



DIRECTION DES SERVICES À L'APPUI DES OPÉRATIONS
RAPPORT DU LABORATOIRE D'INGÉNIERIE

LP187/2013

Analyse des efforts de freinage

Montreal, Maine & Atlantic Railway Train, MMA-002

Date de l'événement: 06-juillet-2013

À NOTER :

DROIT D'AUTEUR DE LA COURONNE. LE PRÉSENT RAPPORT EST DIFFUSÉ UNIQUEMENT À DES FINS DE SÉCURITÉ ET IL PEUT ÊTRE MODIFIÉ AVANT OU APRÈS LA DIFFUSION DU RAPPORT FINAL DU BST. LA REPRODUCTION DU PRÉSENT DOCUMENT, EN TOUT OU EN PARTIE, PEUT UNIQUEMENT ÊTRE AUTORISÉE À LA SUITE D'UNE DEMANDE AU BST. LA DIFFUSION À L'EXTÉRIEUR DU BST DOIT ÊTRE ÉVALUÉE PAR LE BUREAU DE L'ACCÈS À L'INFORMATION ET PROTECTION DES RENSEIGNEMENTS PERSONNELS

NUMÉRO DE L'ÉVÉNEMENT	CLASSIFICATION DE L'ÉVÉNEMENT	NOMBRE DE PAGES	NOMBRE D'ANNEXES	LA PUBLICATION HORS DU BST REQUIERT LA RÉVISION DU (DE LA) COORDONNATEUR(TRICE) DE L'ACCÈS À L'INFORMATION.	OUI	NON
R13D0054	2	32	0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

PRÉPARÉ PAR

Original en anglais

D. Chen, Ph.D. (Ingénieur spécialiste principal, dynamiques des vols)

APPROUVÉ PAR

Original en anglais

M.E. Givins, ing. (Gestionnaire, Enregistreurs et performance des véhicules)

DIFFUSÉ PAR

Original en anglais

L. Donati, Ph.D. (Directeur, Services à l'appui des opérations)

DIFFUSÉ LE

03 avril 2014

RÉVISION

Table des matières:

1.0	INTRODUCTION	1
1.1	Description de l'événement	1
1.2	Contexte	1
1.3	Services techniques demandés.....	2
2.0	SYSTÈME DE FREINAGE D'UN TRAIN	3
2.1	Freins à air d'un train.....	3
2.2	Freins à main d'un train	4
2.3	Vérification de l'efficacité des freins à main.....	4
2.4	Freins à main sur les locomotives.....	5
2.5	Frein à main sur les wagons.....	5
2.6	Valve de purge rapide	5
3.0	ESSAIS DE FREIN SUR LE GROUPE DE LOCOMOTIVES DE L'ÉVÉNEMENT	6
3.1	Description des essais	6
3.2	Examen du système de freinage.....	7
3.3	Résultats de l'essai de l'effort aux semelles de frein.....	8
4.0	ESSAI DE FREIN SUR LES WAGONS-CITERNES SURVIVANTS	12
4.1	Description des essais	12
4.2	Examen et essai du système de frein à air.....	12
4.3	Résultats des essais de frein à main	13
5.0	ESSAI DU FREIN À MAIN SUR LE FREIN À AIR SUR LES WAGONS- CITERNES	15
5.1	Description des essais	15
5.2	Résultats de l'essai du frein à main sur le frein à air	16
5.3	Résultats d'essais précédents dans le cadre de l'enquête d'Hanlon	18
6.0	ANALYSE.....	19
6.1	Efforts retardateurs s'exerçant sur le train qui commence à dériver	19
6.2	Nombre minimum calculé de freins à main nécessaires.....	20
7.0	CONCLUSIONS.....	23
8.0	DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE	25

Liste des tableaux:

Tableau 1: Résumé des efforts mesurés aux semelles de frein au cours de l'essai à Vachon	9
Tableau 2: Résumés des coefficients de freinage mesurés au cours de l'essai à Vachon ..	9
Tableau 3: Efforts mesurés aux semelles de frein indiquant une défaillance de la valve de purge rapide sur la locomotive MMA 5026.....	10
Tableau 4: Relevés anormaux de pression à CF55 sur la séquence chute-montée.....	11
Tableau 5: Différents relevés sur la séquence d'essai théorique et la séquence d'essai de remplacement.....	11
Tableau 6: Résumé des résultats des essais de frein à air	13

Tableau 7: Résumé des résultats des essais de frein à main sur les wagons-citernes survivants	14
Tableau 8: Coefficient d'augmentation du frein à main sur le frein à air avec dépression de 13 lb/po ²	17
Tableau 9: Frein à main sur le frein à air avec dépression de 20 lb/po ² et serrage normal à fond	18
Tableau 10: Efforts mesurés aux semelles de frein en mode de freinage par frein à main sur freinage d'urgence.....	18
Tableau 11: Efforts retardateurs exercés par les freins sur le train commençant à dériver	20
Tableau 12: Nombre minimum calculé de freins à main nécessaires	22

Liste des figures:

Figure 1: Vue aérienne du site du déraillement	27
Figure 2: Profil du tonnage du train	27
Figure 3: Déclivité et élévation entre Nantes et Mégantic.....	28
Figure 4: Schéma de la timonerie de frein d'une locomotive.....	28
Figure 5: Frein à main de wagon-citerne	29
Figure 6: Coefficient de frottement pour des semelles de frein propres neuves.....	29
Figure 7: Capteurs Smart Shoe	30
Figure 8: Capteur Jim (Golden) Shoe	30
Figure 9: Amplificateur et moniteur intégrés Smart Shoe	31
Figure 10: Capteur de tension de chaîne et plagemètre de couples de serrage, après leur insertion.....	31
Figure 11: Valve de purge rapide sur la MMA 5026.....	32
Figure 12: Trousse d'essai de frein sur wagon individuel	32

1.0 INTRODUCTION

1.1 Description de l'événement

1.1.1 Le 6 juillet 2013, peu avant 1 h, heure normale de l'Est, le train de marchandises numéro 2 vers l'est de la Montreal, Maine & Atlantic Railway, qui avait été stationné sans surveillance pour la nuit à Nantes (Québec), part à la dérive. Le train parcourt une distance d'environ 7,2 milles et atteint une vitesse de 65 mi/h. Vers 1 h 15, à l'approche du centre-ville de Lac-Mégantic (Québec), 63 wagons-citernes chargés de pétrole brut UN 1267 et 2 wagons couverts dérailent. Le déraillement provoque le déversement de quelque 6 millions de litres de pétrole brut. Des feux et des explosions détruisent 40 bâtiments, 50 véhicules et les voies ferrées à l'extrémité ouest du triage de Mégantic. Quarante-sept personnes au total perdent la vie.

1.1.2 Selon un premier examen du site du déraillement, le wagon couvert tampon CIBX 172032, placé immédiatement derrière le groupe de locomotives, et les 63 wagons-citernes chargés suivants ont déraillé sur la voie principale dans une courbe à droite de 4,25 degrés dans le sens du mouvement (vers l'est); l'endroit comportait un branchement n° 11. Le groupe de locomotives s'est séparé des wagons déraillés et s'est scindé en deux parties, chacune se déplaçant sur une distance différente avant de s'immobiliser. Au bout d'un long moment, la partie avant du groupe de locomotives s'est mise à reculer (vers l'ouest) et est entrée en collision avec la seconde partie, les deux se déplaçant sur une courte distance (vers l'ouest) avant de s'arrêter ensemble de façon définitive.

1.1.3 Le wagon couvert tampon déraillé a heurté une coupe de wagons stationnée sur la voie d'évitement. Les 8 wagons-citernes qui suivaient se sont dispersés dans des positions séparées de mise en portefeuille. Les 2 wagons-citernes suivants reposaient dans le sens de la voie d'évitement, sur le branchement, en avant de l'empilement principal en portefeuille constitué du reste des wagons-citernes déraillés, théâtre de l'incendie et des explosions. Les 9 derniers wagons du train restèrent sur les rails; le mécanicien de la locomotive et des intervenants d'urgence les ont dételés et éloignés du site du déraillement et de l'incendie. La figure 1 présente une vue aérienne du site de l'accident.

1.2 Contexte

1.2.1 Le train MMA-02 se composait de 5 locomotives, de 1 fourgon VB-1 pour la commande à distance, de 1 wagon couvert chargé utilisé comme tampon et de 72 wagons-citernes de pétrole brut. Le train pesait 10 287 tonnes et mesurait 4 701 pieds de longueur. Le profil de tonnage du train est représenté à la figure 2.

1.2.2 L'équipe de conduite était formée d'une seule personne. Avant minuit, le mécanicien de la locomotive a serré le frein automatique du train pour arrêter le convoi sur la voie principale de la gare de Nantes. Il a serré les freins à main sur le groupe de locomotives et sur le wagon tampon, puis a desserré le frein automatique, tout en conservant dans la position serrée le frein direct (FD, ou IND pour « indépendant ») sur les locomotives. Pour maintenir l'alimentation des freins à air, le mécanicien de la locomotive a laissé tourner au ralenti le moteur de

- la locomotive de tête, la MMA 5017. Puis, il a quitté le train et s'est rendu dans un hôtel pour y prendre son repos, comme l'indiquait son horaire.
- 1.2.3 Peu après le départ du mécanicien (LP181/2013), on a détecté un incendie à bord de la locomotive de tête; des sapeurs-pompiers de l'endroit sont intervenus pour l'éteindre. On a fait appel à un employé local des Services de l'ingénierie de la MMA pour surveiller le site de l'incendie. Le moteur de la locomotive a été arrêté et le train laissé à nouveau sans surveillance. Quelque 59 minutes plus tard, le train s'est mis en mouvement dans la pente et a accéléré jusqu'à son arrivée dans la ville de Lac-Mégantic, où il a déraillé.
- 1.2.4 La locomotive de tête, la MMA 5017, était équipée d'un consignateur d'événements de locomotive (CEL) de la société Quantum Engineering Incorporated (QEI), version n° S45E et n° de série 0204100033. Peu de temps après l'accident, un membre du personnel de la MMA a téléchargé et fourni au BST les données enregistrées dans le « journal d'extension » du CEL de la locomotive MMA 5017.
- 1.2.5 Le train était également équipé d'une unité de détection et de freinage en queue (UDF). L'UDF a été envoyée pour examen (LP132/2013) au Laboratoire d'ingénierie du BST, où on a extrait les enregistrements de l'unité DataFlash pour les convertir en feuilles de calcul Excel. Les données téléchargées de l'UDF en queue du train ont été ajoutées à celles du CEL, ce qui a permis de faire une analyse exhaustive de l'ensemble de ces données.
- 1.2.6 L'équipe d'enquête du BST a également obtenu une copie du rapport type pour le passage à niveau public au point milliaire 117,11 de la subdivision de Moosehead; le rapport confirmait l'activation de la signalisation et de la protection du passage à niveau. Une compagnie indépendante de passages à niveau s'est occupée d'étalonner l'enregistrement des heures. Cet enregistrement a tenu lieu de référence pour la synchronisation et l'étalonnage des enregistrements horaires téléchargés du CEL. On a procédé à l'analyse exhaustive des enregistrements du CEL, des données de l'UDF et du rapport type pour le passage à niveau au point milliaire 117,11, analyse qui a permis de reconnaître un certain nombre d'événements importants d'intérêt pour aider à l'enquête (LP136/2013).
- 1.3 Services techniques demandés
- 1.3.1 L'analyse des données du CEL et l'enquête sur les lieux ont révélé que, quelques minutes après l'arrêt du moteur de la locomotive de tête MMA 5017, la pression dans la conduite générale (CG) a commencé à diminuer au rythme d'environ 1 lb/po² la minute. Huit minutes plus tard, la pression dans le cylindre de frein ` (CF) direct (pression CFD) a commencé elle aussi à diminuer au même rythme que la pression dans la conduite générale.
- 1.3.2 Le train MMA-002 a commencé à dériver à 0 h 58 mi 21 s, la pression CG ayant chuté à 32 lb/po² et la pression CFD à 27 lb/po². Le levé sur le terrain a déterminé que le train se trouvait dans une pente moyenne de 0,92 % (figure 3). Les efforts de freinage réels qui s'exerçaient sur le train à ce moment-là devinrent l'une des questions critiques à étudier.

- 1.3.3 Pour déterminer l'état réel du système de freinage, l'équipe d'enquête du BST a effectué un certain nombre d'essais : essais sur le groupe de locomotives et wagons-citernes survivants; essai de simulation sur un train similaire; examen de la robinetterie du frein à air et du bleuissement des roues; essai supplémentaire du frein à main sur le frein à air sur d'autres véhicules. Les essais effectués par le BST au cours d'enquêtes précédentes ont également été examinés et utilisés pour la présente enquête. On a demandé au Laboratoire d'ingénierie du BST de participer aux essais et à l'analyse des efforts de freinage.
- 1.3.4 Le présent projet de laboratoire porte sur trois de ces essais : l'essai sur le groupe de locomotives à Vachon, l'essai sur les wagons-citernes survivants à Farnham et l'essai supplémentaire du frein à main sur le frein à air au triage Taschereau (Montréal). Le présent rapport résume les résultats des essais, calcule le nombre minimum de freins à main nécessaires et discute des effets de certaines variables.

2.0 SYSTÈME DE FREINAGE D'UN TRAIN

2.1 Freins à air d'un train

- 2.1.1 Un compresseur équipant chaque locomotive en activité alimente en air le système de freinage du train. L'air est emmagasiné dans chacun des réservoirs principaux de la locomotive à une pression d'environ 125 à 140 lb/po². Une soupape d'alimentation maintient la pression dans la conduite générale à une valeur approximative de 90 lb/po². La conduite générale s'étend sur toute la longueur du train et est raccordée par des boyaux aux deux extrémités de chaque locomotive et de chaque wagon. Chaque wagon est équipé de son propre système de freinage : cylindre de frein, semelles de frein, réservoir d'air auxiliaire, réservoir d'air d'urgence et autres composants connexes. Le réservoir auxiliaire fournit l'air nécessaire au serrage du frein automatique, tandis que le réservoir d'urgence fait de même en cas de freinage d'urgence. Les deux réservoirs sur le wagon sont reliés par un distributeur et réalimentés par la conduite générale.
- 2.1.2 Quand il doit freiner, le mécanicien de locomotive (ML) manœuvre la poignée du frein automatique sur le poste de conduite; cette action permet de réduire la pression d'air dans la conduite générale. Quand le distributeur détecte une différence de pression suffisante dans la conduite générale, les freins sont actionnés (semelles de frein appliquées contre les roues).
- 2.1.3 Comme le montre la figure 4, chaque locomotive est équipée aussi d'un frein direct qui s'ajoute au système de frein à air du wagon. Ce frein direct, également alimenté en air par le réservoir principal, n'est utilisé que sur les locomotives. Le frein direct est commandé par le robinet de frein direct situé sur le poste de conduite. Ce système de freinage n'est généralement pas utilisé au cours de la marche d'un train; il sert principalement de frein de stationnement. Quand le frein direct est serré, il injecte dans le cylindre de frein une pression d'air pouvant atteindre 75 lb/po² environ, qui entraîne alors l'application des semelles de frein contre les roues de la locomotive.
- 2.1.4 Quand le moteur des locomotives est arrêté, les compresseurs s'arrêtent aussi de fonctionner et ne fournissent plus d'air au train. De nombreux raccords à l'intérieur du train et des locomotives ont tendance à laisser fuir l'air. Par

conséquent, quand le moteur des locomotives est arrêté, il est normal que la pression dans les réservoirs principaux finisse par baisser. Une fois que cette pression s'égalise avec celle de la conduite générale, les deux pressions commencent à diminuer au même rythme. Ce phénomène se produit également quand les deux pressions atteignent la même valeur que la pression dans le cylindre de frein. À mesure que baisse cette dernière, l'effort de freinage exercé sur les roues de la locomotive par le frein direct diminue. À terme, si le circuit n'est pas réalimenté en air, les freins se desserrent.

2.1.5 Les Instructions générales d'exploitation (IGE) des compagnies ferroviaires comportent des dispositions qui exigent l'arrêt du train et la réalimentation de son circuit de frein quand la pression dans la conduite générale chute à 48 lb/po². On ne peut pas se fier à une pression inférieure à 40 lb/po² dans la conduite générale pour déclencher un freinage d'urgence ou compensateur.

2.2 Freins à main d'un train

2.2.1 Toutes les locomotives et le matériel remorqué sont équipés d'un frein à main, dispositif mécanique permettant d'appliquer les semelles de frein contre la table de roulement des roues pour empêcher celles-ci de bouger ou pour retarder leur mouvement (figure 5). Parmi les composants d'un frein à main se trouve, reliée à la timonerie de frein, une chaîne qui applique les semelles de frein sur le matériel une fois qu'elle est tendue.

2.2.2 L'efficacité des freins à main dépend de plusieurs facteurs :

- l'effort exercé par la personne serrant le frein à main, effort qui peut varier grandement d'un agent à l'autre;
- la lubrification du système d'engrenage du frein à main;
- le réglage des balanciers.

2.3 Vérification de l'efficacité des freins à main

2.3.1 Pour s'assurer que les freins à main serrés sur un train sont suffisants pour empêcher toute dérive, les équipes sont tenues d'en vérifier l'efficacité. Cette vérification consiste à :

- desserrer tous les freins à air après le serrage des freins à main;
- laisser le jeu des attelages s'ajuster ou tenter de déplacer légèrement les wagons pour s'assurer qu'ils ne bougeront pas.

2.3.2 Si on ne peut pas déplacer les wagons, les freins à main sont jugés suffisants; dans le cas contraire, d'autres freins à main doivent être serrés jusqu'à la réussite d'une vérification de leur efficacité.

2.3.3 Pour certaines compagnies ferroviaires au Canada, dont la MMA, les instructions spéciales permettent d'inclure les freins à main sur le groupe de locomotives dans le nombre minimum de freins à main à serrer. Par exemple, si ces instructions exigent de serrer au moins 10 freins à main et si le train compte 4 locomotives, il ne faut alors serrer que 6 freins à main sur le matériel remorqué, en plus de ceux serrés sur les locomotives.

2.4 Freins à main sur les locomotives

2.4.1 Pour les locomotives, la Federal Railroad Administration (FRA) exige que les freins à main puissent retenir une locomotive sur une déclivité de 3 %. Cela équivaut à un coefficient de freinage (rapport entre l'effort exercé sur les semelles de frein et la charge brute) de 10 %, à un coefficient de frottement de 0,3. Il n'y a aucune exigence pour une locomotive de retenir tout autre matériel avec son frein à main serré. Sur de nombreuses locomotives, dont celles du présent événement, seules 2 de leurs 12 semelles de frein sont appliquées sur les roues quand le frein à main est serré. La FRA exige l'inspection du frein à main ou du frein de stationnement (sur les locomotives qui en sont équipées) ainsi que de ses pièces et raccords au moins tous les ans ou quand des réparations sont nécessaires.

2.5 Frein à main sur les wagons

2.5.1 Selon la norme S-401 du Manual of Standards and Recommended Practices (MSRP) de l'Association of American Railroads (AAR), pour obtenir un effort de freinage adéquat sur le matériel remorqué, l'effort exercé sur les roues par les semelles de frein doit être égal à au moins 10 % de la charge brute du wagon quand un effort à la chaîne désigné est appliqué. L'extrémité du wagon où se trouve le frein à main est désignée de bout B. Quand les freins à main sont serrés, toutes les semelles de frein du wagon, au nombre de 8, sont normalement appliquées sur ses roues.

2.6 Valve de purge rapide

2.6.1 Trois locomotives dans le groupe de traction, dont la locomotive de tête MMA 5017, étaient des modèles C30-7 de GE mises en service en 1979. Ces locomotives sont équipées d'un moteur diesel suralimenté quatre-temps à 16 cylindres qui développe une puissance de 3 000 hp. La MMA 5017 comptait 2 bogies à trois essieux moteurs. Elle transportait 4 000 gallons de carburant, 365 gallons de liquide de refroidissement et 380 gallons d'huile moteur (huile de graissage). Elle était dotée d'un système de freins à air de type 26-L. Le poids global de la MMA 5017 était d'environ 195 tonnes.

2.6.2 Sur les locomotives C30-7 de GE, le cylindre de frein sur l'essieu soumis à l'action du frein à main est équipé d'une valve de purge rapide. Celle-ci se déclenche au cours du serrage des freins à main par la chaîne du frein. Une fois déclenchée, la valve de purge rapide vide le cylindre de frein de son air et applique les semelles de frein sur les deux roues qui relèvent du frein à main considéré. Pour s'assurer que le frein à main demeure fonctionnel sur ces locomotives, la MMA a émis le bulletin d'exploitation récapitulatif 2-276, qui se lisait en partie comme suit (traduction) :

- (U) Locomotives C30-7 à six essieux équipées de valves de purge rapide des séries 5000, 3000 et 3600 :

Le frein à main ne peut pas être serré si l'air du cylindre de frein R2 n'est pas évacué à l'atmosphère. La chaîne du frein à main se met en tension et il peut sembler que le frein à main est serré; cependant, si le piston du cylindre de frein R2 est

sorti, c'est que le frein à main n'est pas serré. Sur les locomotives C-30-7, si on n'entend aucun échappement d'air pendant le serrage du frein à main, il est possible que la valve de purge rapide fonctionne mal ou qu'elle soit déréglée.

On peut actionner manuellement cette valve depuis le sol, sur le côté droit de la locomotive. La valve de purge rapide et sa poignée sont directement adjacentes à la chaîne du frein à main, qui est montée sur le dessus du bogie avant entre les essieux 2 et 3. Un membre de l'équipe peut déclencher manuellement la valve au moyen de son levier. Une fois la valve de purge rapide déclenchée, la chaîne du frein à main doit être immédiatement remise en tension.

3.0 ESSAIS DE FREIN SUR LE GROUPE DE LOCOMOTIVES DE L'ÉVÉNEMENT

3.1 Description des essais

3.1.1 Des essais de frein à air et à main ont été effectués sur le groupe de locomotives de l'événement. On a déplacé les locomotives du train MMA-002 vers la voie d'évitement à Vachon pour les soumettre à un examen et à des essais. Des spécialistes de Wabtec ont été invités à participer aux essais. L'examen et les essais comprenaient:

- un essai d'étanchéité des freins dans tout le groupe de locomotives;
- une évaluation complète du système de freinage de chaque locomotive;
- des essais de l'effort aux semelles de frein.

3.1.2 Le premier essai a déterminé que, à partir d'un circuit de frein complètement alimenté, des fuites d'air avaient fait baisser la pression dans le cylindre de frein à 27 lb/po² en 1 heure et 6 minutes.

3.1.3 Le deuxième essai a évalué la performance de freinage de chaque locomotive et de ses composants; cet essai est résumé dans la prochaine section.

3.1.4 Les essais de l'effort aux semelles de frein avaient pour but de mesurer l'effort exercé par les semelles de frein (E_{sf}) sous différents serrages des freins à air ou à main. L'effort retardateur de freinage E_r est le produit de l'effort aux semelles de frein par le coefficient de frottement f entre la table de roulement et les semelles de frein :

$$E_r = E_{sf} * f$$

3.1.5 Le coefficient de frottement entre la table de roulement des roues et les semelles de frein est lié à l'état des surfaces en contact et à la vitesse. La figure 6 représente une courbe expérimentale du frottement et de la vitesse. Dans des conditions normales, le coefficient de frottement moyen est d'environ 0,315 pour une plage de vitesses allant de 0 à 100 mi/h. Selon l'expérience tirée des essais effectués par Wabtec, on se sert normalement du coefficient de frottement moyen

- de 0,38 pour évaluer l'effort retardateur à l'état stationnaire à partir de l'essai de l'effort aux semelles de frein.
- 3.1.6 Les efforts aux semelles de frein sont mesurés à l'aide de trousse de mesure de conception et de fabrication spéciales. Les essais Golden Shoe, Jim Shoe et Smart Shoe sont les plus couramment utilisés sur le marché. Pour les essais effectués dans le cadre de la présente enquête, le BST a utilisé principalement le système d'essai Smart Shoe (figure 7). Sur le fourgon VB-1, on a utilisé une trousse d'essai Jim Shoe, dont la plage de mesures cependant s'est révélée insuffisante pour les essais sur les locomotives et les wagons-citernes. Les systèmes Golden Shoe et Jim Shoe font appel à des capteurs à compression (figure 8), tandis que le système d'essai Smart Shoe utilise des capteurs à jauge réglable mesurant la contrainte de flexion pour améliorer la précision. Le système Smart Shoe peut enregistrer les relevés dans des fichiers textes électroniques.
- 3.1.7 Une trousse d'essai Smart Shoe comprend 4 ou 8 capteurs qui remplacent les semelles de frein et mesurent la force de la pression (effort aux semelles de frein) exercée sur la table de roulement des roues par le piston du cylindre du frein à air ou la chaîne du frein à main. Les capteurs sont reliés à un amplificateur et à un moniteur intégrés (figure 9) qui captent les efforts à la semelle de frein s'exerçant sur chaque roue. On additionne les relevés pour calculer l'effort total aux semelles de frein et le coefficient de freinage sur le véhicule testé.
- 3.1.8 On insère un capteur pour mesurer l'effort à la chaîne, qui constitue un indice de base dans le cadre de l'essai du frein à main. Simultanément, le couple de serrage exercé sur le volant du frein à main est également mesuré au moyen d'un appareil de mesure de plages (plagemètre), représenté à la figure 10, doté d'une échelle de couples de serrage.
- 3.2 Examen du système de freinage
- 3.2.1 L'examen et l'essai complets du système de freinage ont évalué la performance de freinage de chaque locomotive et de ses composants. Les résultats des essais sont résumés dans les prochains paragraphes.
- 3.2.2 MMA 5017
- Des fuites d'air excessives provenaient du réservoir principal, de son clapet de non-retour et de la tuyauterie de frein sur les deux bogies de la locomotive.
 - Les fuites d'air sur le bogie arrière étaient trop importantes pour être vérifiées.
 - Une quantité excessive d'air s'échappait de la soupape de sécurité du compresseur, entraînant ainsi une perte d'air dans le réservoir d'air principal n° 1.
 - Le robinet de commande de la cloche fuyait, provoquant aussi une perte d'air dans le réservoir d'air principal n° 1.
 - Une quantité excessive d'air s'échappait du détendeur N1, produisant une perte d'air dans le réservoir principal n° 2.
- 3.2.3 MMA 5026
- Des fuites mineures d'air provenaient du réservoir principal, de la conduite générale et de la conduite 20.

- Le bogie avant a perdu tout son air en 4 minutes.

3.2.4 CITX 3053

- Des fuites mineures d'air provenaient du réservoir principal.
- Dans la position fermée, le robinet d'isolement sur le bogie avant laissait échapper par son évent une quantité excessive d'air.
- La bille dans le robinet d'isolement se trouvait à 180 degrés de sa position de fonctionnement, ce qui entraînait une perte d'air par le côté de la locomotive et non du bogie.

3.2.5 MMA 5023

- Des fuites d'air mineures provenaient du réservoir principal, du clapet de non-retour des réservoirs principaux, de la conduite générale et de la conduite 20.
- Le bogie avant a perdu 30 lb/po² d'air en 5 minutes.

3.2.6 CEFX 3166

- Des fuites mineures d'air provenaient du réservoir principal et de la conduite 20.
- Des fuites excessives d'air provenaient du clapet de non-retour des réservoirs principaux et des deux bogies.
- Le régulateur du dispositif de locomotive morte laissait échapper par son évent une quantité excessive d'air, entraînant une perte de pression dans le réservoir principal n° 2.

3.2.7 En raison des fuites excessives constatées au cours de l'essai sur plusieurs appareils de robinetterie de frein dans le groupe de locomotives, 4 de ces appareils et la valve de purge rapide ont été retirés pour faire l'objet d'un examen plus approfondi par le BST (rapport LP185/2013 du Laboratoire d'ingénierie).

3.3 Résultats de l'essai de l'effort aux semelles de frein

3.3.1 Deux trousse Smart Shoe et une trousse Jim Shoe ont été utilisées pour l'essai. La trousse Jim Shoe n'a été utilisée que sur le fourgon VB-1, à cause de sa plage limitée de mesures de l'effort aux semelles.

3.3.2 Des employés de Wabtec commandaient l'unité d'affichage des trousse d'essai et lisaient les valeurs indiquées. Des employés du BST ont consigné les relevés et traité les données pour calculer les coefficients de freinage.

3.3.3 Le groupe de locomotives testées comprenait la MMA 5017, le fourgon VB-1 ainsi que les MMA 5026, CITX 3053, MMA 5023 et CEFX 3166, dans l'ordre où ce matériel se trouvait lors de l'événement. Le VB-1 est un fourgon de télécommande muni d'un régulateur de pression de cylindre pour changer la pression du frein direct (FD) provenant des locomotives.

3.3.4 Le tableau 1 présente un résumé des résultats de l'effort d'essai aux semelles, tandis que le tableau 2 indique les coefficients de freinage calculés.

Tableau 1: Résumé des efforts mesurés aux semelles de frein au cours de l'essai à Vachon

Frein à air	CF (lb/ po ²)	MMA 5017	MMA VB-1	MMA 5026	CITX 3053	MMA 5023	CEFX 3166	E _{sf total}	E _{r total}
FD à fond	72	146079	5792	145977	101931	141599	115891	657269	249762
Serrage normal à fond	55	111250	4151	120573	86159	113234	99715	535082	203331
Coefficient de freinage de base	50	100005	3745	99873	79195	104758	89988	477564	181474
Début du mouvement	27	57350	2993	62765	50725	62754	61659	298246	113333
Frein à main	C (lb- pi)	MMA 5017	MMA VB-1	MMA 5026	CITX 3053	MMA 5023	CEFX 3166	E _{sf total}	E _{r total}
faible puissance	60	7232	6596	7944	10002	8297	9210	49281	18727
puissance normale	80	9209	9419	10085	13795	10556	13686	66750	25365
grande puissance	100	11731	11509	12716	18202	13526	17443	85127	32348
puissance extrême	150	18485	15714	16253	26071	18765	24479	119767	45511
capacité selon les essais AAR	200	23174	21653	20414	33551	24531	31881	155204	58978

Tableau 2: Résumé des coefficients de freinage mesurés au cours de l'essai à Vachon

Frein à air	CF (lb/ po ²)	MMA 5017	MMA VB-1	MMA 5026	CITX 3053	MMA 5023	CEFX 3166
FD à fond	72	37,5 %	9,7 %	37,4 %	26,4 %	36,3 %	29,6 %
Serrage normal à fond	55	28,5 %	6,9 %	30,9 %	22,3 %	29,0 %	25,4 %
Coefficient de freinage de base	50	25,6 %	6,2 %	25,6 %	20,5 %	26,9 %	23,0 %
Début du mouvement	27	14,7 %	5,0 %	16,1 %	13,1 %	16,1 %	15,7 %
Frein à main	C (lb- pi)	MMA 5017	MMA VB-1	MMA 5026	CITX 3053	MMA 5023	CEFX 3166
faible puissance	60	1,9 %	11,0 %	2,0 %	2,6 %	2,1 %	2,3 %
puissance normale	80	2,4 %	15,7 %	2,6 %	3,6 %	2,7 %	3,5 %
grande puissance	100	3,0 %	19,2 %	3,3 %	4,7 %	3,5 %	4,4 %
puissance extrême	150	4,7 %	26,2 %	4,2 %	6,8 %	4,8 %	6,2 %
capacité selon les essais AAR	200	5,9 %	36,1 %	5,2 %	8,7 %	6,3 %	8,1 %

- 3.3.5 Les relevés de la pression des freins à air en général étaient plus stables et plus convergents, tandis que ceux relatifs aux freins à main affichaient des écarts plus importants. Comme il est difficile d'appliquer et de maintenir un couple de serrage (C) comparativement à un cylindre de frein (CF), la mesure des couples de serrage est moins précise que celle de l'effort à la chaîne.
- 3.3.6 Tous les coefficients de freinage des freins à main des locomotives, mesurés au couple d'essai le plus élevé de 200 livres-pieds, étaient inférieurs au pourcentage prescrit de 10 %, ceux des locomotives CITX 3053 et CEFX 3166 s'en approchant le plus.
- 3.3.7 Le coefficient de freinage du frein à main du fourgon VB-1 était beaucoup plus élevé que ceux des locomotives, mais son frein à air présentait un coefficient de freinage inférieur à celui des locomotives.
- 3.3.8 Trois locomotives dans le groupe étaient équipées de la valve de purge rapide montrée à la figure 11. La valve de purge rapide sur la deuxième locomotive (la MMA 5026) a été jugée défectueuse, tandis que celle des deux autres fonctionnait normalement. Lors du serrage du frein à main, la valve de purge rapide de la MMA 5026 n'a pas évacué l'air du cylindre de frein. Dans cette situation, le frein à main n'aurait exercé aucun effort si la valve de purge rapide n'avait pas été déclenchée manuellement.
- 3.3.9 Le tableau 3 indique la boucle d'essai enregistrée sur la MMA 5026 et montrant le mauvais fonctionnement de la valve de purge rapide.

Tableau 3: Efforts mesurés aux semelles de frein indiquant une défaillance de la valve de purge rapide sur la locomotive MMA 5026

CF + couple	E_c	R2	R3	Somme	BR	Commentaires
CFD72+C0	0	11649	10450	22099	5,7 %	FD seulement, E_{sf} sur deux roues
FD+C195	3580	12264	12047	24311	6,2 %	Air du CF non évacué par la valve de purge rapide
CF50+C195	2591	9285	8448	17733	4,5 %	Pression CF réduite par le ML
CF27+C195	1430	5278	4701	9979	2,6 %	
CF0+C195	37	33	69	102	0,0 %	FàM totalement perdu
FD serré à nouveau	2591	13415	11745	25160	6,5 %	
Remarque : E_c désigne l'effort à la chaîne et BR (<i>brake ratio</i>), le coefficient de freinage. Conclusion : Comme la valve de purge rapide était inopérante, le frein à main (FàM) aurait été desserré en cas d'évacuation de l'air du cylindre de frein (CF).						

- 3.3.10 La boucle d'essai du frein à air a été conçue selon la séquence suivante : FD-CF72->serrage normal à fond : CF55->début du mouvement : CF27, puis remontée de la pression à CF50. Cette boucle d'essai a permis de simuler la chute de pression d'air lors de l'événement et de vérifier le relevé de base sur la

séquence d'augmentation de la pression. La boucle a bien fonctionné, sauf sur les bogies avant des locomotives CITX 3053 et CEFX 3166.

- 3.3.11 L'effort mesuré aux semelles de frein des deux bogies avant a bloqué au cours de la chute de la pression CFD, qui est passée de 72 à 55 lb/po². Au cours d'une boucle d'essai réalisée sur la locomotive CITX 3053, les efforts mesurés aux semelles de frein à la pression CF55 étaient sensiblement différents sur la séquence chute-montée (se reporter au tableau 4).

Tableau 4: Relevés anormaux à la pression CF55 sur la séquence chute-montée

	L1	L2	L3	R1	R2	R3	Total	BR
CFD72	9223	8963	7780	8931	9339	7844	52080	27,0 %
CF55	8915	8770	7900	8260	9166	7909	50920	26,4 %
CF27	4337	4592	4283	4414	4939	4290	26855	13,9 %
CF50	7091	6858	6201	7076	7286	6161	40673	21,1 %
CF55	7600	7417	6667	7498	7834	6625	43641	22,6 %
CF72	9165	9034	7950	8922	9258	7790	52119	27,0 %

- 3.3.12 Une boucle d'essai sur la CEFX 3166 (tableau 5) a montré que le blocage de l'effort s'est poursuivi à une pression inférieure à 40 lb/po² dans le cylindre de frein (CF40), mais les relevés de l'effort aux semelles à la pression CF27 sont demeurés très proches sur les séquences ascendantes et descendantes. On s'est servi d'une boucle d'essai de remplacement (bogie avant FD72 ->CF27 ->CF50 ->CF55) pour empêcher ce blocage lors de l'essai des deux bogies avant. Tous les autres essais ont conservé la boucle d'essai théorique.

Tableau 5: Différents relevés sur la séquence d'essai théorique et la séquence d'essai de remplacement

	L1	L2	L3	R1	R2	R3	Total	BR	BR de l'essai de réf.
CFD72	11383	9280	9966	9223	10443	8026	58321	29,8 %	29,6 %
CF55	11031	8667	9295	9102	10152	8022	56269	28,7 %	25,4 %
CF50	10164	8048	8607	8561	9502	7587	52469	26,8 %	23,0 %
CF45	9296	7500	7968	8039	8800	7185	48788	24,9 %	
CF40	8289	6759	7144	7290	7808	6557	43847	22,4 %	
CF35	7397	6128	6399	6622	6886	5944	39376	20,1 %	
CF27	5764	4959	5037	5380	5300	4786	31226	15,9 %	15,7 %

- 3.3.13 On ne connaît pas la raison de ce blocage de l'effort aux semelles de frein au cours de la chute de la pression CFD. Cependant, un tel blocage n'a aucune incidence sur l'analyse de la dérive qui a commencé à la pression de 27 lb/po² dans le cylindre de frein (CF27).
- 3.3.14 Un examen de l'effort mesuré aux semelles de frein produit par le groupe de locomotives et le fourgon VB-1 avec les freins à air et à main a conclu ce qui suit :

- Si on suppose un coefficient de frottement de 0,38, l'effort retardateur total produit par le frein direct (FD) serré à fond sur le groupe de locomotives et le fourgon VB-1 était de 249 762 livres.
- Si on suppose un couple de serrage de 100 livres-pieds et un coefficient de frottement de 0,38, l'effort retardateur total produit par les freins à main du groupe de locomotives et le fourgon VB-1 s'élevait à 32 348 livres.
- Avec le frein direct serré à fond, l'effort retardateur était suffisant pour garder le train à l'arrêt.
- L'effort de freinage pour le frein direct serré à 27 lb/po² a été réduit à environ 45 % de celui d'un frein direct serré à fond.
- Le coefficient de freinage moyen pour les freins à main des locomotives serrés à un couple de 100 livres-pieds était d'environ 3,8 %.
- Le coefficient de freinage pour le fourgon VB-1 à un couple de serrage de 100 livres-pieds était de 19,2 %.

4.0 ESSAI DE FREIN SUR LES WAGONS-CITERNES SURVIVANTS

4.1 Description des essais

4.1.1 Les 9 wagons-citernes non déraillés du train MMA-002 ont été remorqués jusqu'à Farnham pour y subir des essais de frein à air et à main. On a également envoyé à Farnham et installé sur un wagon-citerne le volant du frein à main du wagon couvert tampon afin d'obtenir la particularité de ce wagon quant à son frein à main. Comme le frein à air sur les wagons-citernes a été desserré avant la dérive, on a procédé à des essais de ce frein seulement sur deux wagons-citernes afin d'examiner les coefficients de freinage. Les essais se sont concentrés sur les freins à main des wagons-citernes survivants et du wagon couvert simulé.

4.1.2 Comme pour les essais sur le groupe de locomotives, et afin de mesurer les efforts aux semelles de frein, on a utilisé pour les essais de frein à air et à main des trousse Smart Shoe, mais aucune trousse Jim Shoe, Pour l'essai de frein à air, on s'est servi d'une trousse d'essai de frein sur wagon individuel (figure 12). Les essais de frein à air ont été exécutés à un serrage minimum (dépression de 6-7 lb/po² dans la CG) et à un serrage normal à fond. Deux boucles d'essai ont été appliquées sur chaque wagon et les efforts aux semelles de frein mesurés à la pression d'égalisation en serrage normal et à l'état enveloppé, respectivement. Les coefficients de freinage ont été calculés, puis on en a fait la moyenne.

4.1.3 L'essai des freins à main s'est déroulé à un certain nombre de couples de serrage dans la gamme normale des efforts humains et à la limite de capacité établie pour les essais de frein à main de l'AAR. On a examiné la plaque signalétique de la timonerie de frein et calculé l'effort théorique aux semelles de frein. L'effort mesuré aux semelles de frein a été enregistré et comparé à l'exigence de l'AAR en la matière.

4.2 Examen et essai du système de frein à air

4.2.1 Les spécialistes de Wabtec ont aidé à l'examen du système de frein à air et à l'exécution de l'essai sur wagon individuel. Cet examen a révélé ceci :

- l'équipement de frein sur les wagons-citernes fonctionnait et satisfaisait aux exigences de l'AAR;
- deux des wagons-citernes ont fait l'objet d'un essai de frein à air sur wagon individuel; les deux wagons-citernes ont réussi le test.

4.2.2 Le tableau 6 indique pour le frein à air les efforts aux semelles et les coefficients de freinage mesurés.

Tableau 6: Résumé des résultats des essais de frein à air

Wagon n°	Serr. min. (6-7)		SERRAGE NORMAL À FOND				
	CF	E _{sf}	CF	ÉG serr norm		Enveloppé	
	CF	E _{sf}	CF	E _{sf}	BR	E _{sf}	BR
NATX 310406	8,4	2602	63,6	25380	9,7 %	27315	10,4 %
			63,6	25294	9,6 %	27285	10,4 %
Inférieur à la moyenne				25337	9,6 %	27300	10,4 %
WFIX 130629	8,4	1441	63,5	20754	7,9 %	23973	9,1%
			63,6	21483	8,2%	23981	9,1%
Inférieur à la moyenne				21119	8,0 %	23977	9,1%
Moyenne			63,6	23228	8,8 %	25639	9,7 %

4.3 Résultats des essais de frein à main

- 4.3.1 Les efforts mesurés aux semelles de frein sont résumés et indiqués dans le tableau 7, avec les efforts à la chaîne E_c ou les couples de serrage appliqués.
- 4.3.2 Les cas de EVc 3350, sauf pour le wagon ACFX 73452H, reflétaient les résultats obtenus à un effort vertical à la chaîne de 3350 livres, soit l'effort d'essai défini pour le coefficient de freinage (BR) prescrit par l'AAR à l'égard des freins à main de type N. Les coefficients de freinage mesurés correspondants étaient supérieurs à la valeur de 10 % prescrit par l'AAR, sauf pour le wagon PROX 44211, dont le coefficient était de 8,2 %. La valeur de 8,2 % était supérieure au coefficient de freinage à main requis de 6,5 % pour les wagons usés en service.
- 4.3.3 Les couples de serrage appliqués correspondant à l'effort vertical d'essai défini de 3350 livres qui s'exerce sur la chaîne variaient grandement, de 100 à 150 livres-pieds; cependant, les couples moyens pour 6, 9 et 10 wagons étaient respectivement de 127, 123 et 123 livres-pieds, valeurs proches du couple de référence pour les essais AAR, puisqu'un effort d'essai de 125 livres est appliqué sur l'extérieur du volant du frein à main dans la norme S-401 du MSRP. Ces résultats non seulement confirmaient la validité de la relation entre l'effort vertical à la chaîne de 3350 livres (utilisé comme référence pour les essais) et le couple de 125 livres-pieds, mais aussi démontraient la grande variation de la plage de couples de serrage. Selon l'expérience du BST, fondée sur un certain nombre d'essais de frein à main antérieurs, il est difficile pour un travailleur normal sur le terrain d'atteindre le couple de référence de 125 livres-pieds. Il est probable qu'un travailleur normal serre un frein à main dans la plage de couples 80-100 livres-pieds.

Tableau 7: Résumé des résultats des essais de frein à main sur les wagons-citernes survivants

Wagon n°	EV _c 3350			C60			C80		
	C	E _{sf}	BR	E _c	E _{sf}	BR	E _c	E _{sf}	BR
NATX 310406	125	31683	12.0%	1525	13630	5,2 %	2080	18727	7,1 %
NATX 310425	125	29127	11.1%	1105	11226	4,3 %	2165	20885	7,9 %
NATX 310487	110	29585	11.2%	1390	12458	4,7 %	2035	18267	6,9 %
NATX 310533	110	29979	11.4%	1695	14607	5,6 %	2480	21094	8,0 %
NATX 310572	150	28524	10.8%	1535	13374	5,1 %	2055	17607	6,7 %
NATX 310595	140	26656	10.1%	1465	9587	3,6 %	1950	13748	5,2 %
ACFX 73452	125	28487	10.8%	1615	14421	5,5 %	1985	18107	6,9 %
PROX 44211	125	21462	8.2%	1845	12749	4,8 %	2055	15008	5,7 %
WFIX 130629	100	26699	10.2%	2125	14875	5,7 %	2840	20418	7,8 %
WAGON COUVERT	123	29468	11.2%	1467	12907	4,9 %	2188	19444	7,4 %
ACFX 73452H	125	29665	11.3%	1710	11015	4,2 %	2415	15582	5,9 %
Moy 6 NATX	127	29259	11.1%	1453	12480	4,7 %	2128	18388	7,0 %
Moy 9 wag.-cit.	123	28022	10.7%	1589	12992	4,9 %	2183	18207	6,9 %
Moy 10 wagons	123	28167	10.7%	1577	12983	4,9 %	2183	18331	7,0 %
Wagon n°	C100			C150			C200		
	E _c	E _{sf}	BR	E _c	E _{sf}	BR	E _c	E _{sf}	BR
NATX 310406	2530	22459	8,5 %	3940	35578	13,5 %	4530	41398	15,7 %
NATX 310425	2805	24978	9,5 %	4060	35689	13,6 %	5905	54866	20,9 %
NATX 310487	2695	24070	9,2 %	4680	41657	15,8 %	5250	47711	18,1 %
NATX 310533	3185	27084	10,3 %	4445	39230	14,9 %	7450	67991	25,9 %
NATX 310572	2870	24786	9,4 %	3570	30631	11,6 %	5000	44265	16,8 %
NATX 310595	2175	15969	6,1 %	3215	25978	9,9 %	5015	43436	16,5 %
ACFX 73452	2455	22118	8,4 %	3640	31254	11,9 %	5495	47347	18,0 %
PROX 44211	2620	19445	7,4 %	3375	23343	8,9 %	4765	32846	12,5 %
WFIX 130629	3290	23836	9,1%	4510	33627	12,8 %	6255	47348	18,0 %
WAGON COUVERT	2945	26126	9,9 %	4757	41880	15,9 %	5615	48988	18,6 %
ACFX 73452H	2950	19250	7,3 %	4640	29479	11,2 %	6475	38831	14,8 %
Moy 6 NATX	2710	23224	8,8 %	3985	34794	13,2 %	5140	46335	17,6 %
Moy 9 wag.-cit.	2736	22749	8,6 %	3937	32999	12,5 %	5277	44902	17,1 %
Moy 10 wagons	2757	23087	8,8 %	4019	33887	12,9 %	5314	45356	17,2 %
Remarque	<ol style="list-style-type: none"> 1. E_c désigne l'effort à la chaîne, E_{sf} l'effort aux semelles de frein, BR le coefficient de freinage. 2. Tous les cas de EV_c 3350, sauf pour le wagon ACFX 73452H, reflètent les résultats obtenus à un effort vertical à la chaîne de 3350 livres, soit l'effort d'essai défini pour le coefficient de freinage (BR) prescrit par l'AAR à l'égard des freins à main de type N. 3. Le wagon ACFX 73452H représente le cas faisant appel à un effort horizontal à la chaîne de 4700 livres, ce qui équivaut à un effort vertical à la chaîne de 3350 livres. 								

4.3.3 Au couple de serrage de 80 livres-pieds, l'effort moyen mesuré aux semelles de frein pour les 9 wagons-citernes de l'essai était d'environ 18 207 livres. Si on

- suppose un coefficient de frottement de 0,38, l'effort retardateur moyen produit par les freins à main de ces wagons était d'environ 6919 livres par wagon.
- 4.3.4 Au couple de serrage de 100 livres-pieds, l'effort moyen mesuré aux semelles de frein pour les 9 wagons-citernes de l'essai était d'environ 22 749 livres. Si on suppose un coefficient de frottement de 0,38, l'effort retardateur moyen produit par les freins à main de ces wagons était d'environ 8645 livres par wagon.
- 4.4 Couples de serrage mesurés sur les freins à main des véhicules dans le triage de Farnham
- 4.4.1 L'équipe d'enquête du BST a également mesuré les couples de serrage résiduels réels des freins à main des wagons et des locomotives stationnés dans le triage de Farnham. Comme la MMA exploite plusieurs trains dont l'équipe est réduite à 1 agent, il est normal que celui-ci serre les freins à air pour arrêter les wagons, puis serre le frein à main en plus. Les couples de serrage réels ont été mesurés à deux reprises. D'abord avec de l'air dans les cylindres de frein. Puis on a évacué l'air des cylindres de frein et mesuré à nouveau les couples résiduels.
- 4.4.2 Les couples de serrage moyens mesurés se situaient entre 86 et 98 livres-pieds et présentaient une grande variation, ce qui correspondait aux résultats obtenus lors d'enquêtes précédentes du BST. La différence moyenne entre les couples de serrage existants et les couples correspondants après l'évacuation de l'air de freinage était d'environ 25 à 75 livres-pieds. Par conséquent, dans l'analyse du présent rapport, on a utilisé la plage de couples de 80 à 100 livres-pieds pour estimer le nombre minimum de freins à main nécessaires.
- 5.0 ESSAI DU FREIN À MAIN SUR LE FREIN À AIR SUR LES WAGONS-CITERNES**
- 5.1 Description des essais
- 5.1.1 L'expérience et les données de couple mesurées dans le triage de Farnham ont montré qu'en situation de serrage du frein à main sur le frein à air, l'effort résultant aux semelles de frein pouvait différer sensiblement de celui produit par les serrages du frein à main seulement. Comme la MMA exploite plusieurs trains dont l'équipe est réduite à 1 agent, il est normal que celui-ci serre les freins à air pour arrêter les wagons, puis serre le frein à main en plus. Lors de l'événement, selon les enregistrements du CEL, le mécanicien de locomotive a arrêté le train en serrant d'abord le frein automatique au moyen d'une dépression de 13 lb/po², puis les freins à main. Il est possible qu'un tel serrage du frein à main sur le frein à air se traduise par des efforts aux semelles de frein qui diffèrent des efforts mesurés lors de l'essai des freins à main à Farnham. On a donc procédé à un essai supplémentaire pour étudier la différence et modifier l'effort moyen aux semelles de frein fourni par le frein à main utilisé pour l'analyse et l'estimation du nombre minimum de freins à main nécessaires.

- 5.1.2 Cet essai supplémentaire a été réalisé sur un petit nombre de wagons-citernes au triage Taschereau du CN, à Montréal. Ces wagons n'avaient pas été impliqués dans l'accident. L'essai visait à déterminer le rapport entre l'effort aux semelles dans le scénario du frein à main sur le frein à air avec dépression de 13 lb/po², et l'effort aux semelles dans le scénario du frein à main seulement. Ce rapport a pu servir à modifier les résultats des essais menés précédemment sur les locomotives et les wagons-citernes survivants.
- 5.1.3 La méthode et le matériel d'essai étaient identiques à ceux utilisés lors des deux séries d'essais précédentes. La trousse Smart Shoe a servi à mesurer les efforts aux semelles de frein. Chaque essai comportait d'abord une boucle incrémentale serrage-desserrage du frein à main seulement. On a alors serré successivement les freins à air et à main, pour ensuite évacuer l'air. L'effort aux semelles de frein a été mesuré à chacune des étapes de l'essai. L'effort aux semelles de frein après le desserrage du frein à air a été comparé au résultat correspondant obtenu avec le frein à main seulement, puis on a calculé le coefficient d'augmentation.
- 5.1.4 Un essai complet a été effectué sur le wagon-citerne NATX 270035. Dans le cas des wagons TILX 160220 et OLNX 224074, les essais ont porté seulement sur leur bogie du bout B; de plus, à cause des limites de temps et des conditions atmosphériques, il a fallu réduire le nombre de paliers d'essai. La mise en œuvre et la stabilisation de la dépression d'air ont été très difficiles à maîtriser et le processus a pris beaucoup de temps. Cependant, les données fournies par l'essai complet effectué sur le wagon NATX 270035 ont constitué une bonne base pour étendre à tout le wagon les résultats des essais menés sur le bogie du bout B.
- 5.2 Résultats de l'essai du frein à main sur le frein à air
- 5.2.1 Comme une seule trousse d'essai Smart Shoe était disponible, il a fallu effectuer les essais un bogie à la fois, d'où la variation des couples de serrage appliqués. Cette variation était inévitable et difficile à maîtriser, parce que le plagemètre de couples de serrage devait être tenu sur l'engrenage suivant. Quand on a d'abord serré de façon intense les freins à air, le frein à main actionné à un couple de serrage élevé était très serré, et l'engrenage suivant pouvait donner lieu à une grande différence. On a comparé en premier les efforts mesurés aux semelles de frein du bogie aux deux bouts (A et B) du wagon NATX 270035, en utilisant les mêmes couples de serrage du frein à main ou les mêmes freinages depuis le cylindre de frein. Il a été constaté que l'effort mesuré aux semelles de frein au bogie du bout A était d'environ 4 à 6 % plus élevé que celui enregistré au bout B; or, on se serait normalement attendu à ce que, le bout B étant plus proche du frein à main, celui-ci soit le siège d'un effort aux semelles de frein plus intense. D'un autre côté, cette différence inverse était le signe que l'effet des deux bouts, différents l'un de l'autre, sur l'effort mesuré aux semelles de frein était plus petit que les variations causées par la divergence des couples de serrage appliqués aux freins à main. Par conséquent, pour obtenir l'effort aux semelles de frein sur la totalité de chacun des wagons TILX 160220 et OLNX 224074, on a simplement doublé les efforts aux semelles de frein de leur bogie au bout B.
- 5.2.2 La différence entre le mode du frein à main sur le frein à air et le mode du frein à main seulement était liée étroitement au niveau d'application du frein à air. Un serrage minimum du frein à air ne produisait qu'un petit effort aux semelles et

engendrait très peu de différence. Avec l'augmentation de la dépression d'air, la différence est devenue importante. Le coefficient d'augmentation obtenu par un serrage à 13 lb/po² du frein à air, comme ce fut le cas dans l'événement, pouvait atteindre en moyenne environ 1,4 (se reporter au tableau 8). Plus tard, au cours de l'analyse, on utilise ce coefficient d'augmentation moyen pour ajuster les efforts aux semelles de frein exercés sur les véhicules survivants.

- 5.2.3 L'effort aux semelles de frein dans le mode du frein à air sur le frein à main représentait généralement la somme des efforts produits par les deux freins. Une fois le frein à air desserré, la chaîne du frein à main a continué de retenir le balancier et l'effort aux semelles de frein n'a diminué que légèrement. Le coefficient d'augmentation était essentiellement le rapport entre l'effort aux semelles du frein à air et l'effort aux semelles du frein à main.

Tableau 8: Coefficient d'augmentation du frein à main sur le frein à air avec dépression de 13 lb/po²

Scénario	NATX 270035		TILX 160220		OLNX 224074		Coefficient Moyenne
	E _{sf}	Coefficient	E _{sf}	Coefficient	E _{sf}	Coefficient	
FàM C80	21591	1	2321 3	1	2050 6	1	
Air-DCG13	7578	0,351	1094 2	0,471	6739	0,329	
Air+FàM	29378	1,361	3425 9	1,476	3176 8	1,549	
FàM/Air coupé	27776	1,286	3386 2	1,459	3054 3	1,489	1,411
FàM C100	27199	1	2892 5	1	2733 4	1	
Air-DCG13	7661	0,282	1137 6	0,393	6644	0,243	
Air+FàM	34724	1,277	4426 4	1,53	3929 7	1,438	
FàM/Air coupé	33401	1,228	4369 4	1,511	3810 3	1,394	1,378
Remarque	<ol style="list-style-type: none"> DCG13 désigne une dépression de 13 lb/po² dans la conduite générale (CG). FàM C80 et FàM C100 désignent le frein à main aux couples de serrage de 80 et 100 livres-pieds, respectivement. 						

- 5.2.4 À mesure qu'augmentait la pression du frein à air, le coefficient d'augmentation augmentait lui aussi. Le tableau 9 indique les efforts mesurés aux semelles de frein et les coefficients d'augmentation à un serrage avec dépression de 20 lb/po² et à un serrage normal à fond (dépression de 26 lb/po²). Les coefficients d'augmentation moyens pouvaient atteindre une valeur de 1,6 à 1,9 dans le scénario d'une dépression de 26 lb/po². L'essai de serrage normal à fond a été effectué seulement sur le wagon NATX 270035; cet essai a produit un effort aux semelles de frein inférieur à celui des autres wagons. Cependant, son coefficient d'augmentation en serrage normal à fond était, par comparaison, sensiblement supérieur à celui obtenu à la dépression de 20 lb/po².

Tableau 9: Frein à main sur frein à air avec dépression de 20 lb/po² et serrage normal à fond

Scénario	NATX 270035		TILX 160220		OLNX 224074		Moy.	NATX 270035	
	E _{sf}	Coefficient	E _{sf}	Coefficient	E _{sf}	Coefficient	Coefficient	E _{sf}	Coefficient
FàM C80	21591	1	23213	1	20506	1		21591	1
Air-DCG20	14704	0,681	19028	0,82	14956	0,729		18230	0,844
Air+FàM	35191	1,63	53008	2,284	40478	1,974		40302	1,867
FàM/Air coupé	32047	1,484	51992	2,24	38318	1,869	1,864	36446	1,688
FàM C100	27199	1	28925	1	27334	1		27199	1
Air-DCG20	14417	0,53	18066	0,625	15142	0,554		18175	0,668
Air+FàM	40232	1,479	54702	1,891	47296	1,73		44756	1,646
FàM/Air coupé	37282	1,371	53710	1,857	45128	1,651	1,626	41825	1,538
Remarque	1. DCG20 désigne une dépression de 20 lb/po ² dans la conduite générale (CG). 2. FàM C80 et FàM C100 désignent le frein à main aux couples de serrage de 80 et 100 livres-pieds, respectivement.							Serrage normal à fond : dépression de 26 lb/po ²	

5.3 Résultats d'essais précédents dans le cadre de l'enquête d'Hanlon

5.3.1 Le BST a procédé à des essais de frein à main similaires lors d'enquêtes antérieures. Les wagons-tombereaux en cause dans l'accident d'Hanlon en 2012 (R12E0004) [3] ont été soumis à un essai des freins à main et à un essai de résistance au roulement à l'état stationnaire. On a alors mesuré les efforts aux semelles de frein dans les modes suivants : frein à main seulement, freinage d'urgence, frein à main sur frein d'urgence et frein à main après desserrage en freinage d'urgence. Le présent rapport, dans son tableau 10, réutilise et indique les résultats de ces mesures à titre de référence. Les couples de serrage appliqués en mode de frein à main seulement étaient initialement de 85-90 livres-pieds. Les couples de serrage ont augmenté d'environ 20 livres-pieds après le desserrage en freinage d'urgence. Le coefficient d'augmentation de l'effort aux semelles de frein dans le mode du frein à main sur le frein d'urgence pouvait atteindre 3,8.

Tableau 10: Efforts aux semelles de frein mesurés en mode du frein à main sur le frein d'urgence

Essai	CN 199183			CN 199199		
	E _{sf} (lb)	Coefficient	Couple (lb-pi)	E _{sf} (lb)	Coefficient	Couple (lb-pi)
Frein à main seulement	12116	1	85/90	12523	1	85/90
Freinage d'urgence sur frein à main	33611	2,774		31135	2,486	
FàM résiduel après desserrage en freinage d'urgence	9991	0,825		15231	1,216	
Air de freinage d'urgence seulement	33506	2,765		30885	2,466	
Frein à main sur frein d'urgence	51637	4,262		51885	4,143	
FàM résiduel après desserrage en freinage d'urgence	46859	3,868	100/125	47588	3,8	105/110
Remarque	Les couples de serrage ont été mesurés lors de l'essai sur le bogie des bouts A et B, respectivement.					

6.0 ANALYSE

6.1 Efforts retardateurs s'exerçant sur le train qui commence à dériver

- 6.1.1 Le jour de l'événement, le train s'est arrêté dans une pente moyenne de 0,918 %. Le train pesait 10 287 tonnes, ce qui a engendré une force de déclivité de 188 869 livres. Si on suppose que le coefficient de résistance au roulement à l'état stationnaire était d'environ 4,1 livres par tonne, la résistance au roulement pour le train pouvait s'élever à 42 177 livres. Pour empêcher le train de bouger, le frein direct et les freins à main devaient fournir un effort retardateur de 146 692 livres. Les efforts retardateurs exercés sur le train en freinage ont été calculés; ils sont l'objet du tableau 11.
- 6.1.2 Étant donné que la valve de purge rapide sur la MMA 5026 était inopérante, le frein à main de cette locomotive ne produisait aucun effort, mais son frein direct (FD), lui, en exerçait un sur les 12 roues. L'effort exercé par le frein direct sur les autres locomotives était ajusté de 5/6 au moment du serrage de leur frein à main. Sur le fourgon VB-1, l'effort du frein à main a dépassé celui exercé par le frein à air. Pour tenir compte de l'effet du serrage du frein à air à 13 lb/po², on a appliqué le coefficient d'augmentation de 1,4 aux efforts exercés par les freins à main. Si on suppose que le coefficient de frottement était de 0,38, le frein à main contribuait à hauteur de 48 583 livres à l'effort retardateur, et le frein direct serré à fond offrait une contribution potentielle de 215 546 livres; ainsi, au moment où le frein direct a été serré à fond dans le train et les freins à main serrés sur le groupe de locomotives et sur le wagon couvert, l'effort retardateur total était d'environ 264 129 livres, suffisant pour retenir le train dans la pente.
- 6.1.3 À mesure que baissait la pression dans le cylindre de frein direct (pression CFD), l'effort retardateur produit par le frein direct diminuait. Quand la pression CF est tombée à 27 lb/po², la contribution du frein direct à l'effort retardateur a été réduite à 97 472 livres, et l'effort retardateur total à 146 055 livres, soit moins que l'effort retardateur net de 146 692 livres nécessaire pour retenir le train dans la pente. Le train a commencé à dériver.

Tableau 11: Efforts retardateurs exercés par les freins sur le train commençant à dériver

		MMA 5017	MMA VB-1	MMA 5026	CITX 3053	MMA 5023	CEFX 3166	Wagon couvert	Total	E _r
FàA/FàM	CF/C	E _{sf}	E _{sf}	E _{sf}	E _{sf}	E _{sf}	E _{sf}	E _{sf}	E _{sf}	@ f 0,38
	(po ² / lb- pi)	(lb)	(lb)	(lb)	(lb)	(lb)	(lb)		(lb)	(lb)
FD à fond	72	146079	5792	145977	101931	141599	115891		657269	249762
Début du mouvement	27	57350	2993	62765	50725	62754	61659		298246	113333
grande puissance	100	11731	11509	12716	18202	13526	17443	26126	98537	37444
Effort FàM corrigé par 1,4	100	11731	16113	0	25483	13526	24420	36576	127849	48583
FD à fond @ FàM	72/ 100	121733	0	145977	84943	117999	96576		567227	215546
FD + FàM	72/ 100	133464	16113	145977	110425	131525	120996	36576	695076	264129
CF27 @FàM	27/ 100	47792	0	62765	42271	52295	51383		256505	97472
CF27 + FàM	27/ 100	59523	16113	62765	67754	65821	75803	36576	384354	146055
Remarque	<ol style="list-style-type: none"> 1. Valve de purge rapide de la MMA 5026 : inopérante; effort FàM : aucun; FD : sur les 12 roues 2. L'effort du frein à main sur le fourgon VB-1 a dépassé celui l'effort FD. 3. Effort FD ajusté de 5/6 avec FàM serré 4. Effort FàM ajusté de 1,4 sur serrage du frein à air à 13 lb/po² 									

6.2 Nombre minimum calculé de freins à main nécessaires

6.2.1 La réglementation de la FRA et de TC exige de serrer un nombre suffisant de freins à main pour immobiliser un train, indépendamment des freins à air. Un coefficient de résistance au roulement à l'état stationnaire de l'ordre de 4 à 6 livres par tonne aide à empêcher un train de dériver. Cependant, une fois le train en mouvement, le coefficient de résistance au roulement baissait à environ 2,15 livres par tonne. Le fait de calculer le nombre minimum de freins à main nécessaires en excluant toute résistance au roulement constitue une démarche trop prudente, mais la contribution de cette résistance ne devrait pas dépasser 2,15 livres par tonne, ce qui correspond au scénario où le train s'est mis en mouvement à la suite d'une perturbation, mais ne pouvait pas être arrêté par la résistance au roulement à la basse vitesse.

6.2.2 Les efforts mesurés aux semelles de frein dans le cadre des essais ont permis de calculer le nombre minimum de freins à main nécessaires; ce nombre est lié au coefficient de frottement, au serrage-couple de serrage des freins à main et au serrage des freins à air. Les calculs ont porté sur quatre scénarios différents : freins à main seulement, avec et sans les freins à main serrés sur les locomotives; frein à main sur serrage des freins à air à 13 lb/po² (comme cela s'est produit lors de l'événement), avec et sans les freins à main serrés sur les locomotives.

6.2.3 Les données des essais ont révélé que les freins à main sur les wagons-citernes étaient plus forts que ceux serrés sur les locomotives; ces derniers, en effet, ne sont serrés que sur 2 roues, tandis que les freins à main des wagons étaient serrés

sur toutes les roues, au nombre de 8. Par conséquent, si les freins à main des locomotives étaient utilisés, le nombre total de freins à main nécessaires serait plus élevé que si tous les freins à main serrés se trouvaient sur les wagons.

- 6.2.4 Le nombre minimum calculé de freins à main nécessaires sur le train de l'événement est résumé et détaillé au tableau 12.

Tableau 12: Nombre minimum calculé de freins à main nécessaires

Cas	f	Couple des FàM	80	100
Freins à main seulement, y compris ceux du groupe de locomotives (pratique courante dans l'industrie)	0,315	FàM supplémentaires sur les wagons-citernes	24,9	18,9
		Nombre total de FàM	30,9	24,9
	0,38	FàM supplémentaires sur les wagons-citernes	19,9	15
		Nombre total de FàM	25,9	21
	0,45	FàM supplémentaires sur les wagons-citernes	16,2	12
		Nombre total de FàM	22,2	18
Freins à main sur le frein à air serré par une dépression de 13 lb/po ² , y compris les FàM du groupe de locomotives (pratique de la MMA lors de l'événement)	0,315	FàM supplémentaires sur les wagons-citernes	17,5	13,2
		Nombre total de FàM	23,5	19,2
	0,38	FàM supplémentaires sur les wagons-citernes	13,9	10,4
		Nombre total de FàM	19,9	16,4
	0,45	FàM supplémentaires sur les wagons-citernes	11,2	8,2
		Nombre total de FàM	17,2	14,2
Freins à main seulement, sans les FàM du groupe de locomotives (pratique courante dans l'industrie)	0,315	FàM supplémentaires sur les wagons-citernes	28	22,1
		Nombre total de FàM	29	23,1
	0,38	FàM supplémentaires sur les wagons-citernes	23	18,1
		Nombre total de FàM	24	19,1
	0,45	FàM supplémentaires sur les wagons-citernes	19,3	15,1
		Nombre total de FàM	20,3	16,1
Freins à main sur le frein à air serré par une dépression de 13 lb/po ² , sans les FàM du groupe de locomotives (pratique de la MMA lors de l'événement)	0,315	FàM supplémentaires sur les wagons-citernes	19,7	15,5
		Nombre total de FàM	20,7	16,5
	0,38	FàM supplémentaires sur les wagons-citernes	16,1	12,6
		Nombre total de FàM	17,1	13,6
	0,45	FàM supplémentaires sur les wagons-citernes	13,5	10,5
		Nombre total de FàM	14,5	11,5
Remarque	<ol style="list-style-type: none"> 1. Le coefficient de frottement à l'état stationnaire entre la semelle de frein et la roue est de 0,38 dans des conditions normales (source : Wabtec) et de 0,45 quand les surfaces en contact sont particulièrement propres et sèches. 2. Quand les surfaces en contact sont propres et sèches, le coefficient de frottement moyen entre la semelle de frein et la roue est de 0,315 dans la plage de vitesses 0-100 mi/h (selon le manuel). 3. Un coefficient de résistance au roulement de 2,15 livres par tonne est utilisé. 			

7.0 CONCLUSIONS

- 7.1 L'essai d'étanchéité des freins de tout le groupe de locomotives a déterminé que, à partir d'un circuit de frein complètement alimenté, des fuites d'air avaient fait baisser la pression dans les cylindres de frein à 27 lb/po² en 1 heure et 6 minutes.
- 7.2 L'évaluation complète du système de freinage de chaque locomotive a relevé un certain nombre de défauts dans le circuit de frein du groupe de locomotives. Les composants de frein incriminés ont été examinés et testés plus à fond par le BST; ils constituent l'objet du rapport LP185/2013.
- 7.3 La valve de purge rapide sur la deuxième locomotive, la MMA 5026, a été jugée défectueuse; cette défectuosité a empêché le serrage du frein à main sur la MMA 5026 lors de l'événement.
- 7.4 Tous les coefficients de freinage pour les freins à main des locomotives, mesurés au couple d'essai le plus élevé de 200 livres-pieds, étaient inférieurs à 10 %, ceux des locomotives CITX 3053 et CEFX 3166 s'approchant le plus de ce pourcentage.
- 7.5 Le coefficient de freinage du frein à main du fourgon VB-1 était beaucoup plus élevé que celui des locomotives, mais, celui du frein à air, il était inférieur à celui des locomotives.
- 7.6 Les efforts mesurés aux semelles sur le bogie avant des locomotives CITX 3053 et CEFX 3166 ont bloqué au cours de la baisse de 72 à 55 lb/po² de pression CFD, mais l'effort aux semelles n'a pas été perturbé à la pression CF27. On a élaboré une boucle d'essai de remplacement pour éliminer l'effet de ce phénomène de blocage.
- 7.7 Si on suppose un coefficient de frottement de 0,38, l'effort retardateur total produit par le frein direct (FD) serré à fond sur le groupe de locomotives et le fourgon VB-1 était de 249 762 livres.
- 7.8 Si on suppose un couple de serrage de 100 livres-pieds et un coefficient de frottement de 0,38, l'effort retardateur total produit par les freins à main du groupe de locomotives et le fourgon VB-1 s'élevait à 32 348 livres.
- 7.9 Avec le frein direct serré à fond, l'effort retardateur était suffisant pour garder le train à l'arrêt.
- 7.10 L'effort de freinage pour le frein direct serré à 27 lb/po² a été réduit à environ 45 % de celui d'un frein direct serré à fond.
- 7.11 Le coefficient de freinage moyen pour les freins à main des locomotives serrés à un couple de 100 livres-pieds était d'environ 3,8 %.
- 7.12 Le coefficient de freinage pour le fourgon VB-1 à un couple de serrage de 100 livres-pieds était de 19,2 %.
- 7.13 L'équipement de frein sur les wagons-citernes survivants fonctionnait et satisfaisait aux exigences de l'AAR.

- 7.14 Deux des wagons-citernes survivants ont fait l'objet d'un essai de frein à air sur wagon individuel. Les deux wagons-citernes ont réussi le test.
- 7.15 Les coefficients de freinage mesurés sur les wagons-citernes testés sous l'effort vertical à la chaîne de 3350 livres (qui sert de référence pour les essais AAR relatifs aux freins à main de type N) étaient supérieurs au pourcentage de 10 % prescrit par l'AAR, sauf dans le cas du wagon PROX 4421, dont le coefficient de freinage était de 8,2 %. La valeur de 8,2 % était supérieure au coefficient de freinage à main requis de 6,5 % pour les wagons usés en service.
- 7.16 Les couples de serrage appliqués correspondant à l'effort vertical d'essai défini de 3350 livres qui s'exerce sur la chaîne variaient grandement, de 100 à 150 livres-pieds; cependant, le couple moyen était d'environ 125 livres, soit proche du couple de référence pour les essais AAR puisqu'un effort de 125 livres est appliqué sur l'extérieur du volant du frein à main dans la norme S-401 du MSRP.
- 7.17 Au couple de serrage de 80 livres-pieds, l'effort moyen mesuré aux semelles de frein pour les 9 wagons-citernes de l'essai était d'environ 18 210 livres. Si on suppose un coefficient de frottement de 0,38, l'effort retardateur moyen produit par les freins à main de ces wagons était d'environ 6920 livres par wagon.
- 7.18 Au couple de serrage de 100 livres-pieds, l'effort moyen mesuré aux semelles de frein pour les 9 wagons-citernes de l'essai était d'environ 22 750 livres. Si on suppose un coefficient de frottement de 0,38, l'effort retardateur moyen produit par les freins à main de ces wagons était d'environ 8 650 livres par wagon.
- 7.19 Les coefficients de serrage moyens mesurés sur les véhicules stationnés le 29 août 2013 dans le triage de Farnham de la MMA se situaient entre 86 et 98 livres-pieds, avec une grande variation. La différence entre les couples de serrage existants et les couples correspondants après l'évacuation de l'air de freinage variait entre 25 et 75 livres-pieds.
- 7.20 L'effet des deux bouts, différents l'un de l'autre, sur l'effort mesuré aux semelles de frein était plus petit que les variations causées par la divergence des couples de serrage appliqués aux freins à main
- 7.21 La différence entre le mode du frein à main sur le frein à air et le mode du frein à main seulement était liée étroitement au niveau d'application du frein à air. Les coefficients d'augmentation étaient : mineurs dans le cas des serrages minimaux du frein à air; d'environ 1,4 pour les dépressions de 13 lb/po², comme lors de l'événement; de 1,6 à 1,9 pour les dépressions de 20 lb/po² et le serrage normal à fond; et de jusqu'à 3,8 pour les freinages d'urgence.
- 7.22 Quand le frein direct a été serré à fond et les freins à main serrés sur le groupe de locomotives et le wagon couvert, si on suppose un coefficient de frottement de 0,38, le frein à main contribuait à hauteur de 48 580 livres à l'effort retardateur, tandis que la contribution du frein direct serré à fond pouvait s'élever à 215 550 livres. Par conséquent, l'effort retardateur total était d'environ 264 130 livres, suffisant pour retenir le train dans la pente.

- 7.23 Quand la pression a baissé à 27 lb/po² dans le cylindre de frein, la contribution du frein direct à l'effort retardateur a été réduite à environ 97 470 livres, et l'effort retardateur total à quelque 146 060 livres, soit moins que l'effort retardateur net de 146 690 livres nécessaire pour retenir le train dans la pente, le tout sous une résistance au roulement à l'état stationnaire de probablement 4,1 livres par tonne. Le train a commencé à dériver.
- 7.24 Les données des essais ont révélé que les freins à main sur les wagons-citernes étaient plus forts que ceux serrés sur les locomotives; ces derniers, en effet, ne sont serrés que sur 2 roues, tandis que les freins à main des wagons étaient serrés sur toutes les roues, au nombre de 8. Par conséquent, si les freins à main des locomotives avaient été utilisés, le nombre total de freins à main nécessaires aurait été plus élevé que dans la situation où tous les freins à main serrés se trouvaient sur les wagons.
- 7.25 Étant donné les efforts mesurés aux semelles de frein obtenus dans le cadre des essais, le nombre minimum calculé de freins à main nécessaires sur le train de l'occurrence était lié au coefficient de frottement et au serrage des freins à main (couple + freins à air).
- 7.26 Si on suppose un coefficient de frottement de 0,38 dans des conditions normales, on avait besoin le jour de l'événement de serrer au moins 11 autres freins à main sur les wagons-citernes à un couple de 100 livres-pieds, après la dépression de 13 lb/po² dans le frein à air.
- 7.27 Si on suppose un coefficient de frottement de 0,45 dans des conditions particulièrement propres et sèches, on avait besoin le jour de l'événement de serrer au moins 9 autres freins à main sur les wagons-citernes à un couple de 100 livres-pieds, après la dépression de 13 lb/po² dans le frein à air.
- 7.28 Si tous les freins à main étaient serrés sur les wagons à un couple de 100 livres-pieds, le nombre minimum de freins à main sur le train de l'événement, après la dépression de 13 lb/po² dans le frein à air, serait de 14 dans des conditions de frottement normales, et de 12 quand les surfaces en contact sont particulièrement propres et sèches.
- 7.29 Selon la pratique courante de l'industrie de s'en remettre aux seuls freins à main, on avait besoin, dans des conditions normales, de serrer au moins 15 autres freins à main sur les wagons-citernes à un couple de 100 livres-pieds.
- 7.30 Si tous les freins à main étaient serrés sur les wagons à un couple de 100 livres-pieds, le nombre minimum de freins à main sur le train de l'événement, sans contribution du frein à air, serait de 20 pour un coefficient de frottement normal, et de 17 quand les surfaces en contact sont particulièrement propres et sèches.

8.0 DOCUMENTS DE RÉFÉRENCE

- [1]. William H. Hay, Railroad Engineering, John Wiley & Sons Inc; ISBN: 0471364002.

- [2]. Paul Rhine, Locomotive Engineering Guide to Fuel Conservation, Simmons-Boardman Books, Inc. 1996; ISBN: 0911382178.
- [3]. D. Chen, Brake Force Analysis, CN Freight Train, A-459-51-16, Date of Occurrence: 18-Jan-2012, TSB LP report LP021/2012, Ottawa.



Figure 1: Vue aérienne du site du déraillement

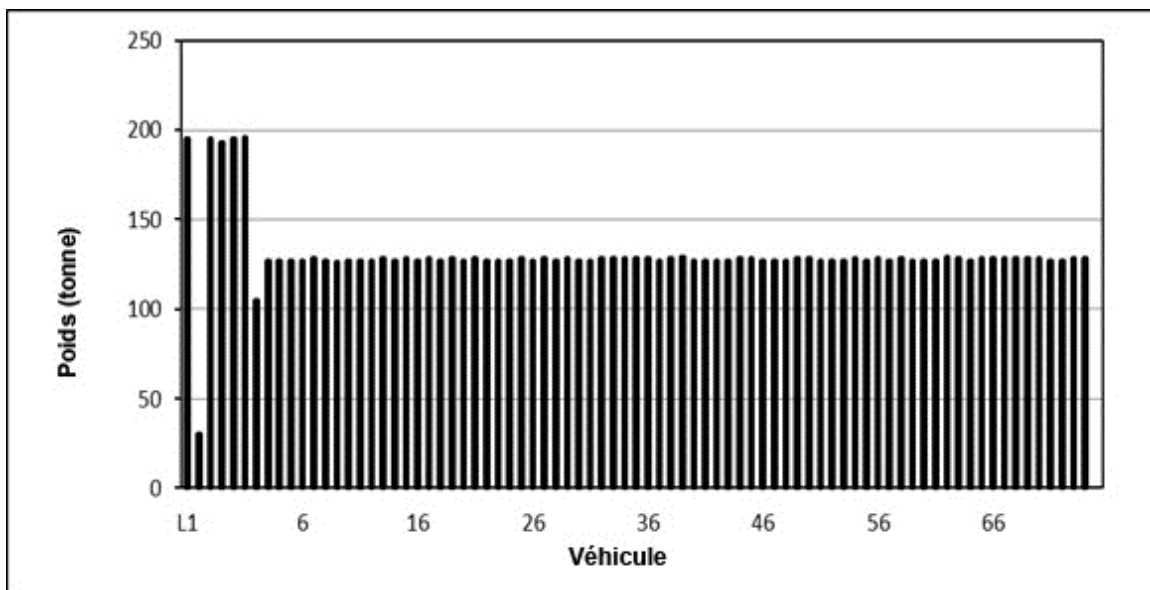


Figure 2: Profil du tonnage du train

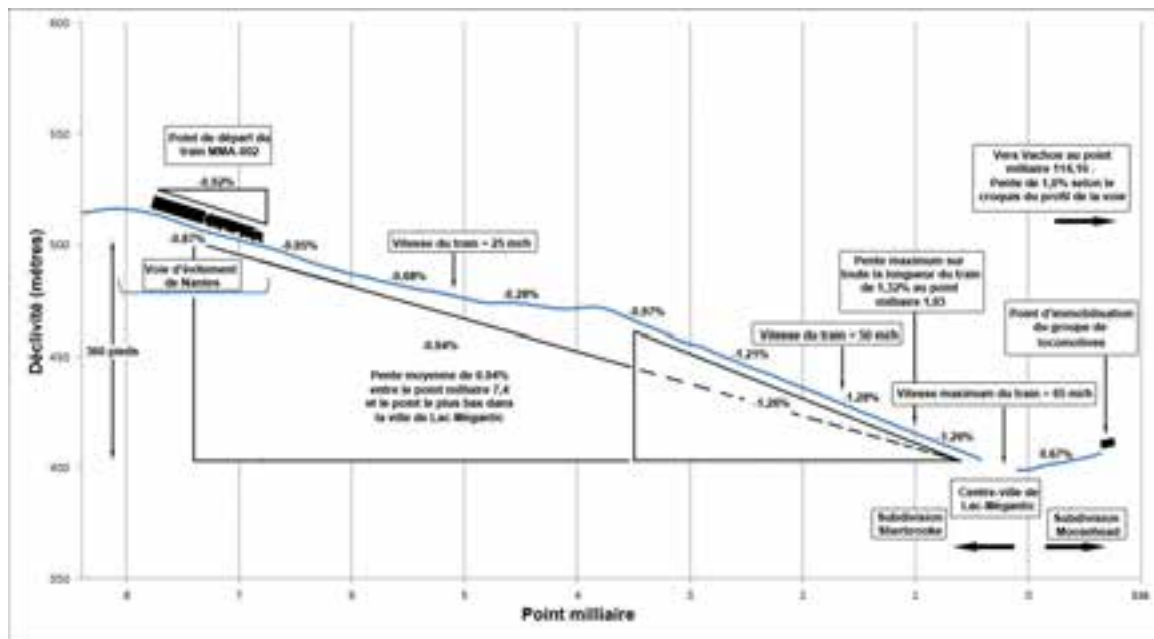


Figure 3: Déclivité et élévation entre Nantes et Mégantic

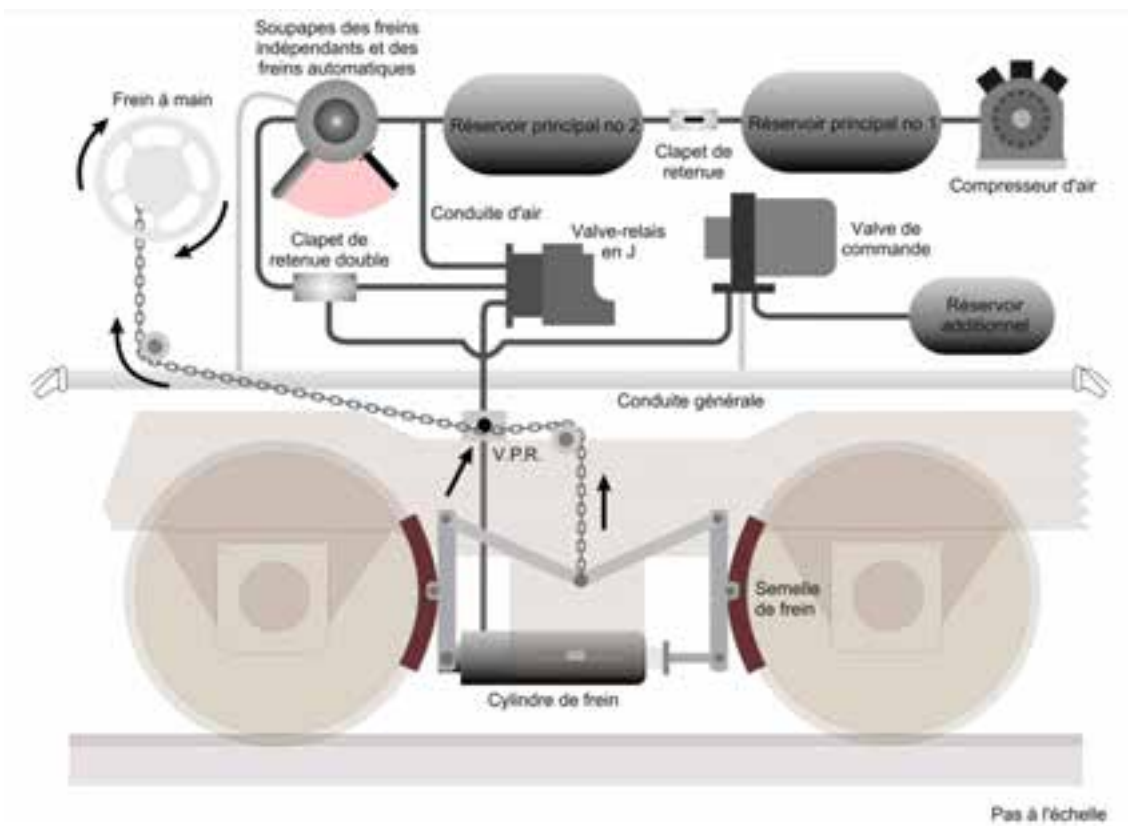


Figure 4: Schéma de la timonerie de frein d'une locomotive

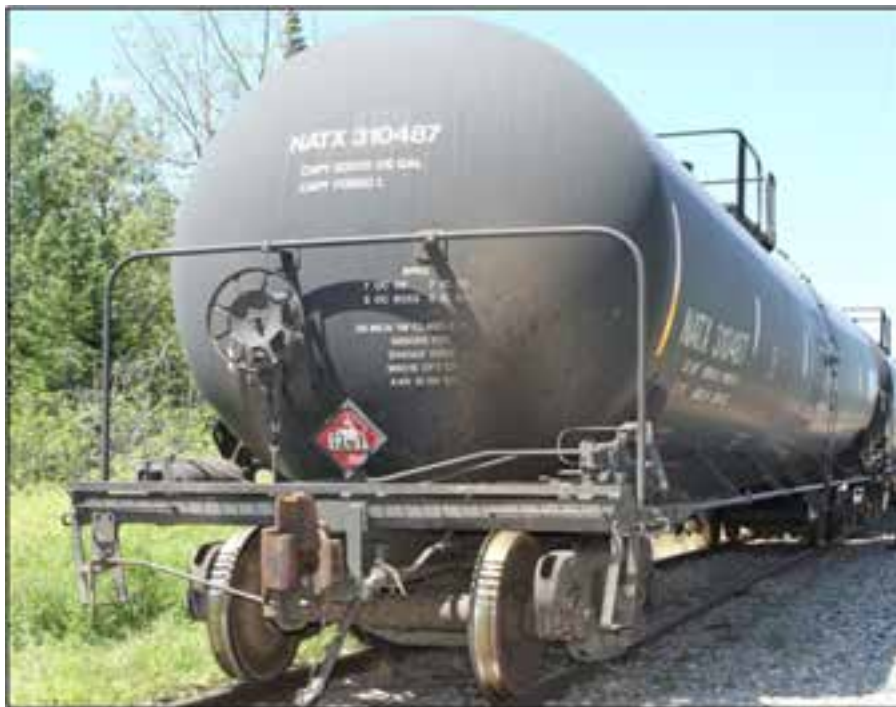


Figure 5: Frein à main d'un wagon-citerne

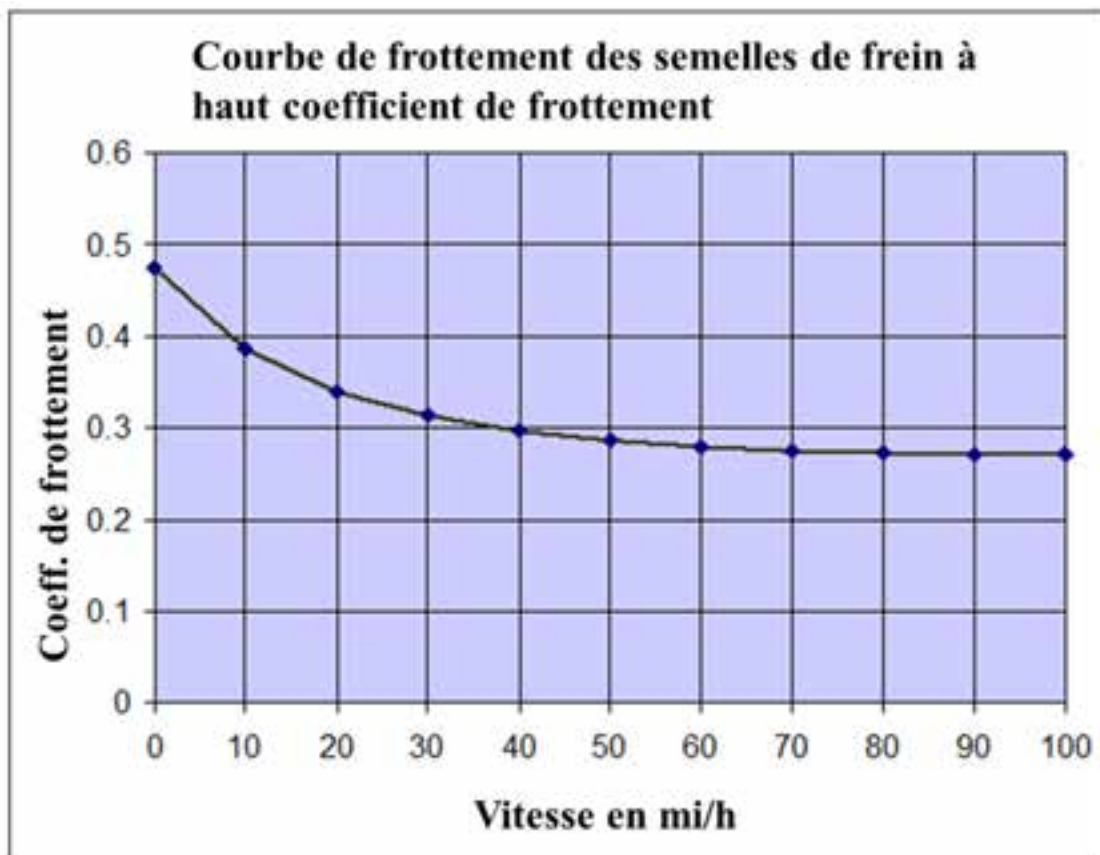


Figure 6: Coefficient de frottement de semelles de frein propres neuves



Figure 7: Capteurs Smart Shoe



Figure 8: Capteur Jim (Golden) Shoe



Figure 9: Amplificateur et moniteur intégrés Smart Shoe



Figure 10: Capteur de tension de chaîne et plagemètre de couples, après leur insertion



Figure 11: Valve de purge rapide sur la MMA 5026



Figure 12: Trousse d'essai de frein sur wagon individuel