



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

LP039/2014

Calcul de la vitesse de déraillement

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	15	1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

PRÉPARÉ PAR

*Original en anglais*

X. Jiang, Ph.D. (Ingénieur principal - Structures)

APPROUVÉ PAR

*Original en anglais*

S. Dionne, Ph.D. (Gestionnaire, Analyse du matériel et des structures)

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	Services techniques demandés .....	1
1.3	Contexte .....	1
2.0	ANALYSE.....	1
3.0	DISCUSSION.....	5
4.0	CONCLUSIONS.....	6

**Liste des tableaux:**

Tableau 1: Vitesses de déraillement estimatives .....	6
---	---

**Liste des figures:**

Figure 1: Vues schématiques du déraillement du train de l'événement .....	7
Figure 2: Vitesse de déraillement estimative des wagons-citernes individuels impliqués dans l'événement .....	7

**Liste des annexes:**

Annexe A: Analyse de la force d'obstruction s'exerçant contre le reste du train.....	A-1
--	-----

## 1.0 INTRODUCTION

### 1.1 Description de l'événement

1.1.1 Le 6 juillet 2013, vers 1 h 15, heure avancée de l'Est (HAE), le train de marchandises MMA-02 de la Montreal, Maine & Atlantic (MMA) transportant du pétrole brut déraille dans la ville de Lac-Mégantic (Québec). De nombreux wagons-citernes sont perforés et perdent leur contenu; un incendie s'ensuit.

### 1.2 Services techniques demandés

1.2.1 Le bureau des Opérations d'enquête de la région de l'Est - Rail/Pipeline du Bureau de la sécurité des transports du Canada (BST) a demandé une estimation de la vitesse de déraillement des wagons-citernes impliqués dans l'événement.

### 1.3 Contexte

1.3.1 Le train était formé de 5 locomotives en tête, d'un fourgon VB (fourgon de queue spécial), de 1 wagon couvert et de 72 wagons-citernes de la classe 111 transportant des liquides inflammables (pétrole brut, UN 1267, classe 3). Soixante-trois (63) wagons-citernes et le wagon couvert ont déraillé. Les 9 wagons-citernes en queue n'ont pas quitté les rails et ont par la suite été remorqués à Nantes dans le cadre de l'intervention d'urgence. Le dernier wagon-citerne à dérailler (le NATX 310470, n° 65 dans le convoi) était fondamentalement intact et a été remis sur rails, puis retiré de l'empilement au cours des opérations de dégagement des wagons accidentés.

1.3.2 L'enquête a révélé qu'au moment du déclenchement du signal de freinage d'urgence la vitesse du train était de 65 milles à l'heure (mi/h)<sup>1</sup>.

1.3.3 Le train s'est arrêté après le déraillement du wagon-citerne NATX 310470 (63<sup>e</sup> wagon-citerne).

1.3.4 Le train se trouvait dans une pente descendante (P) d'environ 1,2 % avant le point de déraillement<sup>2</sup>.

1.3.5 La longueur d'un wagon-citerne représentatif (entre les faces de traction des mâchoires d'attelage) était de 60 pieds<sup>3</sup> (18,30 mètres). Le poids brut des wagons-citernes déraillés était en moyenne de 128 tonnes (116 tonnes métriques).

## 2.0 ANALYSE

2.1 La figure 1 montre un schéma du déraillement du train de marchandises. On présume qu'au moment où le *k*<sup>ième</sup> wagon-citerne déraille (figure 1a), il roule à la

---

<sup>1</sup> Rapport du Laboratoire d'ingénierie LP136/2013 - Consignateur d'événements de locomotive (CEL) Extraction et analyse des données.

<sup>2</sup> Rapport du Laboratoire d'ingénierie LP167/2013 - Levé sur le terrain et calculs de la pente.

<sup>3</sup> Aux fins de la présente analyse, il n'a pas été tenu compte des petites différences de longueur indiquées dans les dessins des wagons-citernes considérés.

même vitesse que le reste du train. Ainsi, en estimant la vitesse du reste du train, on peut obtenir la vitesse du  $k^{\text{ième}}$  wagon-citerne au moment de son déraillement.

- 2.2 L'estimation de la vitesse du reste du train se fait sur la base de la méthode de l'équilibre de l'énergie cinétique. Il existe plusieurs suppositions quant au modèle :
- Le reste du train forme un corps rigide.
  - Le point de déraillement pour tous les wagons-citernes ne change pas. Cela signifie qu'au moment où le  $k^{\text{ième}}$  wagon déraile, le reste du train resterait toujours sur les rails et le pousserait vers l'avant jusqu'à ce que le  $(k-1)^{\text{ième}}$  wagon arrive au même endroit et commence à dérailler, comme le montrent les figures 1a à 1c.
  - Quand le  $k^{\text{ième}}$  wagon-citerne déraile, sa décélération soudaine exercerait une force d'obstruction ( $F$ ) à l'encontre de la course du reste du train en raison de l'interaction entre ce wagon et les autres véhicules du convoi. Essentiellement, la force d'obstruction est une force de réaction à la force exercée par le reste du train au wagon-citerne déraillé pour surmonter le frottement de celui-ci avec le sol et, ainsi, le pousser vers l'avant. L'annexe A présente une analyse détaillée de la force d'obstruction exercée contre le reste du train. Sur la base de cette analyse, on peut utiliser une force d'obstruction constante pour obtenir, à l'aide de la méthode de l'équilibre cinétique, une estimation de premier ordre de la vitesse du reste du train.
  - Le premier wagon à dérailler était un wagon couvert (CIBX 172032), qui mesurait 69 pieds de long et avait un poids brut de 105 tonnes. Pour simplifier le calcul, on le traitera comme un wagon ayant les mêmes paramètres physiques que les wagons-citernes déraillés (se reporter à la section 1.3.5).
- 2.3 Le train compte  $N$  wagons-citernes ( $N=73$  dans le cas présent) et chaque wagon-citerne possède une masse  $m$  (dans ce cas-ci,  $m=116$  tonnes métriques = 116 000 kg).
- 2.4 En supposant que le  $k^{\text{ième}}$  wagon a déraillé, les paramètres du reste du train au début de ce déraillement (figure 1a) sont les suivants :
- vitesse :  $V_k$
  - masse du reste du train :  $(N-k) \cdot m$
  - force d'obstruction exercée par le wagon-citerne déraillé contre le reste du train :  $F$
  - force de gravité exercée sur le train
- $$f_{gr} = (N-k) \cdot m \cdot g \cdot P = (N-k) \cdot m \cdot g \cdot 0,012 \quad (1)$$
- (ici,  $P$  représente la pente descendante de la voie et  $g$  l'accélération due à la pesanteur  $9.8 \text{ m/s}^2$ )<sup>4</sup>
- énergie cinétique du reste du train

<sup>4</sup> Pour une faible pente descendante, la composante de la force parallèle à la pente est approximativement égale à la force de gravité multipliée par la pente.

$$E_k = \frac{1}{2}(N-k) \cdot m \cdot V_k^2 \quad (2)$$

2.5 À la fin du déraillement du  $k^{\text{ième}}$  wagon (figure 1c), moment où le corps de ce wagon est poussé complètement à l'extérieur de la voie par le reste du train et où le  $(k-1)^{\text{ième}}$  wagon arrive au point de déraillement, les paramètres du reste du train sont les suivants :

- vitesse :  $V_k'$
- la masse du reste du train reste la même :  $(N-k) \cdot m$
- la force d'obstruction ( $F$ ) exercée par le wagon-dérailé contre le reste du train est toujours une constante
- énergie cinétique du reste du train

$$E_k' = \frac{1}{2}(N-k) \cdot m \cdot (V_k')^2 \quad (3)$$

2.6 L'équilibre de l'énergie cinétique du reste du train au cours du déraillement du  $k^{\text{ième}}$  wagon-citerne (sur la distance  $S$ , qui représente la longueur du wagon), est le suivant :

$$E_k' = E_k - Q_d + Q_g \quad (4)$$

Ici :

- $Q_d$  représente la perte d'énergie cinétique que subit le train pour vaincre la force d'obstruction  $F$  exercée sur la distance  $S$ :

$$Q_d = F \cdot S \quad (5)$$

- $Q_g$  est le gain d'énergie cinétique réalisé par le train en raison de la force de gravité  $f_{gr}$  qui tire le train sur la distance  $S$  :

$$Q_g = f_{gr} \cdot S \quad (6)$$

En remplaçant (1) dans (6), on obtient :

$$Q_g = (N-k) \cdot m \cdot g \times 0,012 \cdot S \quad (7)$$

En remplaçant aussi (2), (3), (5) et (7) dans (4), on obtient :

$$\frac{1}{2}(N-k) \cdot m \cdot (V_k')^2 = \frac{1}{2}(N-k) \cdot m \cdot V_k^2 - F \cdot S + (N-k) \cdot m \cdot g \times 0,012 \cdot S \quad (8)$$

Ainsi,

$$V_k' = \sqrt{\frac{(N-k) \cdot m \cdot V_k^2 - 2F \cdot S + 2(N-k) \cdot m \cdot g \times 0,012 \cdot S}{(N-k) \cdot m}} \quad (9)$$

2.7 Quand le déraillement du  $k^{\text{ième}}$  wagon est terminé, le  $(k+1)^{\text{ième}}$  wagon-citerne suivant commence le sien, comme le montre la figure 1d. Le reste du train compte  $N-(k+1)$  wagons à la vitesse  $V_{(k+1)}$ . On suppose aussi que :

$$V_{(k+1)} = V_k' \quad (10)$$

À la fin du déraillement du  $(k+1)^{\text{ième}}$  wagon (quand celui-ci a été poussé complètement à l'extérieur de la voie par le reste du train), on peut obtenir la valeur suivante :

$$V'_{(k+1)} = \sqrt{\frac{(N-(k+1)) \cdot m \cdot V_{(k+1)}^2 - 2F \cdot S + 2(N-(k+1)) \cdot m \cdot g \times 0.012 \cdot S}{(N-(k+1)) \cdot m}} \quad (11)$$

Cette séquence se poursuit jusqu'à ce que le 64<sup>e</sup> wagon (le 63<sup>e</sup> wagon-citerne) déraile, ce qui arrête la course du reste du train.

- 2.8 Les calculs doivent respecter les conditions limites initiale et finale. Deux scénarios sont pris en considération selon le wagon-citerne qui a déraillé le premier.

#### *Scénario 1*

Le wagon couvert CIBX 172032 (n° 2 dans le convoi) est présumé avoir déraillé en premier. La condition initiale est la suivante :

$$k = 1, V_1 = 65 \text{ mi/h} = 29,03 \text{ m/s}$$

La condition finale est atteinte quand le 64<sup>e</sup> wagon (le 63<sup>e</sup> wagon-citerne) déraile et le reste des wagons-citernes s'immobilisent :

$$k = 64, V_{65} = 0 \text{ m/s}$$

#### *Scénario 2*

Le 6<sup>e</sup> wagon TILX 316338 (n° 6 dans le convoi, également le 5<sup>e</sup> wagon-citerne si le wagon couvert est traité comme un wagon-citerne) est présumé avoir déraillé en premier<sup>5</sup>. La condition initiale est la suivante :

$$k = 5, V_5 = 65 \text{ mi/h} = 29,03 \text{ m/s}$$

La condition finale est identique à celle indiquée pour le scénario 1.

- 2.9 On ne connaît pas la force d'obstruction, présumée être une constante, qui s'oppose à la course du train, mais il est possible de déterminer par calcul la vitesse  $V_k$  pour des valeurs  $F$  données allant de 10 000 N à 2 500 000 N, par échelons de 100 N. Ce calcul est répété jusqu'à ce que l'on détermine une valeur  $F$  qui satisfait aux conditions limites de chaque scénario. On utilise ensuite cette valeur  $F$  pour calculer la vitesse du reste du train en fonction du nombre de wagons qui ont déjà déraillé.
- 2.10 Les valeurs  $F$  de la force d'obstruction obtenues pour les 2 scénarios décrits en 2.8 sont les suivantes :
- pour le scénario 1, la force d'obstruction moyenne obtenue est de 1 746 400 N
  - pour le scénario 2, la force d'obstruction moyenne obtenue est de 1 805 400 N
- 2.11 La vitesse du reste du train en fonction du nombre de wagons-citernes déraillés est alors calculée à partir de la force d'obstruction moyenne estimative obtenue pour chaque scénario. Comme la vitesse du reste du train est présumée être

<sup>5</sup> Les calculs de la position du train au moment du déclenchement du signal de freinage d'urgence suggèrent que ce wagon se trouvait approximativement à la hauteur de l'aiguillage entre la voie principale et la voie 1 de Mégantic (se reporter au rapport du Laboratoire d'ingénierie LP136/2013).

identique à celle du wagon-citerne déraillé devant lui, ce calcul fournit une estimation de la vitesse de déraillement des wagons-citernes individuels pour les 2 scénarios ci-dessus, qui sont représentés sous forme de graphique dans la figure 2.

- 2.12 Une fois calculée la vitesse de déraillement de chaque wagon-citerne, on peut aussi, en se servant de l'équation ci-après, faire une estimation du délai total de déraillement de l'ensemble du train :

$$t = \sum_{k=i}^{64} \frac{2 \cdot S}{(V_k + V_{k+1})} \quad (12)$$

Pour le scénario 2 où  $i=5$ , le délai total de déraillement serait d'environ 58 secondes.

### 3.0 DISCUSSION

- 3.1 L'analyse ci-dessus constitue une approximation de premier ordre de la vitesse de déraillement des wagons-citernes individuels, sur la base d'une force d'obstruction idéale et constante s'exerçant contre le déplacement du reste du train encore sur la voie.
- 3.2 On a fait l'analyse en présumant qu'il y a toujours devant le reste du train un wagon-citerne déraillé qui lui était raccordé par ses attelages. Bien que des forces d'impact plutôt complexes puissent s'exercer parmi les wagons-citernes déraillés, ceux-ci ne sont soumis à aucun impact direct de la part du reste du train. Ainsi, l'interaction des forces entre le reste du train et les wagons-citernes déraillés est considérée comme étant relativement simple, se limitant aux forces nécessaires pour vaincre le frottement entre les wagons-citernes déraillés (raccordés au reste du train) et le sol, pour faire pivoter ces wagons-citernes et pour entraîner le désaccouplement des attelages.
- 3.3 Une estimation d'ordre plus élevé de la vitesse de déraillement exigerait, pour la force d'obstruction, une modélisation détaillée basée sur une compréhension du mécanisme de déraillement et du scénario de collision entre les wagons-citernes déraillés.
- 3.4 Les résultats obtenus à l'aide de la présente approche suggèrent que la plupart des wagons-citernes roulaient à plus de 50 mi/h au moment de leur déraillement.
- 3.5 Le tableau 1 est une ventilation du nombre de wagons-citernes en fonction de leur vitesse de déraillement estimative. On peut y voir qu'environ 10 wagons-citernes auraient roulé à une vitesse d'au plus 40 mi/h au moment de leur déraillement.

**Tableau 1: Vitesses de déraillement estimatives**

Scénario	Nombre de wagons dont la vitesse de déraillement estimative était inférieure à		
	20 mi/h	30 mi/h	40 mi/h
1	2	4	9
2	2	5	10

#### **4.0 CONCLUSIONS**

- 4.1 L'analyse donne à penser que la plupart des wagons-citernes roulaient à plus de 50 mi/h au moment de leur déraillement.
- 4.2 La vitesse du reste du train aurait été inférieure à 20 mi/h au moment du déraillement des 2 derniers wagons-citernes.
- 4.3 La vitesse du reste du train aurait été inférieure à 30 mi/h au moment du déraillement des 5 derniers wagons-citernes.
- 4.4 La vitesse du reste du train aurait été inférieure à 40 mi/h au moment du déraillement des 10 derniers wagons-citernes.



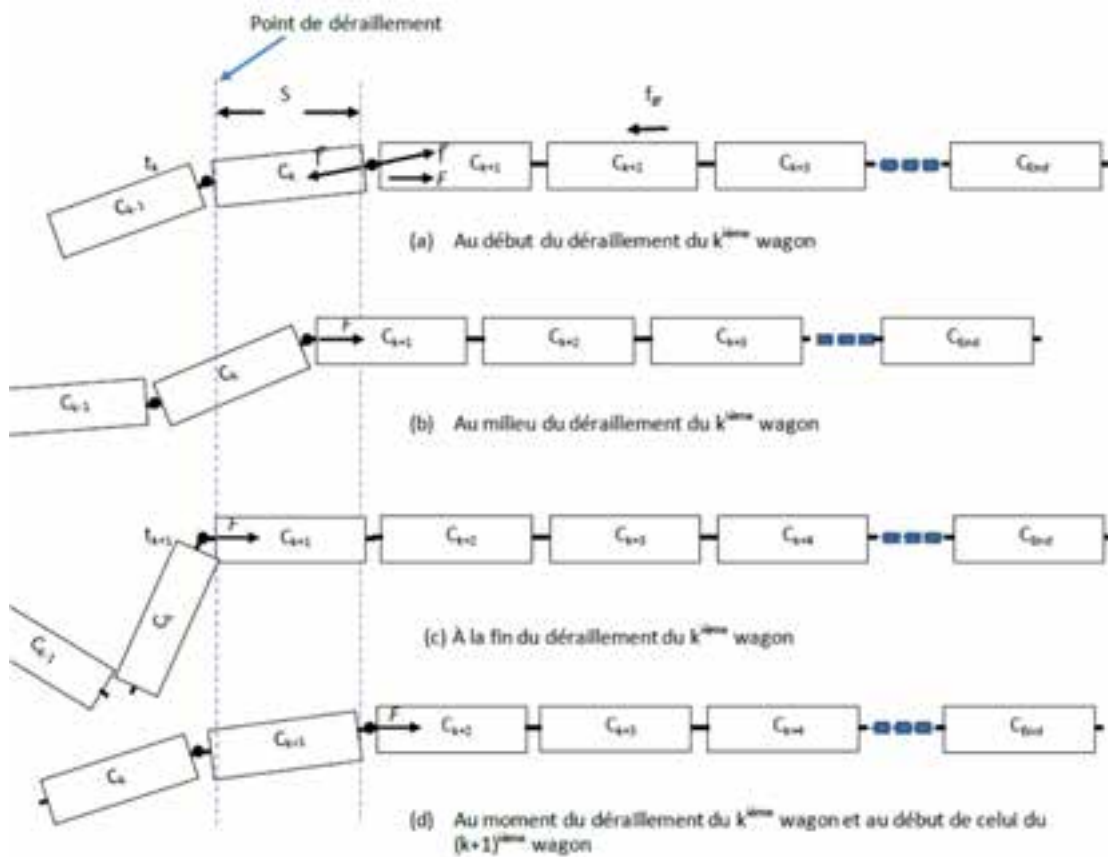


Figure 1: Vues schématiques du déraillement du train de l'événement (le train se déplace de la droite vers la gauche)

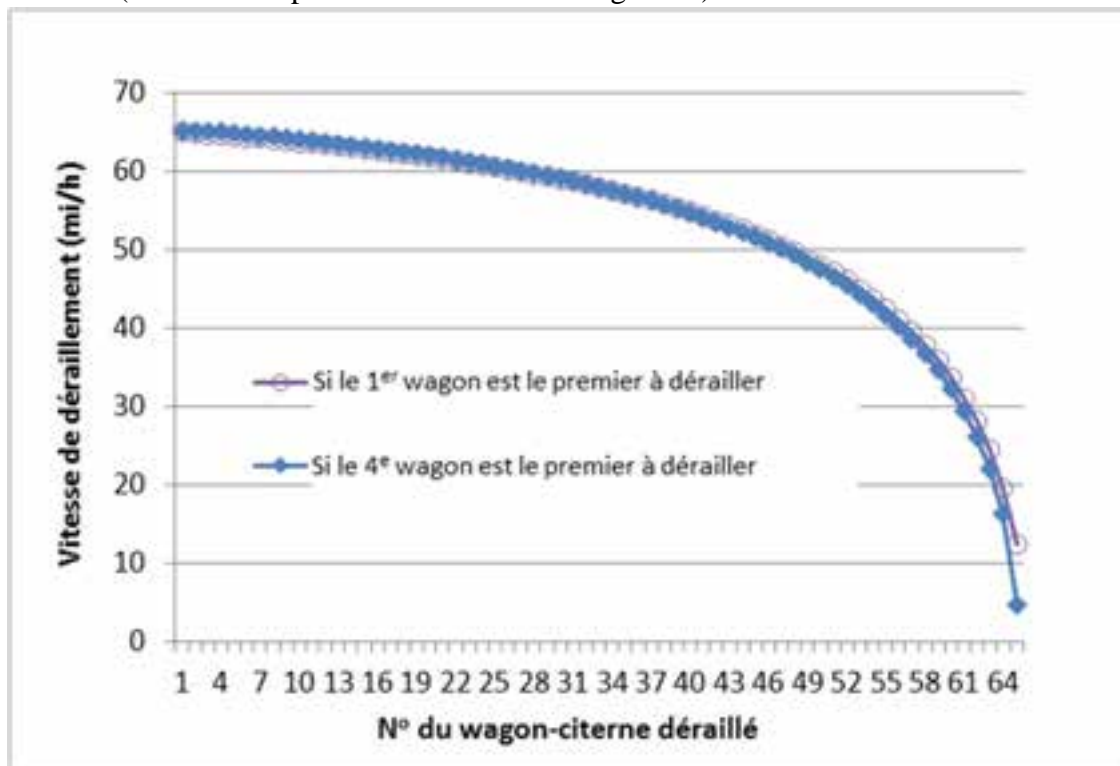


Figure 2: Vitesse de déraillement estimative des wagons-citernes individuels impliqués dans l'événement

## **Annexe A: Analyse de la force d'obstruction s'exerçant contre le reste du train**

### **A-1.0 INTRODUCTION**

- A-1.1 Pour évaluer le ralentissement du reste du train au moyen de la méthode d'équilibre de l'énergie cinétique, il est nécessaire de comprendre la force d'obstruction opposée à la course du reste du train afin d'en dériver une force représentative destinée au calcul ou à la modélisation.
- A-1.2 Le déraillement du train est un processus que l'on peut diviser en trois phases pour simplifier l'analyse :
- Au cours de la première phase, les wagons-citernes déraillés sont présumés se déplacer en ligne sur le sol, leurs attelages encore raccordés. Cette phase aurait mis en cause un nombre limité de ces wagons.
  - La deuxième phase du déraillement débute au moment où les wagons-citernes déraillés commencent à pivoter par rapport à la direction de leur déplacement, formant une colonne courbe ou en zigzag constituée de wagons déraillés arc-boutés par les attelages; cette phase se termine avec l'effondrement de cette colonne en zigzag.
  - La dernière phase débute quand un wagon déraillé, pivote à un angle par rapport à la voie et est poussé vers l'avant par le reste du train pour percuter les wagons déraillés devant, entraînant ainsi la rupture de l'accouplement des attelages et le déraillement du wagon-citerne suivant. Ce processus se répète jusqu'à ce que la force d'obstruction immobilise le train.

### **A-2.0 FORCE D'OBSTRUCTION AU COURS DE LA PREMIÈRE PHASE**

- A-2.1 La figure A-1 représente schématiquement la force d'obstruction s'exerçant à l'encontre de la course du reste du train au cours de la première phase.
- A-2.2 Le train se déplace sur la voie sans locomotive quand survient le déraillement du premier wagon (figure A-1a). Deux autres wagons-citernes déraillent ensuite et s'ajoutent à la chaîne de wagons-citernes déraillés (figure A-1b).
- A-2.3 Le frottement de roulement entre les roues du reste du train et la voie est négligeable, tout comme la force de résistance opposée par le vent à la course du reste du train.
- A-2.4 La force de frottement entre les roues du wagon déraillé et le sol est importante car le reste du train doit exercer une force ( $f^o$ ) pour vaincre ce frottement afin de maintenir la vitesse de déplacement des wagons déraillés.

Ainsi,

$$f^o = n \cdot m \cdot g \cdot \xi_0 \quad (A1)$$

Ici :

- $n$  est le nombre de wagons-citernes qui ont déraillé au cours de la première phase du déraillement;  $m$  est la masse d'un wagon-citerne déraillé;
- $\xi_0$  est le coefficient de frottement entre un wagon-citerne déraillé et le sol, qui varie généralement de 0,25 à 0,75<sup>6</sup>.

Si on suppose un coefficient de frottement ( $\xi_0$ ) de 0,4 (hypothèse raisonnable pour un déplacement dans la direction de roulement des roues), la force ( $f'$ ) nécessaire pour pousser un wagon déraillé vers l'avant ( $n=1$ ) est estimée à 0,45 MN<sup>7</sup>.

- A-2.5 Il existe une force de réaction ( $f$ ) à la force ( $f'$ ) exercée par le reste du train sur le wagon déraillé. Cette force produit deux composantes,  $f_x$  et  $f_y$ , comme le montre la figure A-1a. Pendant que  $f_x$  agit directement comme force d'obstruction opposée à la course du reste du train,  $f_y$  agit pour pousser les roues du train contre le côté de la voie, créant ainsi une force de frottement qui s'exerce à l'encontre de la course du reste du train. Ainsi, la force d'obstruction opposée au train ( $F$ ) est en réalité une force complexe, définie par la formule suivante :

$$F = f \cos(\theta) + f \sin(\theta) \cdot \xi_l = n \cdot m \cdot g \cdot \xi_0 (\cos(\theta) + \sin(\theta) \cdot \xi_l) \quad (A2)$$

Ici,  $\xi_l$  est le coefficient de frottement, sans roulement, entre les roues du reste du train et la voie.

Si on suppose que l'angle  $\theta$  de la force de réaction ( $f$ ) par rapport à la direction longitudinale du reste du train (ou de la voie) est de 5° (environ 1/8 entre 0 degré et l'angle maximal autorisé par les contraintes géométriques entre 2 wagons-citernes) et que  $\xi_l$  est de 0,3 (valeur moyenne pour le coefficient de frottement quand les roues glissent sur la voie)<sup>8</sup>, un wagon-citerne déraillé exercerait une force d'obstruction estimative de 0,47 MN.

- A-2.6 À partir de l'équation A2, on peut voir que la force d'obstruction ( $F$ ) est une fonction du nombre total de wagons déraillés au cours de la présente phase. Au cours de cette phase, la force d'obstruction croît de façon linéaire avec l'augmentation du nombre de wagons déraillés, pourvu que ces wagons forment une ligne<sup>9</sup>.

### A-3.0 FORCE D'OBSTRUCTION AU COURS DE LA DEUXIÈME PHASE

- A-3.1 Comme la force d'obstruction ( $F$ ) continue de croître avec l'augmentation du nombre de wagons déraillés (paragraphe A-2.6), à un moment donné, elle devient suffisante pour faire pivoter le wagon-citerne déraillé (figure A-2a). Il

<sup>6</sup> Jeong, D. Y., et al, *Equations of motion for train derailment dynamics*, Proceedings of the 2007 ASME Rail Transportation Division Fall Technical Conference, 11-12 septembre 2007, Chicago, IL, USA (Paper#: RTDF2007-46009).

<sup>7</sup> 1 MN = 1 million de newtons.

<sup>8</sup> *Engineering and Design of Railway Brake System*, (The Air Brake Association, P.O. Box #1, Wilmerding, PA 15148-0001, USA), 1975.

<sup>9</sup> Toma, E. E., *A computer model of a train derailment*, thèse de doctorat, Université Queen's, Kingston (Ontario), Canada, oct. 1998.

en est ainsi parce que les wagons-citernes déraillés ne sont pas parfaitement en ligne l'un avec l'autre ainsi qu'avec la direction de la force exercée par le reste du train.

A-3.2 Le pivot (point de rotation) correspond à la jonction de deux attelages, comme le montre la figure A-2a. En utilisant la méthode de l'équilibre des moments, on peut définir comme suit la force ( $f'$ ) nécessaire pour faire pivoter le wagon-citerne déraillé (en jaune dans la figure A-2a) :

$$f_y' \cdot L > f_a' \cdot 0,5 \cdot L \quad (\text{A3})$$

$$f_y' = f' \cdot \sin(\alpha) \quad (\text{A4})$$

Ainsi,

$$f' > f_a' \cdot 0,5 \cdot L / \sin(\alpha) = m \cdot g \cdot \xi_0 \cdot 0,5 / \sin(\alpha) \quad (\text{A5})$$

Ici,

- $L$  est la longueur du wagon-citerne entre les attelages
- $f_a'$  est la force de frottement, appliquée au centre de gravité du wagon-citerne, qui s'exerce entre celui-ci et le sol dans la direction tangente de la rotation (à la perpendiculaire de la direction longitudinale du wagon-citerne)
- $\alpha$  est l'angle de la force ( $f'$ ) par rapport à la direction longitudinale du wagon-citerne

On suppose une valeur de 0,75 pour le coefficient de frottement ( $\xi_0$ ) entre le wagon-citerne et le sol; une telle hypothèse est raisonnable, compte tenu du fait que le frottement s'exerce à la perpendiculaire de la direction de roulement des roues<sup>5</sup>. L'angle ( $\alpha$ ) auquel commence la rotation n'est pas connu; toutefois, si on suppose qu'il est de  $5^\circ$  (environ 1/8 entre 0 degré et l'angle maximal autorisé par les contraintes géométriques entre 2 wagons-citernes), la force ( $f'$ ) nécessaire à la rotation est évaluée à 4,9 MN, calculée à partir de l'équation A5. Pour revenir au résultat relatif à la force  $f'$  estimative pour un wagon-citerne déraillé (paragraphe A-2.5), un tel résultat suggère que 10 wagons-citernes environ auraient déraillé avant que la force exercée sur le wagon-citerne déraillé par le reste du train ne le fasse pivoter.

A-3.3 Une fois que le wagon-citerne déraillé commence à pivoter, la force nécessaire à la rotation ( $f'$ ) diminue parce que l'angle ( $\alpha$ ) indiqué dans l'équation A5 augmente avec la rotation en cours. Par conséquent, la force d'obstruction opposée à la course du reste du train diminue elle aussi.

A-3.4 Par suite des contraintes géométriques présentes entre deux wagons adjacents raccordés par leurs attelages, la rotation du wagon déraillé fait que les coins des deux wagons entrent en contact sous l'effet d'une force de compression. Au même moment, la force exercée sur l'attelage passe d'un mode de compression à un mode de traction (figure A-2b). Cette rotation déclenche une réaction en chaîne de rotations dans le reste des wagons-citernes déraillés,

parce que tous ces wagons sont raccordés par leurs attelages; ils forment ensuite une ligne courbe ou en zigzag<sup>10</sup> (figures A-2c et A-2d respectivement).

- A-3.5 Une telle configuration constitue en fait une colonne structurale formée de wagons-citernes déraillés arc-boutés par les attelages. Une fois formée, la colonne augmente la force d'obstruction opposée à la course du reste du train à cause de l'augmentation importante du coefficient de frottement entre les wagons-citernes et le sol quand la direction des wagons n'est pas en ligne avec leur axe longitudinal (direction de roulement des roues).
- A-3.6 À mesure que des wagons déraillés s'ajoutent à la colonne de wagons-citernes qui le sont déjà, la force nécessaire pour les pousser vers l'avant continue de croître, provoquant une augmentation de la force d'obstruction exercée sur le reste du train. À un moment donné, l'augmentation de la force ( $f'$ ) appliquée est suffisante pour entraîner le désaccouplement des attelages et, du même coup, la séparation des wagons-citernes adjacents, ainsi que le montre la figure A-2e.
- A-3.7 La force exercée par le reste du train pour rompre la colonne raidie par les attelages peut être évaluée à partir du schéma des forces montré dans la figure A-3 :

$$f' \cdot L \cdot \sin(\beta) = f_a' \cdot 0,5L + f_c' \cdot 0,5W = m \cdot g \cdot \xi_0 \cdot 0,5L + f_c' \cdot 0,5W \quad (\text{A6})$$

Ici

- $L$  et  $W$  désignent respectivement la longueur et la largeur du wagon-citerne.
- $f_c'$  désigne la force d'accouplement maximale des attelages.
- $\beta$  est l'angle de la force exercée par le reste du train par rapport à l'axe longitudinal de la colonne de wagons-citernes déraillés.

Les dessins techniques pour les wagons-citernes considérés indiquent que  $L = 17,7$  m et  $W = 3,0$  m.

Le coefficient de frottement est présumé de 0,75, conformément au paragraphe A-3.2.

La force de désaccouplement des attelages est considérée comme étant la limite de la force de rupture (résistance à la rupture) des mâchoires en service marchandises, qui va de 550 000 à 900 000 livres<sup>11</sup> (2 450 à 4 000 kN). Aux fins du présent calcul, on suppose une résistance des mâchoires de 3 000 kN.

Quand la colonne de wagons-citernes déraillés est formée, son axe longitudinal correspond à la diagonale passant par les coins des wagons-citernes en contact, comme l'indique le pointillé rouge dans la figure A-3. L'angle entre la force ( $f'$ ) exercée et l'axe longitudinal de la colonne est inconnu, mais on présume toujours qu'il est de 5°.

<sup>10</sup> D. Y. Jeong et al., *Engineering Studies on Structural Integrity of Railroad Tank Cars under Accident Loading Conditions*, (Report Number DOT/FRA/ORD-09/18), oct. 2009.

<sup>11</sup> AAR Manual of Standards and Recommended Practices, Section B, Specification M-211-92, Couplers and Yokes, AAR Approved – Purchase and Acceptance, 1994.

Sur la base des paramètres susmentionnés, la force ( $f''$ ) nécessaire pour rompre l'accouplement de deux attelages et provoquer l'effondrement des wagons est évaluée à quelque 7 MN. La force d'obstruction ( $F$ ) est également évaluée à 7 MN quand on utilise l'équation A2 et la valeur  $f = f''$ .

#### **A-4.0 FORCE D'OBSTRUCTION AU COURS DE LA TROISIÈME PHASE**

- A-4.1 L'effondrement de la colonne de wagons-citernes déraillés provoque le déraillement du wagon-citerne suivant (figure A-4a).
- A-4.2 Le reste du train pousse le wagon déraillé vers l'avant. La force nécessaire pour pousser vers l'avant un wagon-citerne déraillé est évaluée à quelque 0,45 MN (paragraphe A-2.4). Avant que le wagon suivant puisse dérailler, il est poussé aussi par le reste du train jusqu'à ce qu'il percute le wagon déraillé devant (figure A-4b). Cette situation provoque le désaccouplement des deux wagons, séparant ainsi le wagon avant du reste du train et entraînant le déraillement du wagon suivant (voir la figure A-4c). La force nécessaire pour rompre l'accouplement est évaluée à quelque 7 MN, comme l'explique le paragraphe A-3.7. Ainsi, la force d'obstruction opposée à la course du reste du train s'élève aussi à ce niveau dans un court laps de temps avant de revenir au niveau inférieur correspondant à la force requise pour pousser vers l'avant un wagon déraillé. Les autres wagons-citernes déraillent en suivant les étapes représentées schématiquement dans la figure A-4; le tout est accompagné de la répétition d'un cycle d'exercice de la force d'obstruction qui passe d'une valeur de 0,45 MN à un pic de 7 MN, puis revient à 0,45 MN par courtes pulsations (une par wagon-citerne), jusqu'à l'immobilisation du reste du train.

#### **A-5.0 PROFIL DE LA FORCE D'OBSTRUCTION**

- A-5.1 La figure A-5 représente schématiquement le profil de la force d'obstruction. L'intégration de la force d'obstruction sur la distance parcourue par le train donne le travail total produit par cette force pour ralentir le reste du train. En divisant le travail total par la distance parcourue par le train, on obtient une force constante moyenne à laquelle est soumis le reste du train. On peut ainsi utiliser cette force constante comme une force d'obstruction représentative pour évaluer la vitesse du reste du train au moyen de la méthode d'équilibre de l'énergie cinétique, dont le corps principal du rapport indique les détails.

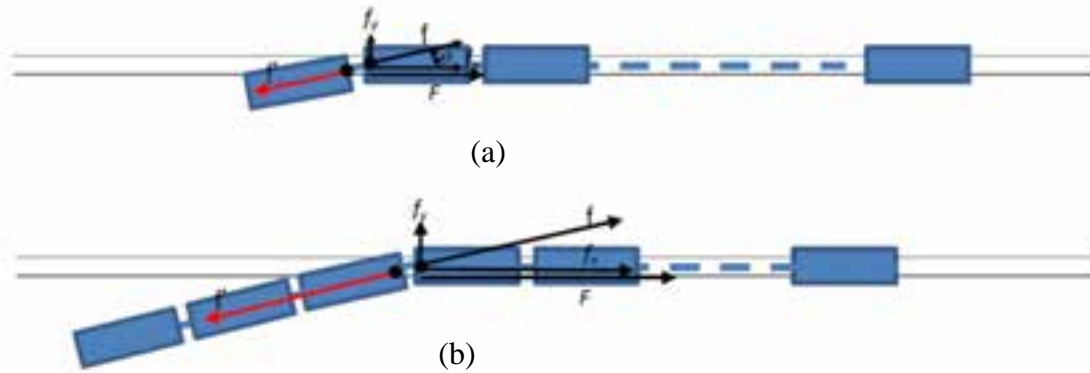


Figure A-1: Représentation schématique de la force d'obstruction opposée au déplacement du reste du train quand les wagons déraillés forment une ligne (le train se déplace de la droite vers la gauche)

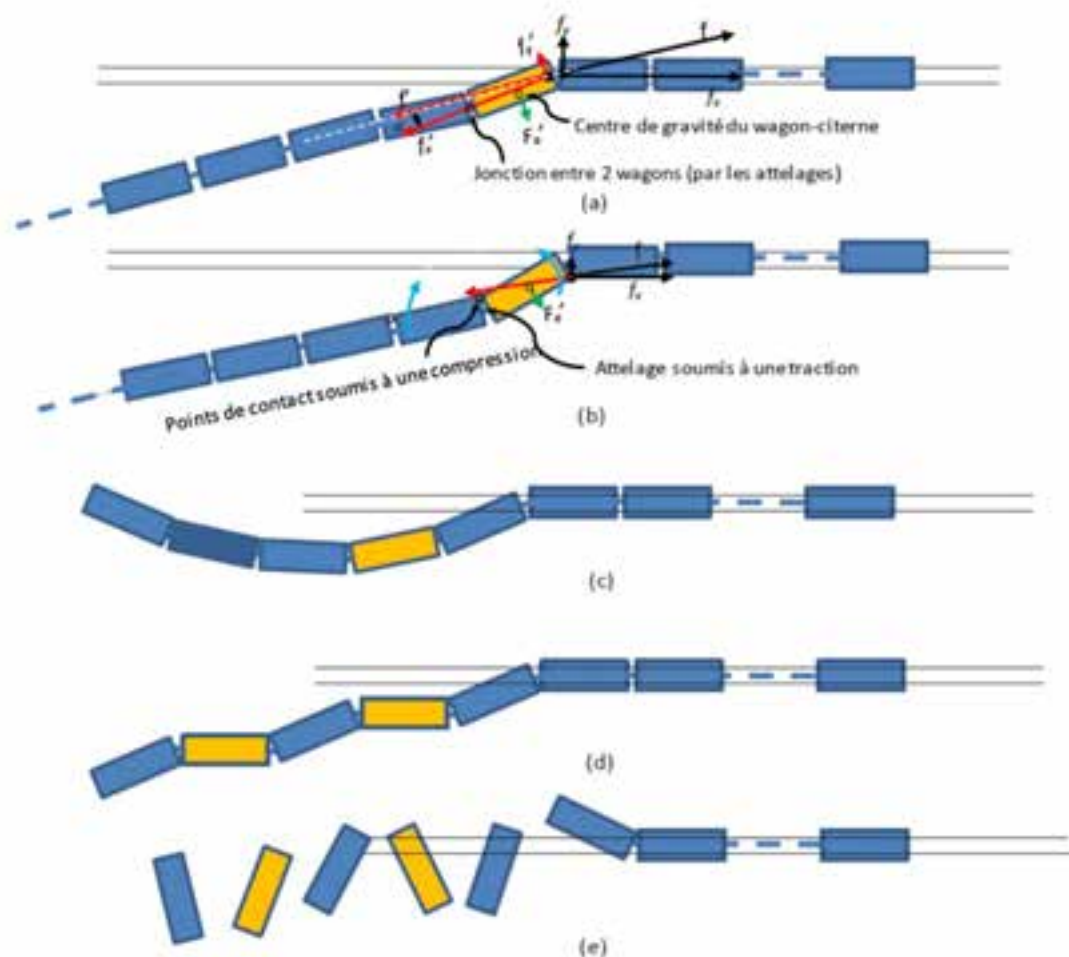


Figure A-2: Représentation schématique de la force d'obstruction opposée au déplacement du reste du train quand un wagon-citerne déraillé commence à pivoter

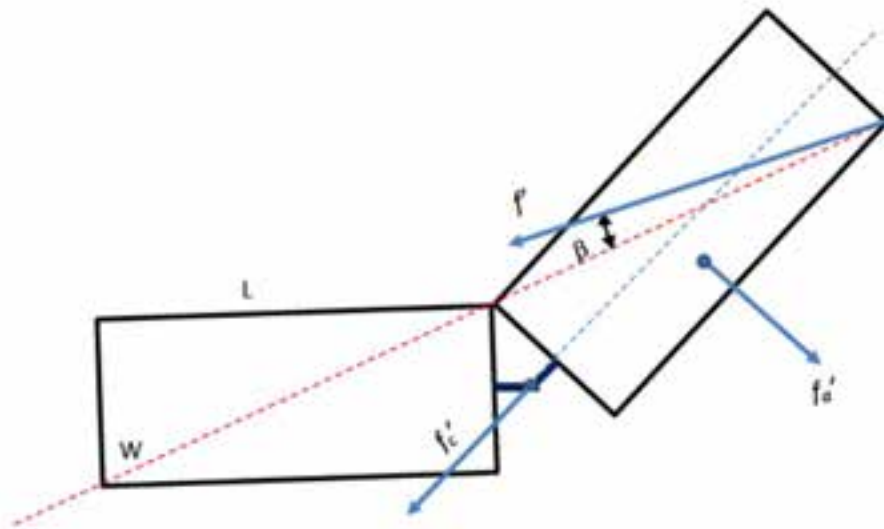


Figure A-3: Schéma des forces de deux wagons déraillés arc-boutés par leurs attelages après la rotation

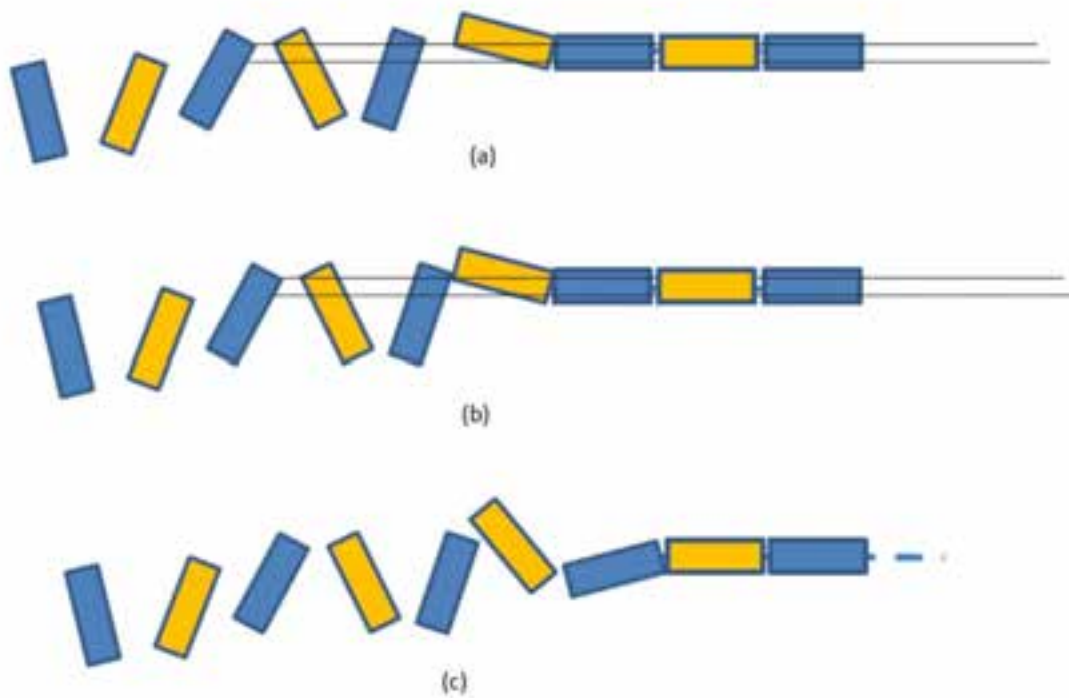


Figure A-4: Représentation schématique de la dernière phase du déraillement du train



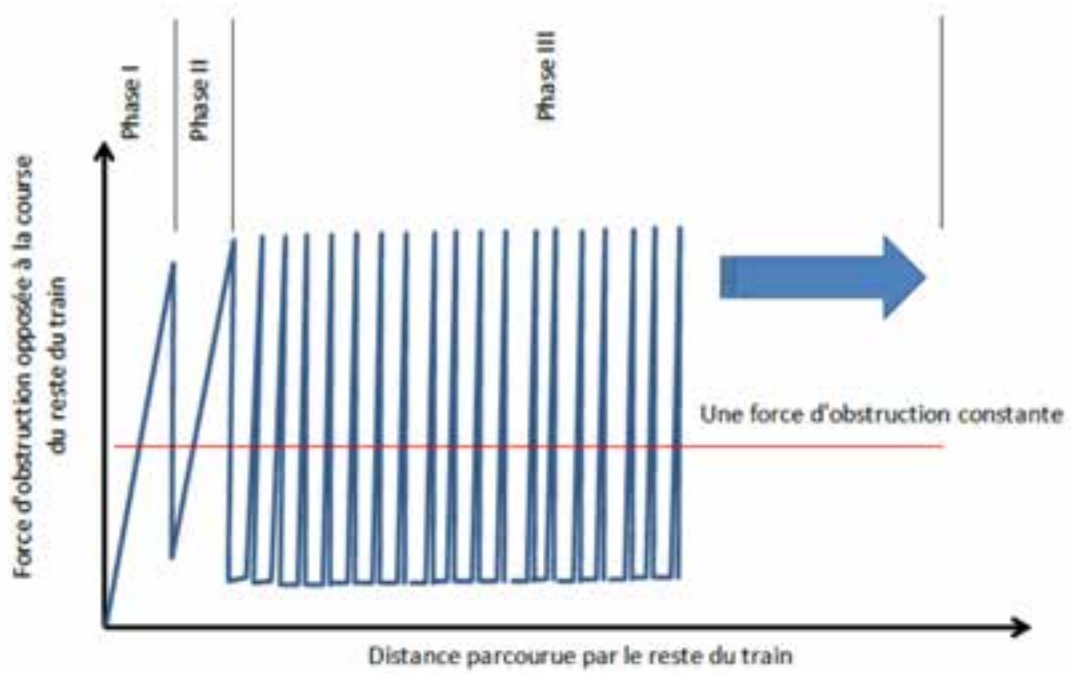


Figure A-5: Représentation schématique du profil prévu de la force d'obstruction sur la totalité de la course du train en déraillement