capacité peuvent accélérer la déformation permanente et habituellement non uniforme de la voie.

1.18 Liste de surveillance du BST

La Liste de surveillance du BST énumère les principaux enjeux de sécurité qu'il faut s'employer à régler pour rendre le système de transport canadien encore plus sûr.

La gestion de la sécurité figure sur la Liste de surveillance 2022. Comme le montre cet événement, lorsque des changements aux opérations ferroviaires sont proposés, il faut déterminer tous les dangers potentiels et effectuer des évaluations des risques afin d'atténuer les dangers pour la sécurité.

MESURES À PRENDRE

L'enjeu de la **gestion de la sécurité dans le transport ferroviaire** demeurera sur la Liste de surveillance jusqu'à ce que les transporteurs démontrent à TC que leur SGS est efficace.

³⁸ Le terme « reprise élastique » signifie la capacité de la voie de reprendre sa forme originale après le passage d'un matériel roulant.

2.0 ANALYSE

Le train était exploité conformément aux exigences de la compagnie et de la réglementation. L'examen des renseignements consignés n'a révélé aucune anomalie de la voie de la subdivision d'Ignace de la Compagnie de chemin de fer Canadien Pacifique (CP), aucune défectuosité du matériel roulant ni aucun problème lié à la conduite du train qui pourraient être considérés comme étant des facteurs de causalité du déraillement.

L'enquête n'a pas permis de déterminer de façon concluante la cause de l'accident. L'analyse portera sur la stabilité de la voie, y compris l'état de la plateforme dans le secteur du déraillement, les effets des charges cycliques sur les fondations en tourbe, ainsi que la gestion des changements dans l'exploitation des trains.

2.1 Nature et qualité de la plateforme de la voie

Dans les environs du lieu de l'événement, il y avait des signes d'un certain mouvement de la plateforme, comme des ondulations dans le profil de la voie et des variations dans l'alignement de la voie.

L'examen de 8 carottes géotechniques prélevées dans le secteur du déraillement (aux environs du point milliaire 12,8) a révélé que la couche de sous-ballast était constituée de sable à granulométrie médiocre, noir et brun, humide, meuble et à grains fins, qui contenait jusqu'à 16 % de limon. Un matériau renfermant plus de 10 % de limon et d'argile n'est pas considéré comme étant perméable et peut avoir une faible capacité portante, surtout s'il est saturé par une nappe phréatique élevée. Dans le secteur du déraillement, à partir d'une profondeur de 0,5 à 0,8 m, il y avait de l'eau libre, ce qui indique que le niveau de la nappe phréatique était très élevé. De la tourbe a été trouvée sous la couche de sous-ballast. La tourbe, un sol organique d'origine naturelle, se caractérise par une teneur élevée en eau, un mauvais drainage et une compressibilité élevée, ce qui réduit la résistance des fibres de tourbe.

Une plateforme molle dans une zone de mauvais drainage crée des problèmes liés à la stabilité de la voie et à la perte de la capacité portante. Étant donné que la voie ferrée entre Winnipeg (Manitoba) et Thunder Bay (Ontario) a été construite il y a plus d'un siècle quand les techniques de construction et les matériaux étaient différents, il y a des endroits où le drainage de l'eau est toujours mauvais, où la plateforme est molle et où les défauts de géométrie sont récurrents. Un bon drainage est essentiel pour assurer la stabilité de la voie, mais il est impossible de drainer une vaste étendue de tourbière plate. En outre, il n'est pas réaliste de remplacer de longues sections de plateforme molle, et l'entretien continu du ballast ne permet généralement pas de résoudre les problèmes sous-jacents de mauvais drainage.

Les mauvaises conditions de drainage sur le lieu du déraillement ont favorisé l'accumulation d'eau le long de la voie et sous celle-ci. Cette eau a donné lieu à un soulèvement de la plateforme par le gel hivernal, à des mesures différentielles du nivellement transversal de la voie et à la nécessité de fréquentes interventions de

nivellement par calage et de nivellement de la voie pour maintenir l'alignement, la surface et le profil de cette dernière.

Fait établi quant aux causes et aux facteurs contributifs

Alors que le train circulait dans la subdivision d'Ignace du CP, sur un tronçon de voie en alignement présentant des mesures différentielles de nivellement transversal, il est probable que la capacité portante de la plateforme en tourbe molle et saturée a été dépassée, entraînant un affaissement soudain de la plateforme qui a provoqué le déraillement.

2.2 Inspections de la voie

La voie entre les points milliaires 12 et 13 avait fait l'objet de fréquentes inspections de la géométrie, qui avaient révélé des problèmes de surface et de nivellement transversal, ainsi que des défauts de géométrie (S22 – déplacement vertical, R31 – dévers, RC55 – variation du nivellement transversal et D ELV T – défauts d'élévation de conception en alignement). De tels défauts de géométrie de la voie peuvent être exacerbés par l'état des traverses, du ballast, de la plateforme et du drainage.

Lors d'une inspection par voiture d'évaluation de la voie le 7 avril 2020, un défaut de surface du rail R31 de 1 ¼ pouce nécessitant une intervention prioritaire a été détecté au même endroit sur les rails nord et sud, ce qui est inhabituel, car ce défaut se produit normalement sur 1 seul rail. Les défauts R31 créent un affaissement du rail; le passage de wagons lourdement chargés accentuerait cet affaissement au fil du temps, ce qui augmenterait les dommages causés aux traverses.

Les défauts D ELV T étaient de ½ pouce ou moins, mais ils indiquaient un dévers sur la voie en alignement, où il ne devrait pas y en avoir. La présence d'un dévers sur une voie en alignement éloignée d'une courbe, comme dans le présent cas, est attribuable à un tassement différentiel entre les rails. Dans l'événement à l'étude, le rail sud était surélevé, ce qui indique que le rail nord s'était affaissé par rapport au rail sud. Cette situation aurait entraîné un transfert de charge vers le rail nord (le rail le plus bas). Bien que la voie double ait été enlevée du côté sud, le remblai est demeuré et a servi de berme de stabilisation pour le rail sud.

Fait établi : Autre

Les problèmes de surface et de nivellement transversal, ainsi que les défauts de géométrie détectés par les fréquents contrôles de la géométrie effectués avant le déraillement, constituaient des indices d'une plateforme possiblement instable aux environs du point milliaire 12.

Les procédures et technologies d'inspection des chemins de fer reposent essentiellement 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 de tourbe, ou plutôt le niveau de compression, est invisible à l'œil nu ou lors des inspections de surface. Bien que les procédures et technologies d'inspection des chemins de fer ne permettent pas de détecter

directement le risque d'affaissement imminent de la plateforme, elles peuvent donner des indices d'une plateforme instable.

Fait établi quant aux risques

Les procédures et technologies d'inspection des chemins de fer qui reposent sur des observations de surface ne permettent pas de mesurer l'état sous-jacent de la plateforme, ce qui augmente le risque qu'un affaissement imminent de la plateforme ne soit pas détecté.

2.3 Charges cycliques sur les fondations en tourbe

Des études géotechniques ont révélé que, lorsqu'un train passe sur une fondation en tourbe, les rails se déplacent verticalement et la pression d'eau interstitielle augmente, ce qui réduit la résistance au cisaillement du sol et de la tourbe sous-jacente. Les valeurs moyennes de déplacement vertical et de pression interstitielle 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, la surpression se dissipe progressivement. Cependant, il subsiste un tassement résiduel, qui est cumulatif; il s'accumule sous l'effet des passages répétés des trains, surtout des longs trains-blocs lourdement chargés.

Le tassement du remblai sous le passage des trains entraîne une distorsion des fibres de tourbe sous-jacentes, un réalignement des fibres et une perte de résistance. La distorsion s'accroît avec l'augmentation de la charge d'essieu et de la vitesse, et les fibres de tourbe finissent par dépasser leur limite d'élasticité; dans ces conditions, les fibres sursollicitées peuvent se cisailer, ce qui entraîne un poinçonnement de la couche de tourbe sous-jacente ou une perte soudaine de la capacité portante.

La longueur et la charge des trains n'ont cessé d'augmenter depuis la construction initiale du réseau ferroviaire canadien, ce qui sollicite davantage l'infrastructure existante. Entre le 13 mars et le 24 mai 2020, la longueur moyenne des 32 trains-blocs céréaliers chargés qui ont emprunté la subdivision d'Ignace était de 13 083 pieds, et leur poids moyen était de 30 937 tonnes. Le passage des trains céréaliers longs et lourds a provoqué des charges cycliques, et la pression d'eau interstitielle n'a pas pu se dissiper. Les charges cycliques ont exacerbé les anomalies de géométrie de la voie existantes, contribuant ainsi à l'affaissement de la plateforme.

Fait établi quant aux causes et aux facteurs contributifs

L'exploitation de trains-blocs constitués de wagons à grande capacité chargés a créé des périodes de charge cyclique plus longues, laissant peu de possibilités de reprise élastique de cette voie présentant des anomalies de géométrie, ce qui a accéléré la détérioration de la plateforme de la voie qui était intrinsèquement instable.

2.4 Gestion des forces exercées le long du train

Pour gérer efficacement les forces exercées le long du train, il faut adopter une approche systématique qui comprend la formation adéquate des trains et le positionnement stratégique des locomotives à traction répartie (TR) dans un train, en tenant compte de la

topographie du territoire sur lequel le train circule, ainsi que de la pente et de la courbure de la voie.

Les locomotives à TR peuvent être ajoutées selon plusieurs configurations dans un train. Dans l'événement à l'étude, le train respectait les instructions du CP relatives aux trains à TR et était formé selon une configuration 2-1-0, ce qui était conforme aux exigences du logiciel de classement zonal dans les trains (TrAM) du CP pour les trains-blocs céréaliers chargés circulant en zone de TrAM 1.

Les locomotives à TR contribuent à réduire les forces exercées sur les bras d'attelage et améliorent la propagation des signaux des freins à air dans l'ensemble de la conduite d'air d'un train. Cela améliore la conduite des trains, réduit les forces exercées le long du train et raccourcit les distances de freinage.

Une unité de détection et de freinage (UDF) a un étrangleur de la conduite générale de plus petite taille que celle des valves de commande de frein automatique et de mise à l'atmosphère de locomotive, et il faut plus de temps pour propager un signal de freinage d'urgence. La simulation a montré que si le train à l'étude avait été équipé d'une locomotive télécommandée en queue de train plutôt que d'une UDF, la propagation du signal de freinage d'urgence aux wagons de queue aurait été plus rapide et les forces exercées le long du train générées par la queue du train sur les wagons précédents pendant le freinage d'urgence auraient été moindres.

Fait établi : Autre

Un train équipé d'une locomotive télécommandée de queue réduit plus efficacement les forces exercées le long du train générées pendant un freinage d'urgence qu'un train muni d'une UDF.

2.5 **Changement dans les activités d'exploitation dans la subdivision d'Ignace**

En décembre 2018, le CP a mis en service un nouveau train à haute efficacité, plus long, pour accélérer le transport de la récolte de céréales de 2019-2020 jusqu'aux ports. Le CP a ensuite encore augmenté la longueur de ces trains. Les 32 trains-blocs céréaliers chargés qui ont circulé dans la subdivision d'Ignace entre le 13 mars et le 24 mai 2020 étaient, en moyenne, sensiblement plus longs et plus lourds que les premiers trains à haute efficacité. Le train à l'étude pesait 30 307 tonnes et mesurait 12 896 pieds.

Des évaluations des risques doivent être réalisées avant de mettre en œuvre des changements opérationnels susceptibles de créer de nouveaux dangers ou d'accroître la gravité de dangers existants. Le CP avait déterminé qu'il n'était pas nécessaire d'effectuer une évaluation des risques avant la mise en service des trains à haute efficacité dans la subdivision d'Ignace. Par conséquent, il n'y a eu aucune occasion de reconnaître les charges cycliques sur la plateforme dans la subdivision d'Ignace comme un danger potentiel, et des mesures d'atténuation n'ont pas été envisagées.

Fait établi quant aux risques

Si aucune évaluation des limites de la plateforme de la voie n'est effectuée, les effets d'une charge cyclique accrue sont inconnus, ce qui augmente le risque d'affaissement de la plateforme menant à un déraillement.

3.0 FAITS ÉTABLIS

3.1 Faits établis quant aux causes et aux facteurs contributifs

Il s'agit des conditions, actes ou lacunes de sécurité qui ont causé l'événement ou y ont contribué.

1. Alors que le train circulait dans la subdivision d'Ignace de la Compagnie de chemin de fer Canadien Pacifique, sur un tronçon de voie en alignement présentant des mesures différentielles de nivellement transversal, il est probable que la capacité portante de la plateforme en tourbe molle et saturée a été dépassée, entraînant un affaissement soudain de la plateforme qui a provoqué le déraillement.
2. L'exploitation de trains-blocs constitués de wagons à grande capacité chargés a créé des périodes de charge cyclique plus longues, laissant peu de possibilités de reprise élastique de cette voie présentant des anomalies de géométrie, ce qui a accéléré la détérioration de la plateforme de la voie qui était intrinsèquement instable.

3.2 Faits établis quant aux risques

Il s'agit des conditions, des actes dangereux, ou des lacunes de sécurité qui n'ont pas été un facteur dans cet événement, mais qui pourraient avoir des conséquences néfastes lors de futurs événements.

1. Les procédures et technologies d'inspection des chemins de fer qui reposent sur des observations de surface ne permettent pas de mesurer l'état sous-jacent de la plateforme, ce qui augmente le risque qu'un affaissement imminent de la plateforme ne soit pas détecté.
2. Si aucune évaluation des limites de la plateforme de la voie n'est effectuée, les effets d'une charge cyclique accrue sont inconnus, ce qui augmente le risque d'affaissement de la plateforme menant à un déraillement.

3.3 Autres faits établis

Ces éléments pourraient permettre d'améliorer la sécurité, de régler une controverse ou de fournir un point de données pour de futures études sur la sécurité.

1. Les problèmes de surface et de nivellement transversal, ainsi que les défauts de géométrie détectés par les fréquents contrôles de la géométrie effectués avant le déraillement, constituaient des indices d'une plateforme possiblement instable aux environs du point milliaire 12.
2. Un train équipé d'une locomotive télécommandée de queue réduit plus efficacement les forces exercées le long du train générées pendant un freinage d'urgence qu'un train muni d'une unité de détection et de freinage.

4.0 MESURES DE SÉCURITÉ

4.1 Mesures de sécurité prises

4.1.1 Compagnie de chemin de fer Canadien Pacifique

La Compagnie de chemin de fer Canadien Pacifique (CP) a construit une berme de pied du côté nord de la voie pour équilibrer le remblai existant de l'ancienne voie ferrée du côté sud, et a effectué des travaux de remise en état et de stabilisation du côté sud de la voie après le déraillement. La berme de pied permet de répartir uniformément la charge de la plateforme et de contrer le tassement différentiel dans le secteur du déraillement.

Le CP a effectué des simulations et a modifié la configuration de la traction répartie des trains céréaliers de 224 wagons. De tels trains sont désormais exploités avec une locomotive télécommandée en queue de train (configuration de train à traction répartie 2-1-1) plutôt qu'avec une unité de détection et de freinage (configuration de train à traction répartie 2-1-0, la configuration du train à l'étude). Les trains de 112 ou 168 wagons sont encore autorisés à circuler avec une unité de détection et de freinage au lieu d'une locomotive télécommandée en queue de train.

Le présent rapport conclut l'enquête du Bureau de la sécurité des transports du Canada sur cet événement. Le Bureau a autorisé la publication de ce rapport le 22 février 2023. Le rapport a été officiellement publié le 21 mars 2023.

Visitez le site Web du Bureau de la sécurité des transports du Canada (www.bst.gc.ca) pour obtenir de plus amples renseignements sur le BST, ses services et ses produits. Vous y trouverez également la Liste de surveillance, qui énumère les principaux enjeux de sécurité auxquels il faut remédier pour rendre le système de transport canadien encore plus sécuritaire. Dans chaque cas, le BST a constaté que les mesures prises à ce jour sont inadéquates, et que le secteur et les organismes de réglementation doivent adopter d'autres mesures concrètes pour éliminer ces risques.