



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

LP165/2013

Mesures du volume des wagons-citernes

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	13	2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

PRÉPARÉ PAR

Original en anglais

T.R. Parisee (Technologiste principal en ingénierie – Géospatiale)

APPROUVÉ PAR

Original en anglais

D. Gagné (Ingénieur spécialiste principal/Systèmes électriques)

DIFFUSÉ PAR

DIFFUSÉ LE

19 mars 2014

Original en anglais

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

RÉVISION

Table des matières:

1.0	INTRODUCTION	1
1.1	Description de l'événement	1
1.2	Services techniques demandés.....	1
2.0	EXAMEN	1
3.0	ANALYSE.....	3
3.1	Wagon-citerne représentatif NATX 310595.....	3
3.4	Wagon-citerne WFIX 130608.....	3
3.5	Wagon-citerne TILX 316570.....	4
3.6	Wagon-citerne ACFX 76605	4
3.7	Wagon-citerne WFIX 130545.....	5
3.8	Wagon-citerne ACFX 71505	5
3.9	Wagon-citerne CTCX 735572	6
3.10	Wagon-citerne WFIX 130664.....	6
3.11	Wagon-citerne TILX 316533.....	7
4.0	CONCLUSION.....	7

Liste des tableaux:

Tableau 1: Identification des wagons-citernes.....	2
--	---

Liste des figures:

Figure 1: Vues obliques de visualisations par balayage laser du wagon-citerne représentatif NATX 310595	9
Figure 2: Vues obliques de visualisations par balayage laser du wagon-citerne WFIX 130608.....	9
Figure 3: Vues obliques de visualisations par balayage laser du wagon-citerne TILX 316570.....	10
Figure 4: Vues obliques de visualisations par balayage laser du wagon-citerne ACFX 76605.....	10
Figure 5: Vues obliques de visualisations par balayage laser du wagon-citerne WFIX 130545.....	11
Figure 6: Vues obliques de visualisations par balayage laser du wagon-citerne ACFX 71505.....	11
Figure 7: Vues obliques de visualisations par balayage laser du wagon-citerne CTCX 735572.....	12
Figure 8: Vues obliques de visualisations par balayage laser du wagon-citerne WFIX 130664.....	12
Figure 9: Vues obliques de visualisations par balayage laser du wagon-citerne TILX 316533.....	13

Liste des annexes:

Annexe A: Balayage laser représentatif pour un modèle d'analyse des erreurs.....	A-1
Annexe B: Résultats de l'analyse dimensionnelle des wagons-citernes.....	B-1

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, stationné 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 déraillent. 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.

1.2 Services techniques demandés

1.2.1 Le Bureau de la sécurité des transports du Canada (BST) a procédé à un examen sur le terrain des wagons-citernes déraillés (se reporter au rapport LP149/2014). Au cours de cet examen, un certain nombre de wagons-citernes ont été choisis pour un balayage laser en trois dimensions (3D) effectué par le groupe Forensic Scanning & Evidence Documentation du National Transportation Safety Board (NTSB) des États-Unis.

1.2.2 La Direction des services à l'appui des opérations (Ingénierie) du Bureau de la sécurité des transports du Canada (BST) a reçu une demande de services techniques de la part du bureau des Opérations d'enquête de la région de l'Est - Rail/Pipeline pour la réalisation d'une analyse détaillée des données de balayage laser 3D saisies par le NTSB.

2.0 EXAMEN

2.1 Un balayage laser a été effectué sur un wagon-citerne représentatif (le NATX 310595). Ce balayage avait pour but de fournir une comparaison entre les données du balayage des wagons-citernes endommagés et celles d'un wagon-citerne non endommagé. Il en a résulté un modèle d'analyse des erreurs que l'on a utilisé pour comparer les données du balayage de chaque wagon avec les données recueillies sur son wagon de référence respectif. La figure 1 montre la visualisation obtenue par le balayage laser du wagon-citerne représentatif.

2.2 Huit wagons-citernes endommagés ont été amenés à l'écart du site du déraillement pour être soumis à un balayage laser 3D. Pour chacun de ces wagons-citernes, le tableau 1 indique son numéro d'identification sur le terrain, son numéro dans le convoi et sa marque.

Tableau 1: Identification des wagons-citernes

Numéro sur le terrain ¹	Numéro dans le convoi	Marque
2	4	WFIX 130608
10	12	TILX 316570
24	25	ACFX 76605
29	35	WFIX 130545
36	38	ACFX 71505
40	42	CTCX 735572
42	44	WFIX 130664
54	61	TILX 316533

- 2.3 Le critère utilisé pour la sélection des wagons-citernes était le type de dommage observé, tel que les changements de volume dus aux dommages attribuables aux chocs, la dimension des ruptures et des perforations dans les têtes et la coque des wagons, ainsi que la taille et le volume des grosses bosselures dans les têtes. On a également utilisé les données pour visualiser en niveaux de gris les déformations des wagons-citernes montrés dans les figures 2 à 9.
- 2.4 Les wagons-citernes ont été balayés au moyen d'un scanner laser Focus 3D² de FARO. Avant l'événement, le scanner avait été étalonné la dernière fois le 12 février 2013.
- 2.5 Le balayage laser a produit un nuage de plusieurs millions de points 3D en couleur, fournissant une reproduction numérique du wagon-citerne tel qu'il apparaissait au cours de son examen. Le scanner FARO a recueilli les données du nuage de points et a stocké les fichiers de données dans le format brut utilisé par le logiciel d'acquisition des données. Un balayage total d'un wagon-citerne utilisait de 6 à 29 positions de scanner autour de chacun de ces wagons, selon les dommages et les zones d'intérêt qu'il présentait. Chaque position de scanner générait un fichier de 100 mégaoctets. Pour chaque wagon-citerne, le nombre total de points dans le nuage variait de 10 à 30 millions.
- 2.6 Les fichiers de balayage enregistrés provenant du scanner FARO ont été importés dans le logiciel ReCap d'Autodesk en vue du traitement, du nettoyage et de la visualisation des grands ensembles de données. Les données des nuages de points ont été exportées du logiciel ReCap dans un format compatible avec le logiciel Rhinoceros de conception assistée par ordinateur (CAO) en 3D. À l'intérieur de Rhinoceros, on a généré à partir du nuage de points de données un maillage polygonal afin de produire des coupes transversales des surfaces utilisées pour mesurer le volume de chaque wagon-citerne et quantifier la déformation de celui-ci.

¹ Numéro d'identification attribué par l'entrepreneur en restauration et peint au pistolet sur chaque wagon.

² FARO affirme que l'erreur maximale dans la distance mesurée par le scanner Focus 3D depuis son point d'origine jusqu'à un point sur une cible planaire est de $\pm 2,2$ mm pour les cibles testées à des distances de 10 et 25 mètres, avec une réflectivité de cible de 10 ou 90 %. Une incertitude supplémentaire dans les données dimensionnelles peut découler du choix manuel de points pour représenter un objet particulier à partir de la totalité du nuage de points 3D.

2.7 Le volume des wagons-citernes non endommagés utilisés pour la comparaison a été calculé à l'aide des dimensions extraites du Certificat de construction (CDC) de l'Association of American Railroads (AAR) et des dessins du fabricant. Les dimensions utilisées étaient l'épaisseur du matériau de la coque et des têtes, la longueur de la citerne, la pente du fond de la citerne, le diamètre intérieur de la citerne et le rayon des têtes.

3.0 ANALYSE

3.1 Wagon-citerne représentatif NATX 310595

3.1.1 Un balayage laser a été effectué sur un wagon-citerne représentatif (le NATX 310595)³. Le balayage avait pour but de fournir une estimation de la précision des données de balayage laser en comparant les données obtenues sur un wagon non endommagé avec les dimensions indiquées dans son CDC. L'annexe A présente des renseignements détaillés sur l'analyse du wagon-citerne représentatif.

3.1.2 Son volume calculé à l'aide des données de balayage était de 0,6 % supérieur à celui du wagon-citerne du CDC L114001.

3.1.3 Sa longueur, calculée de la même manière, était de 0,03 % supérieure à celle du wagon-citerne du CDC L114001.

3.2 Sur la base de ces données, on estime que l'erreur liée aux données de balayage est petite comparativement aux grands changements dimensionnels mesurés sur les wagons-citernes déraillés.

3.3 L'annexe B présente des renseignements détaillés sur l'analyse des wagons-citernes déraillés. Les paragraphes qui suivent résument les résultats marquants pour chacun d'eux.

3.4 Wagon-citerne WFIX 130608

3.4.1 Ce wagon-citerne présentait des bosselures mineures sur sa coque, dont la longueur par contre avait peu changé. Il y avait, sur le côté droit près du bout A⁴, une rupture qui a entraîné le bombement de la coque dans cette région.

3.4.2 Depuis le bout B jusqu'au point de départ de la rupture, la coque présentait une légère déformation, avec de petits accroissements dans la section transversale.

³ Il s'agissait de l'un des 9 wagons-citernes en queue ramenés à Nantes (Québec).

⁴ Toutes les orientations sont indiquées depuis la perspective qui fait face au bout B des wagons-citernes.

- 3.4.3 L'analyse du volume du wagon-citerne n'a pu être exécutée que depuis le bout B jusqu'au point de départ de la rupture de la coque. La rupture s'est traduite par une expansion de déformation de la coque, de sorte que les sections transversales dans cette région ne sont pas représentatives du volume réel du wagon-citerne avant la rupture. Le volume dans cette partie du wagon-citerne a augmenté de 1,50 %, comparativement à celui d'un wagon-citerne non endommagé du CDC L116012A.
- 3.4.4 La longueur du wagon-citerne avait diminué de 0,29 % par rapport à celle du wagon-citerne de référence.
- 3.4.5 La rupture était longue d'environ 4,4 mètres et sa superficie mesurée de quelque 2,5 m².
- 3.5 Wagon-citerne TILX 316570
- 3.5.1 Ce wagon-citerne présentait une grosse rupture sur le côté gauche près du bout A, d'où l'expansion de la coque dans cette région. Si on se déplace du bout B vers le bout A, on constate que le wagon-citerne était comprimé sur le côté gauche en direction du centre. La compression augmentait la dimension verticale de la citerne, pour atteindre un maximum au point de départ de la rupture, à quelque 3,5 m du centre de la citerne.
- 3.5.2 L'analyse du volume du wagon-citerne a pu être effectuée seulement jusqu'au point de départ de la rupture. La rupture s'est traduite par une expansion déformée de la coque, de sorte que les sections transversales dans cette région ne sont pas représentatives du volume réel du wagon-citerne avant la rupture. Le volume dans cette partie du wagon-citerne a augmenté de 5,52 %, comparativement à celui d'un wagon-citerne non endommagé du CDC L116012A.
- 3.5.3 La longueur du wagon-citerne avait diminué de 0,77 % par rapport à celle du wagon-citerne de référence.
- 3.5.4 La rupture était longue d'environ 3,9 m et sa superficie mesurée de quelque 1,1 m².
- 3.6 Wagon-citerne ACFX 76605
- 3.6.1 La coque et les têtes de ce wagon-citerne étaient grandement déformées et comprimées. On a observé une grosse perforation dans les deux têtes, une rupture transversale dans la coque et plusieurs autres brèches de la coque.

- 3.6.2 Le volume dans cette partie du wagon-citerne a augmenté de 39,7 %, comparativement à celui d'un wagon-citerne non endommagé du CDC A841016.
- 3.6.3 La longueur du wagon-citerne avait diminué de 2,76 % par rapport à celle du wagon-citerne de référence.
- 3.6.4 La superficie des sections transversales du wagon ACFX 76605 avait diminué de près des trois quarts, à quelque 1 mètre du bout A. La compression de la coque avait réduit le volume de plus du tiers de celui du wagon-citerne de référence.
- 3.7 Wagon-citerne WFIX 130545
- 3.7.1 Ce wagon-citerne était comprimé sur ses côtés gauche et droit. Cette compression avait pincé la coque près du sommet du wagon-citerne. Les têtes et la coque ne présentaient aucune perforation.
- 3.7.2 Le volume dans cette partie du wagon-citerne a augmenté de 26,8 %, comparativement à celui d'un wagon-citerne non endommagé du CDC L116012A.
- 3.7.3 La longueur du wagon-citerne avait diminué de 1,58 % par rapport à celle du wagon-citerne de référence.
- 3.7.4 Les parties plus déformées de la coque (se reporter par exemple aux sections transversales 3 et 4 de la figure B-10) affichaient une diminution marquée de leur rayon de courbure. Le rayon de courbure au sommet du plissement dans le centre du wagon-citerne et 2 m vers le bout A était de 0,10 et 0,09 m respectivement. Le rayon de courbure de la section transversale du wagon-citerne de référence est de 1,524 m.
- 3.7.5 La déformation localisée avait modifié sensiblement le volume du wagon WFIX 130545. À quelque 2 m du centre du wagon-citerne vers le bout A, la superficie des sections transversales avait diminué de près de moitié. La compression de la coque avait réduit le volume de presque du tiers de celui du wagon-citerne de référence.
- 3.8 Wagon-citerne ACFX 71505
- 3.8.1 Le bout A du wagon ACFX 71505 n'a pas fait l'objet d'un balayage laser, faute de temps. L'annexe B-5.0 comporte des renseignements additionnels au sujet de la reconstruction de ce wagon-citerne.

- 3.8.2 Ce wagon-citerne était comprimé sur ses côtés gauche et droit, près du centre de la citerne. La coque était rompue près du bout B. Les deux têtes étaient bosselées, avec une petite perforation au bout B.
- 3.8.3 Le volume dans cette partie du wagon-citerne a augmenté de 22,8 %, comparativement à celui d'un wagon-citerne non endommagé du CDC A811019A.
- 3.8.4 La longueur du wagon-citerne avait diminué de 2,42 % par rapport à celle du wagon-citerne de référence.
- 3.9 Wagon-citerne CTCX 735572
- 3.9.1 La coque de ce wagon-citerne était comprimée sur trois côtés (gauche, droit, au sommet), ce qui lui donnait une forme en coin près du centre. Il y avait des bosselures aux bouts A et B du wagon-citerne.
- 3.9.2 Le volume dans cette partie du wagon-citerne a augmenté de 11,2 %, comparativement à celui d'un wagon-citerne non endommagé du CDC L121031C.
- 3.9.3 La longueur du wagon-citerne avait diminué de 0,60 % par rapport à celle du wagon-citerne de référence.
- 3.10 Wagon-citerne WFIX 130664
- 3.10.1 Seul le bout A de ce wagon-citerne a fait l'objet d'un balayage laser, qui a visé surtout une bosselure sur la tête de la citerne et une séparation à une soudure d'angle entre la plaque de renfort de longrine avant et la tête.
- 3.10.2 Le volume mesuré de la bosselure était d'environ 0,64 m³ (169 gallons américains), comparativement à la surface du wagon-citerne non endommagé. La bosselure avait une surface d'environ 2,8 m² (30 pi²).
- 3.10.3 La longrine tronquée s'était séparée au niveau de la soudure d'angle entre la plaque de renfort de longrine avant et la tête. Cette fissure s'était propagée à la soudure d'angle de la plaque de renfort de traverse pivot et jusque dans la soudure tête-coque. La partie inférieure de la fissure mesurait 0,50 m de long et avait une largeur maximale de 0,11 m. La partie supérieure de la fissure mesurait 0,25 m de longueur et avait une largeur maximale de 0,030 m.

- 3.10.4 Le long de l'axe du wagon-citerne, l'intervalle mesuré entre la plaque de renfort de longrine avant et la tête était d'environ 5,3 cm. La séparation de la plaque de renfort de longrine avant était plus grande le long de son bord supérieur et se réduisait en approchant de la partie inférieure de la plaque de renfort plus près de la longrine tronquée.
- 3.11 Wagon-citerne TILX 316533
- 3.11.1 Si on se déplace depuis le bout A vers le bout B jusqu'au centre du wagon, la coque de celui-ci présentait de légères déformations. Il n'y avait pas de brèches dans la citerne.
- 3.11.2 À quelque 4,3 m depuis le centre du wagon-citerne vers le bout B de la citerne, la coque était comprimée sur le côté droit, avec des bosselures et des déformations sur les autres côtés de la coque. La surface transversale de la coque était réduite de 11,5 % et le bout B du wagon-citerne présentait deux grandes bosselures.
- 3.11.3 Le volume dans cette partie du wagon-citerne avait augmenté de 2,7 %, comparativement à celui d'un wagon-citerne non endommagé du CDC L116012A.
- 3.11.4 La longueur du wagon-citerne avait diminué de 0,51 % par rapport à celle du wagon-citerne de référence.

4.0 CONCLUSION

- 4.1 Les erreurs liées aux mesures de longueur et de volume tirées des données de balayage laser 3D étaient faibles en comparaison des changements importants mesurés dans la longueur et le volume des wagons considérés.
- 4.2 L'analyse des données du balayage laser 3D du wagon WFIX 130608 a révélé une rupture thermique de 4,4 m de long et d'environ 2,5 m² de surface. La longueur de ce wagon avait été réduite d'environ 0,29 % par rapport à celle d'un wagon non endommagé. La partie de la citerne éloignée de la rupture thermique présentait une légère augmentation de volume d'environ 1,5 % par rapport à un wagon non endommagé.
- 4.3 L'analyse des données du balayage laser 3D du wagon TILX 316570 a révélé une rupture de 3,9 m de long et d'environ 1,1 m² de surface dans la coque. La longueur de ce wagon avait été réduite d'environ 0,77 % par rapport à celle d'un wagon non endommagé. La partie de la citerne éloignée de la rupture présentait une augmentation de volume d'environ 5,52 % par rapport à un wagon non endommagé. La superficie de la section transversale adjacente à la rupture avait diminué d'environ 17 % par rapport à un wagon non endommagé.
- 4.4 Selon l'analyse des données du balayage laser 3D des 4 wagons ayant subi une déformation attribuable aux chocs importante (ACFX 76605, WFIX 130545,

- ACFX 71505 et CTCX 735572), il y a eu des réductions de volume allant de 11 % (CTCX 735572) à près de 40 % (ACFX 76605) par rapport à un wagon non endommagé.
- 4.5 La mesure des changements transversaux dans les parties les plus déformées des coques montrait des réductions pouvant atteindre 75 % de la section transversale. Le rayon de courbure mesuré à un plissement prononcé dans la coque du wagon WFIX 130545 était d'environ 0,1 m; la coque non endommagée a un rayon de 1,52 m, selon le CDC L116012A.
- 4.6 La réduction de la longueur par rapport à un wagon non endommagé allait de 0,6 % pour le wagon le moins déformé (le CTCX 735572) à 2,76 % pour celui le plus déformé (le wagon ACFX 76605).
- 4.7 Selon l'analyse des données du balayage laser 3D du wagon WFIX 130664, la brèche dans le bas de la citerne mesurait 0,50 m de long et 0,11 m de large. La brèche dans le haut de la citerne mesurait 0,25 m de longueur et 0,030 m de largeur. L'intervalle entre la plaque de renfort de longrine avant séparée et la surface de la tête était d'environ 5,3 cm. Une bosselure située dans la tête adjacente à la séparation de la plaque de renfort de longrine avait un volume d'environ 0,64 m³ et une surface de quelque 2,8 m².
- 4.8 L'analyse des données de balayage laser 3D a montré que le flambage transversal sur le côté droit du wagon TILX 316533 était lié aux changements suivants : réduction de 11,5 % de la section transversale de la citerne, réduction de 2,7 % du volume et diminution de 0,51 % de la longueur.

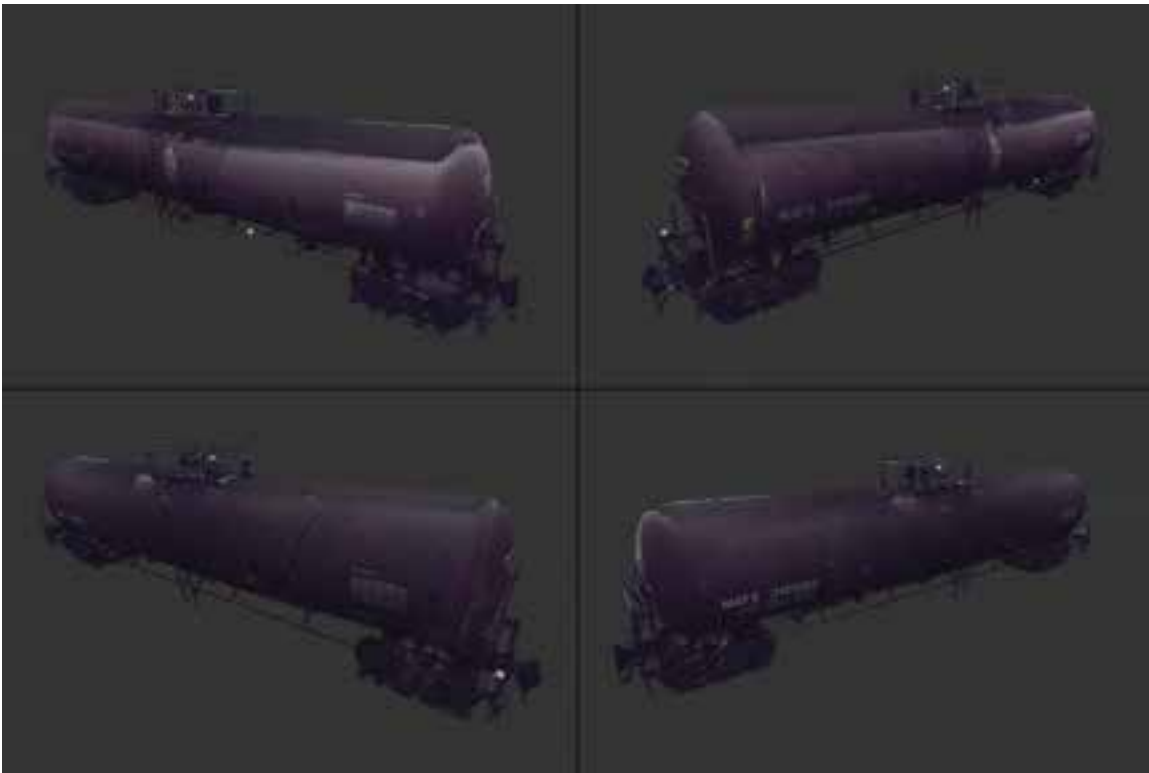


Figure 1: Vues obliques de visualisations par balayage laser du wagon-citerne représentatif NATX 310595

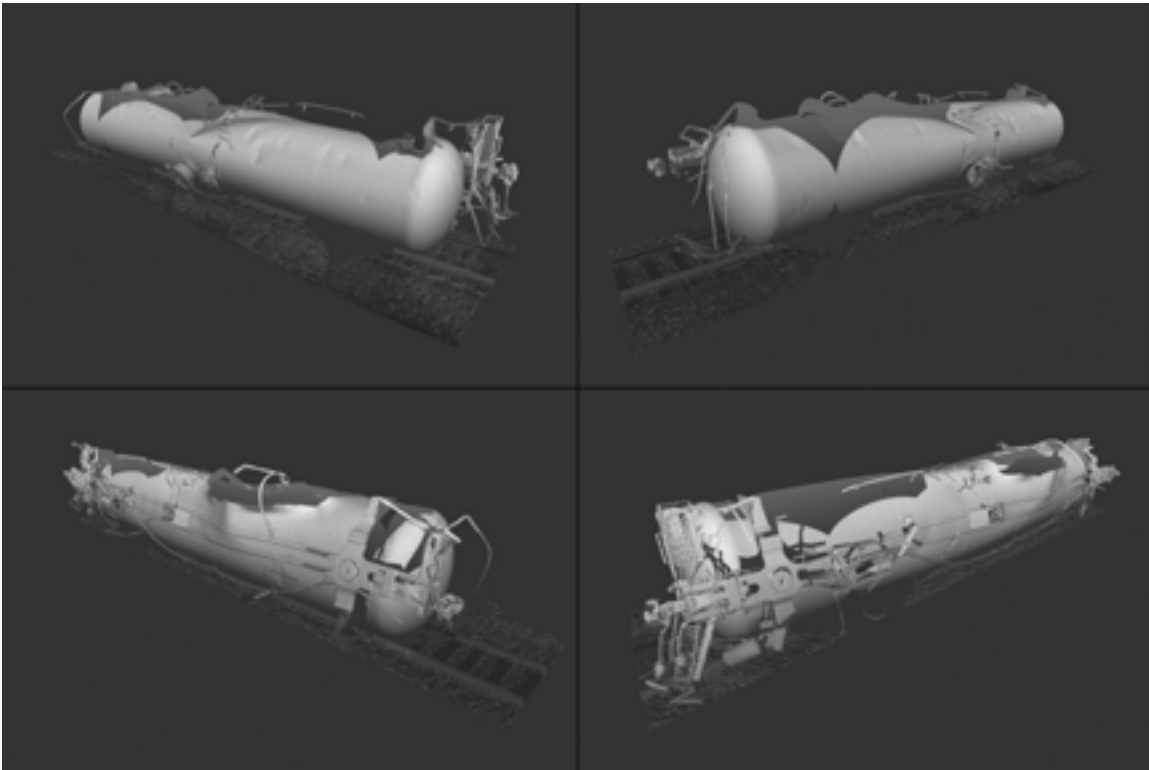


Figure 2: Vues obliques de visualisations par balayage laser du wagon-citerne WFIX 130608

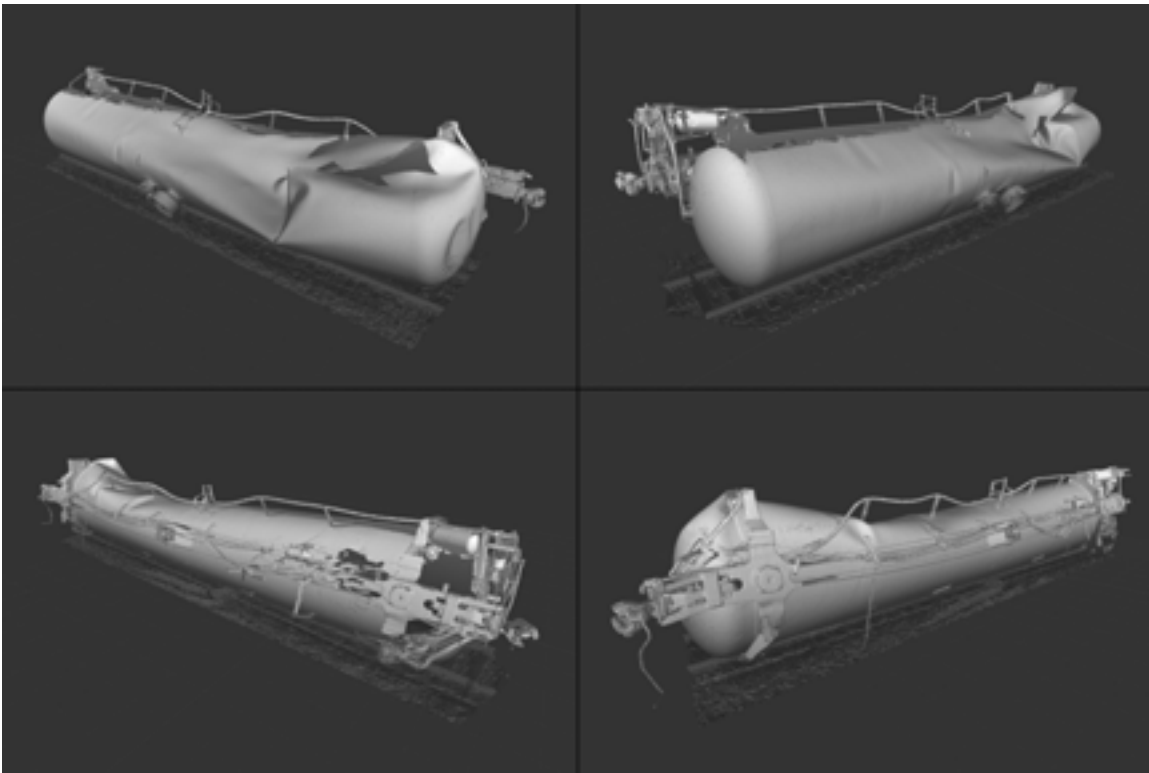


Figure 3: Vues obliques de visualisations par balayage laser du wagon-citerne TILX 316570

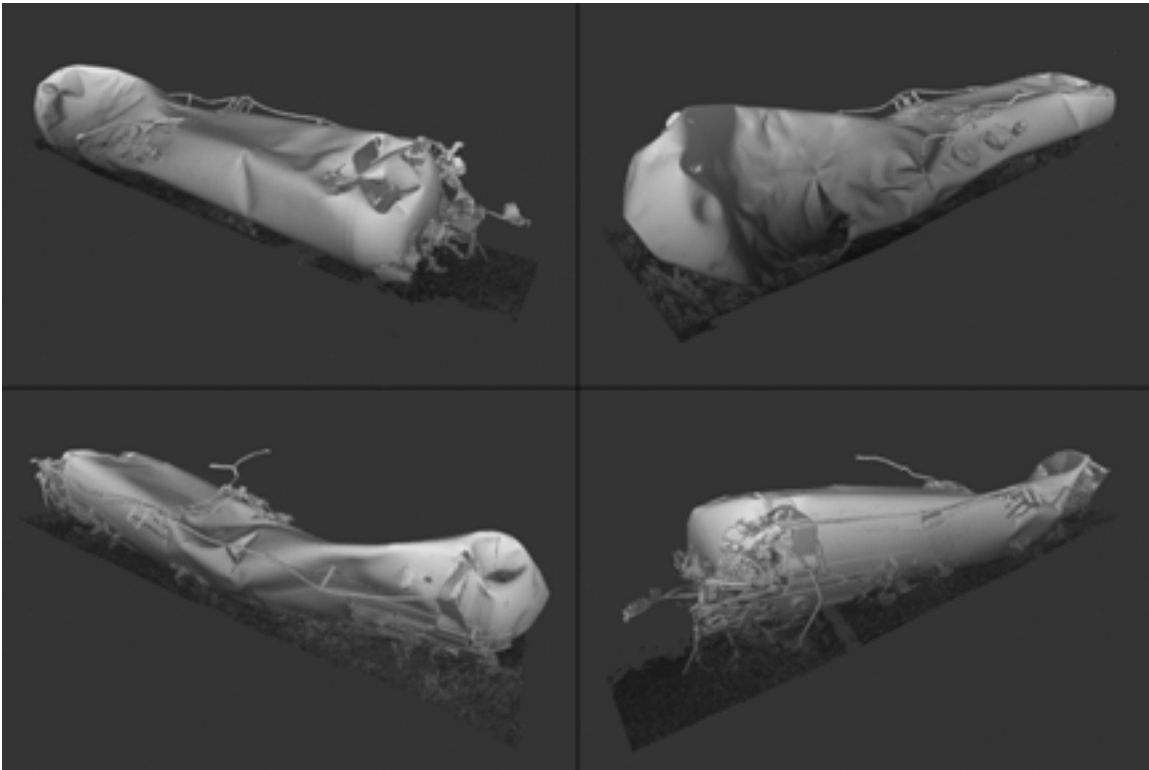


Figure 4: Vues obliques de visualisations par balayage laser du wagon-citerne ACFX 76605

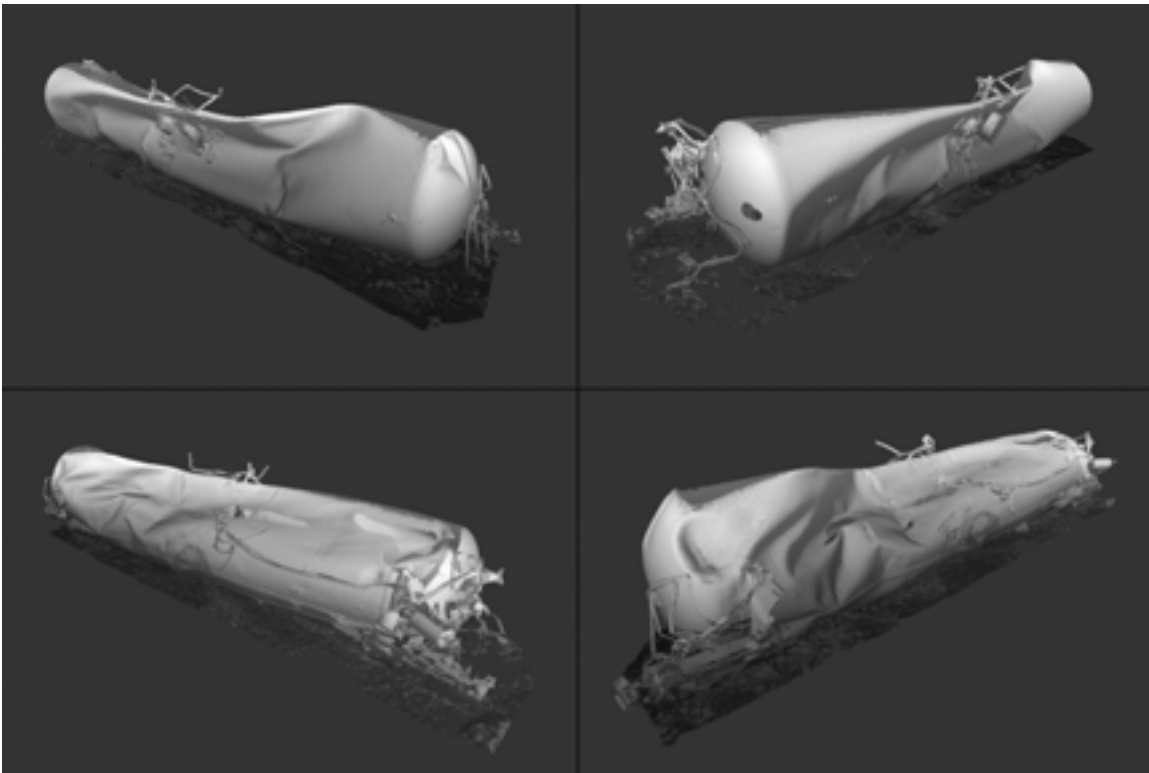


Figure 5: Vues obliques de visualisations par balayage laser du wagon-citerne WFIX 130545

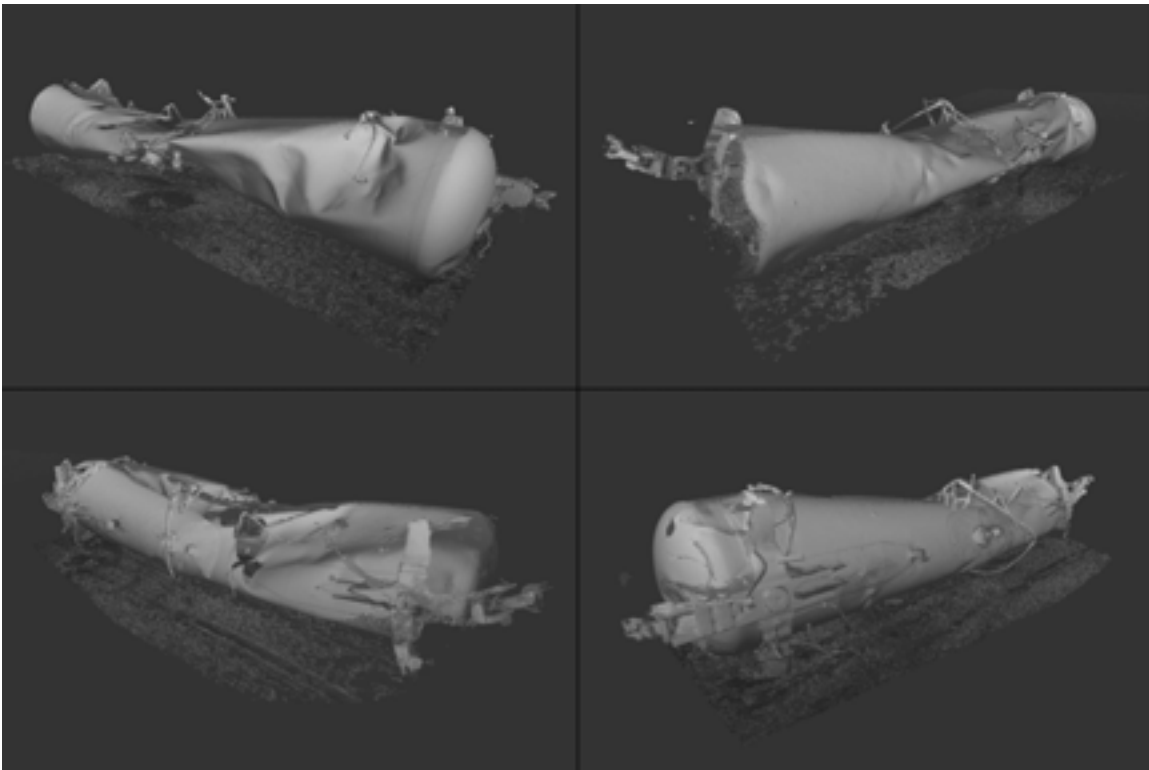


Figure 6: Vues obliques de visualisations par balayage laser du wagon-citerne ACFX 71505

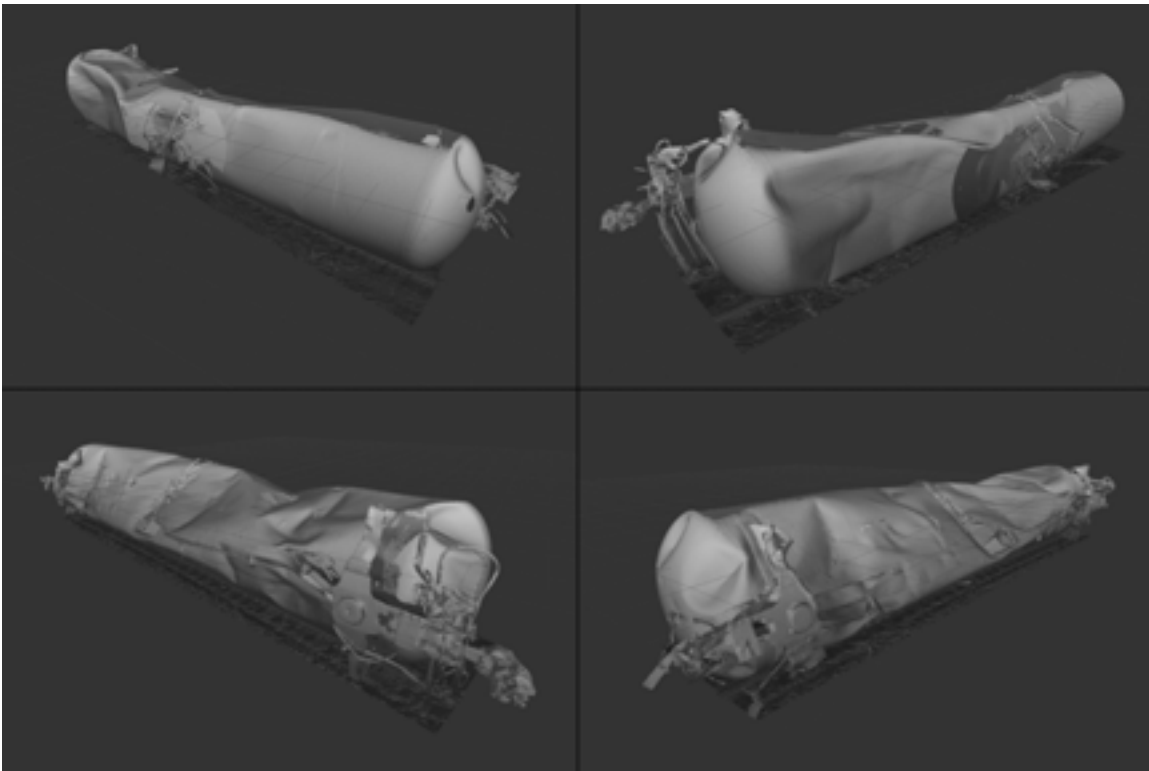


Figure 7: Vues obliques de visualisations par balayage laser du wagon-citerne CTCX 735572

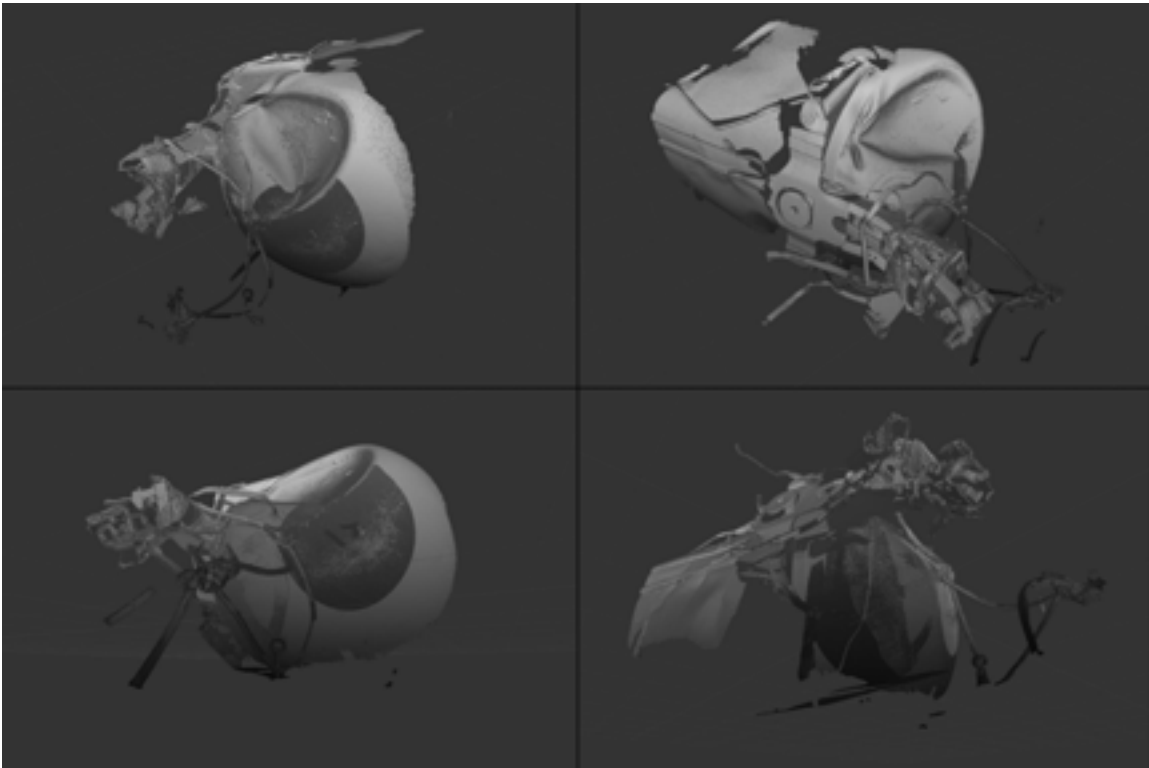


Figure 8: Vues obliques de visualisations par balayage laser du wagon-citerne WFIX 130664

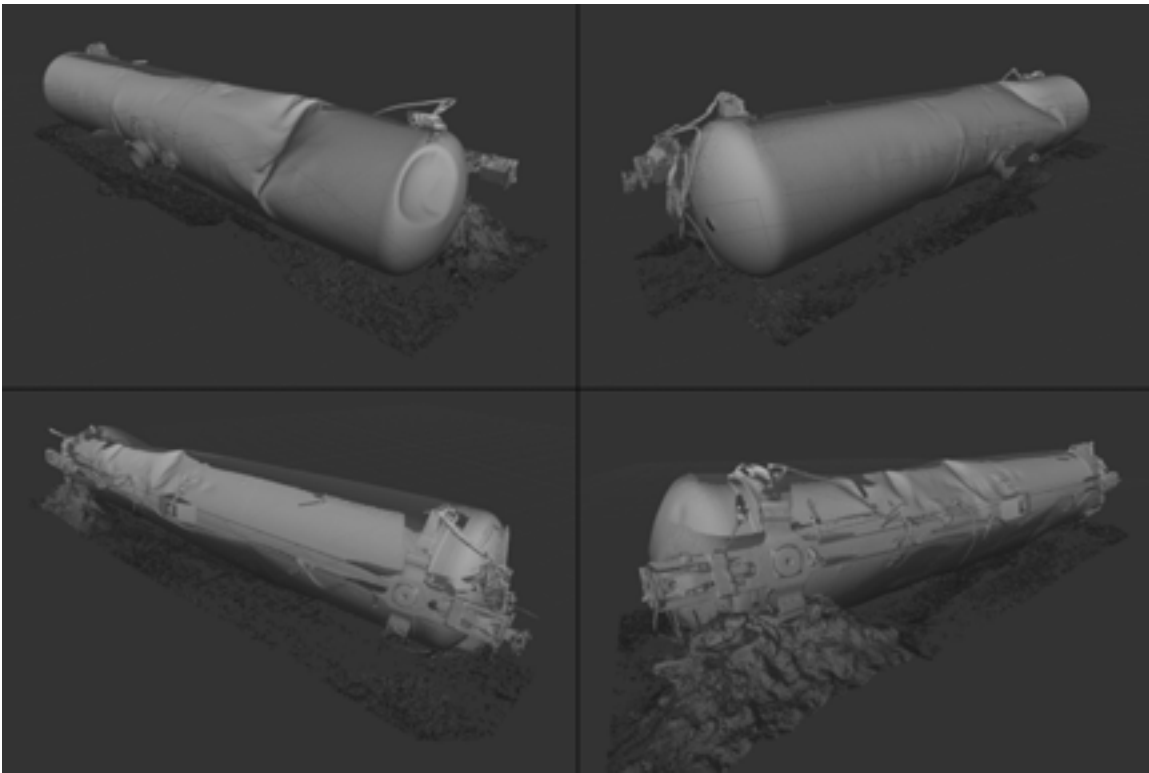


Figure 9: Vues obliques de visualisations par balayage laser du wagon-citerne TILX 316533

Annexe A: Balayage laser représentatif pour un modèle d'analyse des erreurs

Un balayage laser a été effectué sur un wagon-citerne représentatif (le NATX 310595). Ce balayage avait pour but de fournir une comparaison entre les données du balayage des wagons-citernes endommagés et celles d'un wagon-citerne non endommagé. Il en a résulté un modèle d'analyse des erreurs que l'on a utilisé pour comparer les données du balayage de chaque wagon avec les données recueillies sur son wagon de référence respectif.

On a construit un modèle CAO 3D pour le comparer avec le wagon-citerne NATX 310595 à partir des dimensions provenant du dessin d'agencement A13313 de Greenbrier Manufacturing Operations, selon le CDC L114001. Les dimensions nécessaires à la construction du modèle CAO 3D étaient les suivantes : longueur de la citerne : 16,448 m (53 pi 11 9/16 po); pente de la citerne : 1,194 degré; tête ellipsoïdale à rapport 2:1; diamètre extérieur de 3,048 m (10 pieds 0 pouce).

On a construit aussi un modèle 3D du wagon NATX 310595 à partir des données du balayage laser pour mesurer les sections transversales et le volume. En l'absence de déformation attribuable aux chocs, on s'est servi des sections transversales à chaque bout et au centre du wagon-citerne pour comparer avec la section transversale du wagon de référence du CDC L114001. Les figures A-1 et A-2 montrent les vues du modèle 3D du wagon NATX 310595 et de ses sections transversales.

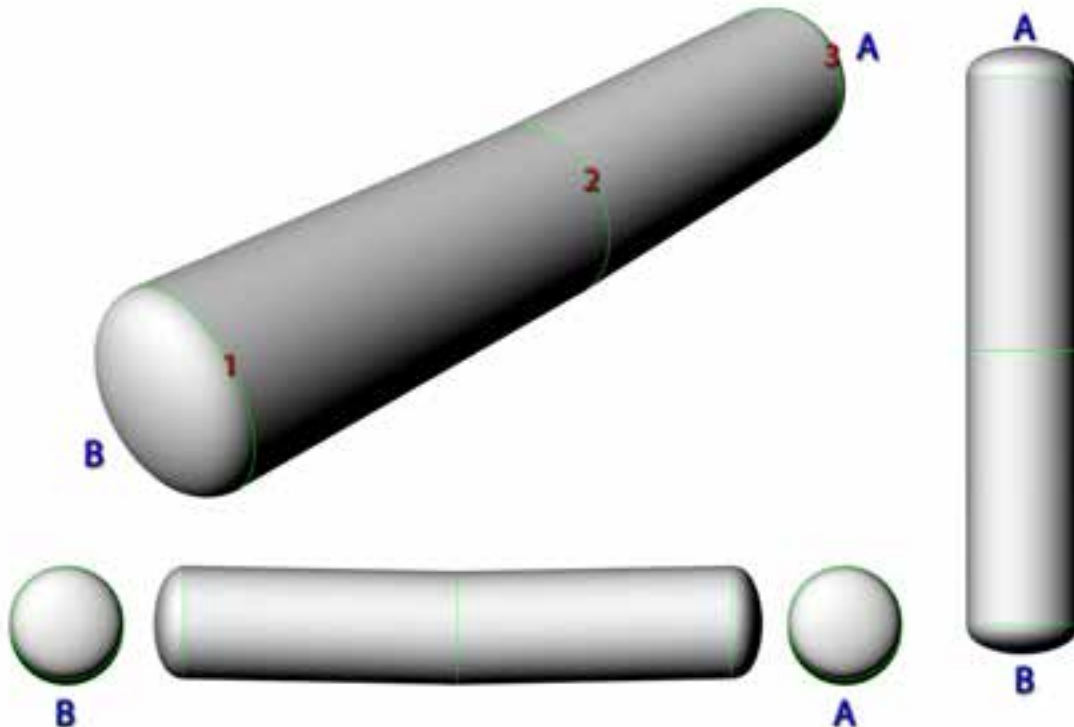


Figure A-1: Vues obliques du volume de surface du wagon-citerne NATX 310595 montrant les bouts A et B marqués

Seul l'extérieur de tous les wagons-citernes a fait l'objet d'un balayage en vue d'une analyse comparative des volumes. Les estimés relatifs au volume étaient fondés uniquement sur les dimensions extérieures. La différence en matière de volume attribuable à l'épaisseur des coques et des têtes des wagons-citernes était faible par rapport au volume entier des wagons-citernes.

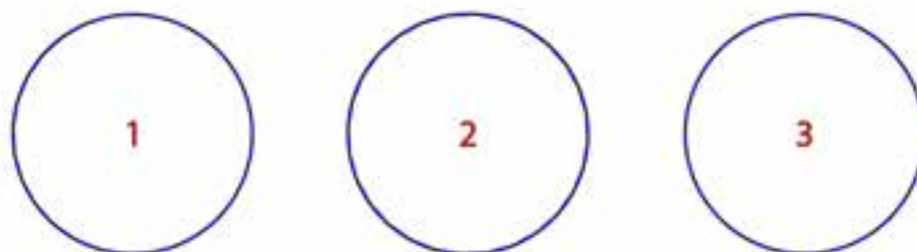


Figure A-2: Sections transversales marquées pour le wagon-citerne NATX 310595, avec représentation sous forme de pointillés des sections transversales pour un wagon-citerne non endommagé du CDC L114001

Tableau A-1: Sections transversales du wagon NATX 310595

Section transversale	Emplacement (m)	Superficie (m ²)	Superficie (m ²) selon le CDC L114001	Aire Δ (m ²)	Différence en %
1	+7,4	7,33	7,30	+0,03	+0,4
2	0	7,38	7,30	+0,08	+1,1
3	-7,4	7,31	7,30	+0,01	+0,1

Le tableau A-1 indique les mesures pour le wagon-citerne NATX 310595, par comparaison avec le wagon-citerne de référence non endommagé du CDC L114001.

Comme ce wagon-citerne ne présentait aucune rupture pouvant déformer sa coque, on peut représenter le changement dans le volume en comparant sur l'ensemble de la coque le volume du wagon de référence avec celui du wagon-citerne susmentionné.

Volume de section du wagon NATX 310595 : 117,03 m³

Volume de section selon le CDC L114001 : 116,32 m³

Volume Δ de section : +0,7 m³

Différence en % : +0,6 %

Il y avait une augmentation négligeable de la longueur du wagon NATX 310595 par rapport au wagon de référence.

Longueur du wagon NATX 310595 : 16,45 m (53 pi 11 3/4 po)

Longueur selon le CDC L114001 : 16,45 m (53 pi 11 9/16 po)

Longueur Δ : +0,01 m (3/16 po)

Différence en % : +0,03 %

L'erreur dans les mesures du volume du wagon-citerne représentatif était faible par rapport aux changements de volume observés et mesurés sur les wagons-citernes endommagés.

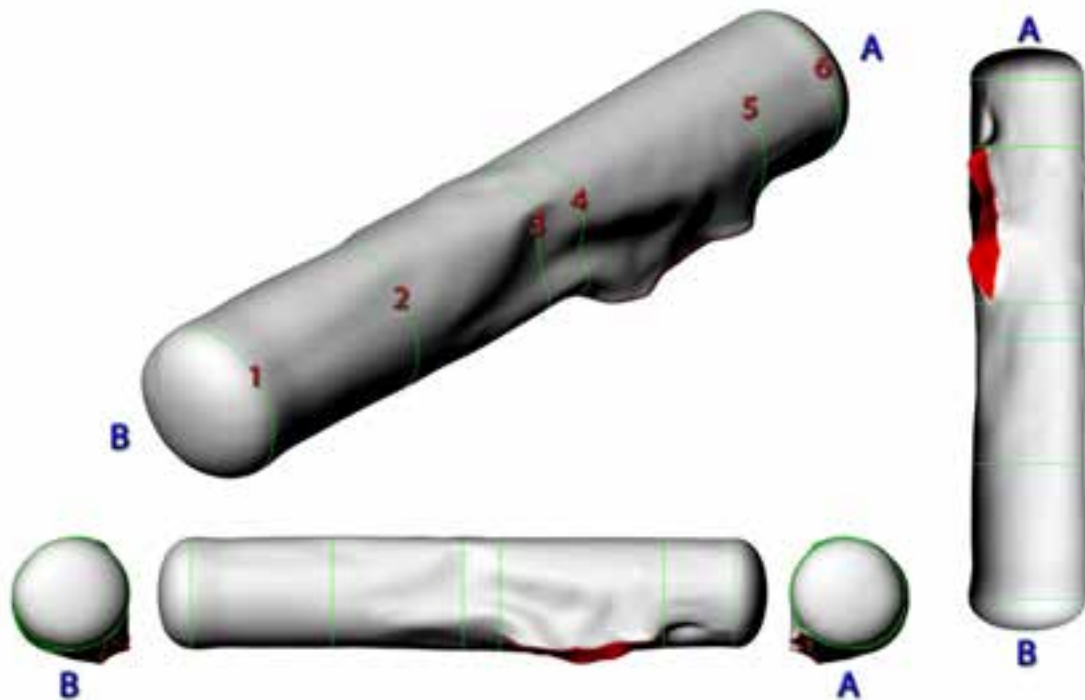
Annexe B: Résultats de l'analyse dimensionnelle des wagons-citernes**B-1.0 WFIX 130608**

Figure B-1: Vues obliques du volume de surface reconstruit du wagon-citerne WFIX 130608 montrant les bouts A et B avec sections transversales marquées

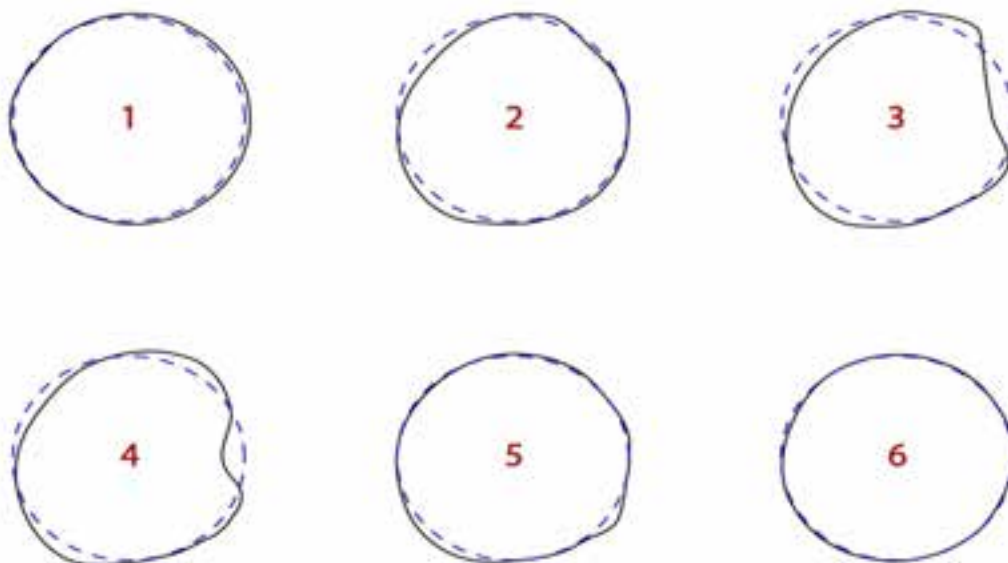


Figure B-2: Sections transversales marquées pour le wagon-citerne WFIX 130608, avec représentation sous forme de pointillés des sections transversales pour un wagon-citerne non endommagé du CDC L116012A

Tableau B-1: Sections transversales du wagon WFIX 130608

Section transversale	Emplacement (m) ⁵	Superficie (m ²)	Superficie (m ²) selon le CDC L116012A	Aire Δ (m ²)	Différence en %
1	+7,3	7,70	7,33	+0,37	+5,0
2	+3,5	7,41	7,33	+0,08	+1,1
3	0	7,23	7,33	-0,10	-1,4
4	-1	7,45	7,33	+0,12	+1,6
5	-5,4	7,63	7,33	+0,30	+4,1
6	-7,3	7,36	7,33	+0,03	+0,4

Des sections transversales multiples ont été prises le long de chaque balayage de wagon-citerne là où une déformation s'était produite, de façon à produire la surface nécessaire pour l'analyse des volumes. Les sections transversales utilisées dans l'annexe B ont servi à afficher seulement les déformations importantes.

L'**aire Δ** est le changement calculé dans la section transversale, qui passe de celle du wagon-citerne de référence non endommagé du CDC L116012A à la section transversale définie par les données du nuage de points de balayage laser pour le wagon WFIX 130608. La **différence en %** est le pourcentage de différence entre les deux sections transversales que l'on calcule en divisant l'**aire Δ** par la section transversale du wagon de référence.

En raison de la rupture de la coque au bout A, il n'a pas été possible de calculer le volume du wagon WFIX 130608 sur toute la surface construite à partir du nuage de points balayés au laser. La rupture de la coque a entraîné une expansion déformée de la coque sur la longueur de la rupture, de sorte que les sections transversales dans cette région ne sont pas représentatives du volume réel du wagon-citerne avant la rupture.

Autant pour le wagon de référence que pour le wagon balayé au laser, on peut représenter le changement de volume en comparant le volume de la surface mesurée du bout B du wagon-citerne avec la section transversale à l'emplacement -1 m sur la longueur du wagon. La différence en pourcentage dans le volume de cette sous-section du wagon-citerne est représentative de la différence en pourcentage dans le volume sur la totalité du wagon-citerne.

Volume de section du wagon WFIX 130608 : 66,49 m³

Volume de section selon le CDC L116012A : 65,51 m³

Volume Δ en section : +0,98 m³

Différence en % : +1,50 %

Il n'y avait qu'une réduction mineure dans la longueur du wagon WFIX 130608 par rapport à la longueur du wagon-citerne non endommagé.

Longueur du wagon WFIX 130608 : 16,36 m (53 pi 7 31/32 po)

⁵ Tout au long du présent rapport, l'axe longitudinal du wagon-citerne est défini à partir de zéro, point placé au robinet de déchargement par le bas; la direction positive est orientée vers le bout B du wagon-citerne et la direction négative, vers le bout A.

Longueur selon le CDC L116012A : 16,40 m (53 pi 9 13/16 po)

Longueur Δ : -0,05 m (1 27/32 po)

Différence en % : -0,29 %

Il a fallu ignorer la partie du wagon-citerne près du bout A lors de la mesure du volume (voir la figure B-3). Après la rupture de la citerne, la déformation aurait créé un espace dans la section transversale de cette région du wagon; le volume s'en trouvait donc modifié.

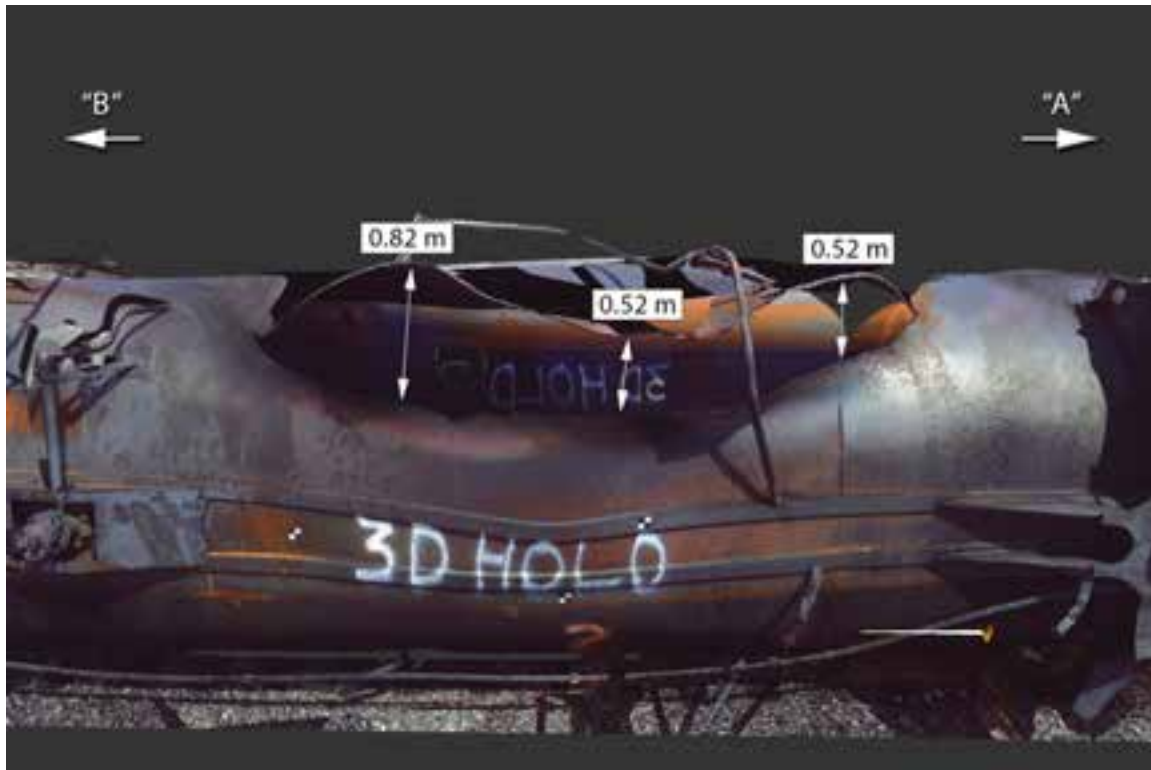


Figure B-3: Rupture le long du wagon-citerne WFIX 130608

La rupture présentait une plus grande séparation quand on se déplaçait de son extrémité au bout A en direction du milieu du wagon. La distance de séparation mesurée jusqu'à mi-chemin le long de la rupture était de 0,52 m, avec certaines fluctuations, pour s'élargir jusqu'à 0,82 m à l'approche de l'extrémité de la rupture au bout B. La rupture était longue d'environ 4,4 mètres et sa superficie mesurée de quelque 2,5 m².

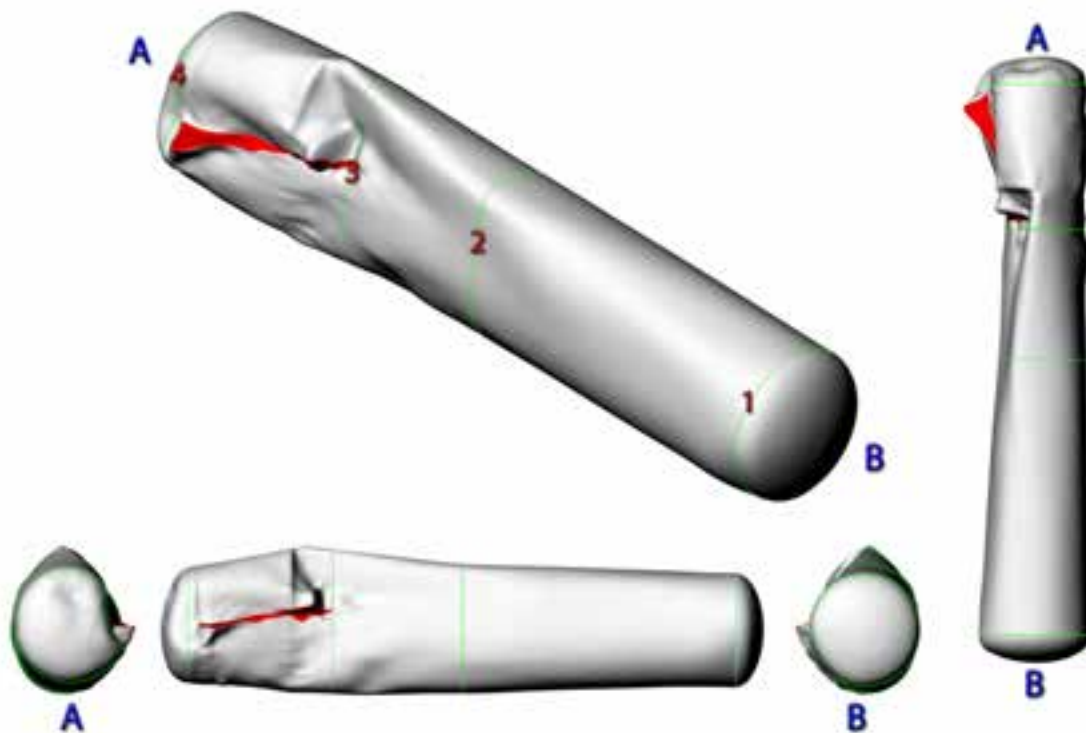
B-2.0 TILX 316570

Figure B-4: Vues obliques du volume de surface reconstruit du wagon-citerne TILX 316570 montrant les bouts A et B avec sections transversales marquées

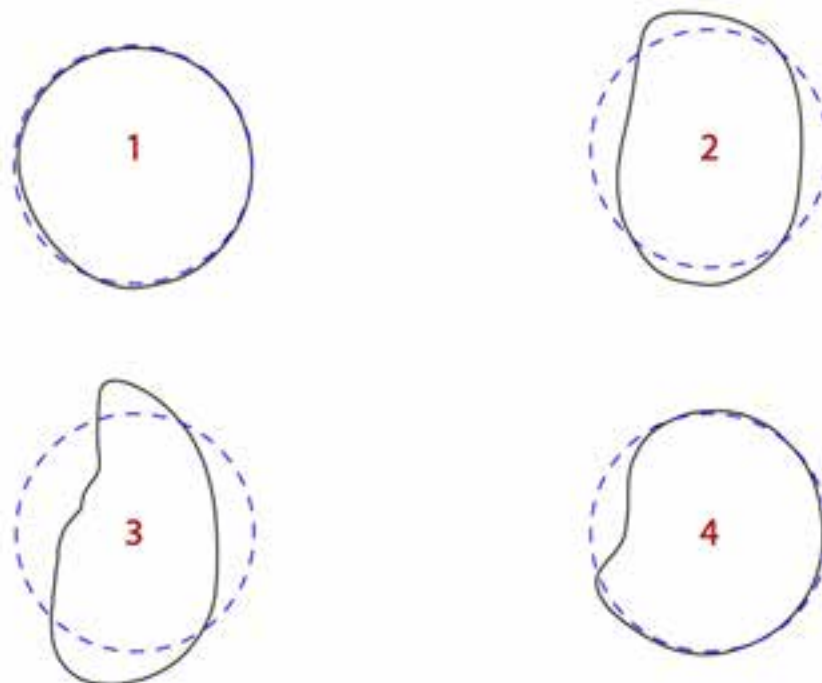


Figure B-5: Sections transversales marquées pour le wagon-citerne TILX 316570, avec représentation sous forme de pointillés des sections transversales pour un wagon-citerne non endommagé du CDC L116012A

Tableau B-2: Sections transversales du wagon TILX 316570

Section transversale	Emplacement (m)	Superficie (m ²)	Superficie (m ²) selon le CDC L116012A	Aire Δ (m ²)	Différence en %
1	+7,4	7,16	7,33	-0,17	-2,3
2	0	6,77	7,33	-0,56	-7,6
3	-3,5	6,07	7,33	-1,26	-17,2
4	-7,4	6,82	7,33	-0,51	-7,0

Le tableau B-2 indique les mesures pour le wagon-citerne TILX 316570, par comparaison avec le wagon-citerne de référence non endommagé du CDC L116012A.

Il n'a pas été possible de calculer le volume du wagon TILX 316570 sur toute la surface construite à partir du nuage de points balayés au laser en raison de la rupture de la coque au bout A. La rupture s'est traduite par une expansion de déformation de la coque, de sorte que les sections transversales dans cette région sont représentatives de l'état actuel du wagon-citerne et non de son volume réel avant la rupture.

Autant pour le wagon de référence que pour le wagon balayé au laser, on peut représenter le changement de volume en comparant le volume de la surface mesurée du bout B du wagon-citerne avec la section transversale à l'emplacement -3,5 m le long de la longueur du wagon. La différence en pourcentage dans le volume de cette sous-section du wagon-citerne est représentative de la différence en pourcentage dans le volume de tout le wagon, puisque la déformation le long de la totalité de celui-ci se comporterait de manière similaire.

Volume de section du wagon TILX 316570 : 79,24 m³
 Volume de section selon le CDC L116012A : 83,88 m³
 Volume Δ en section : -4,63 m³
 Différence en % : -5,52 %

Il n'y avait qu'une réduction mineure dans la longueur du wagon TILX 316570 par rapport à la longueur du wagon-citerne non endommagé.

Longueur du wagon TILX 316570 : 16,28 m (53 pi 4 13/16 po)
 Longueur selon le CDC L116012A : 16,40 m (53 pi 9 13/16 po)
 Longueur Δ : -0,13 m (5 po)
 Différence en % : -0,77 %

Il a fallu ignorer la rupture sur le côté gauche du wagon-citerne près du bout A lors de la mesure du volume dans cette région du wagon-citerne (voir la figure B-6). Après la rupture de la citerne, la déformation aurait créé un espace dans la section transversale de cette région du wagon; le volume à cet endroit s'en trouvait donc modifié.

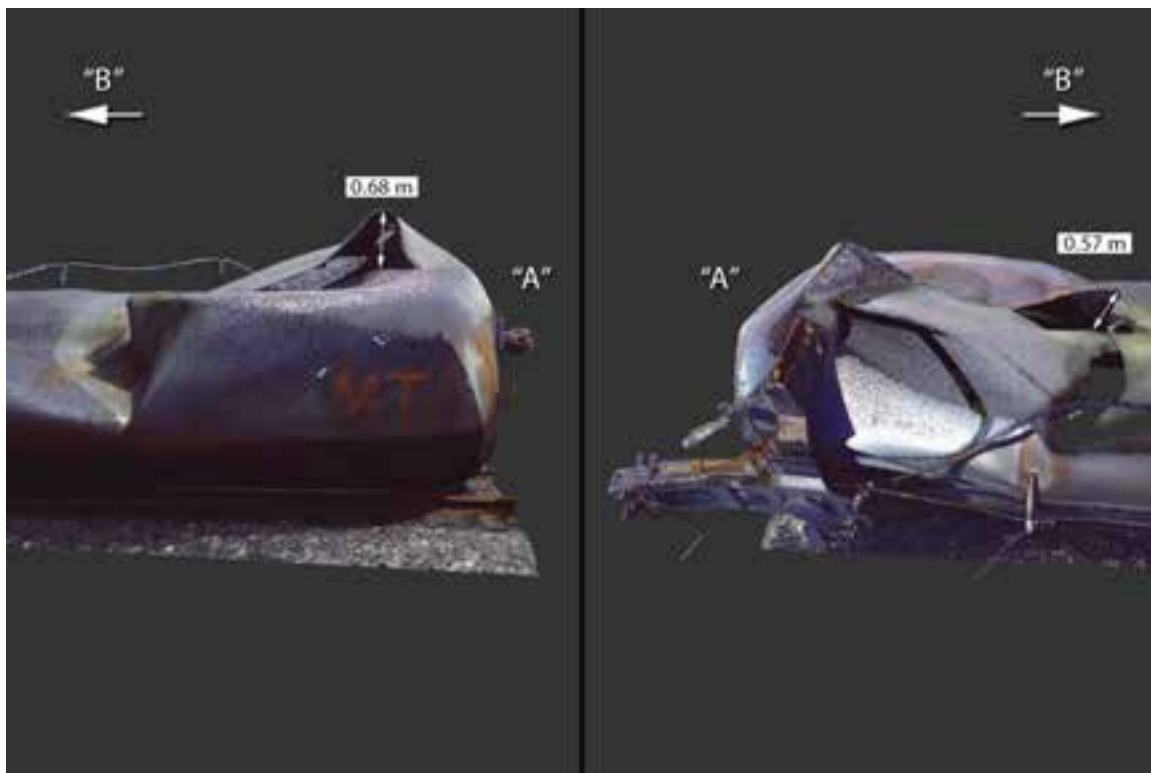


Figure B-6: Rupture le long du wagon-citerne TILX 316570

Le volume du wagon-citerne diminuait depuis le bout B vers le bout A. Une rupture se dirigeant vers le bout A de la coque a pris naissance à environ 3,5 m du centre du wagon-citerne. La rupture, dans sa partie supérieure au bout A, dépasse de 0,68 m la déformation, puis fait place à une partie inférieure qui s'ouvre sur une hauteur de 0,57 m du côté du bout B. Dans la partie supérieure de la citerne, un pli de flambage s'étendait vers le haut en raison de la compression sur le côté gauche de la citerne. Après la rupture, la section transversale de la citerne retrouve sa forme initiale près du bout B. La rupture était longue d'environ 3,9 m et sa superficie mesurée de quelque 1,1 m².

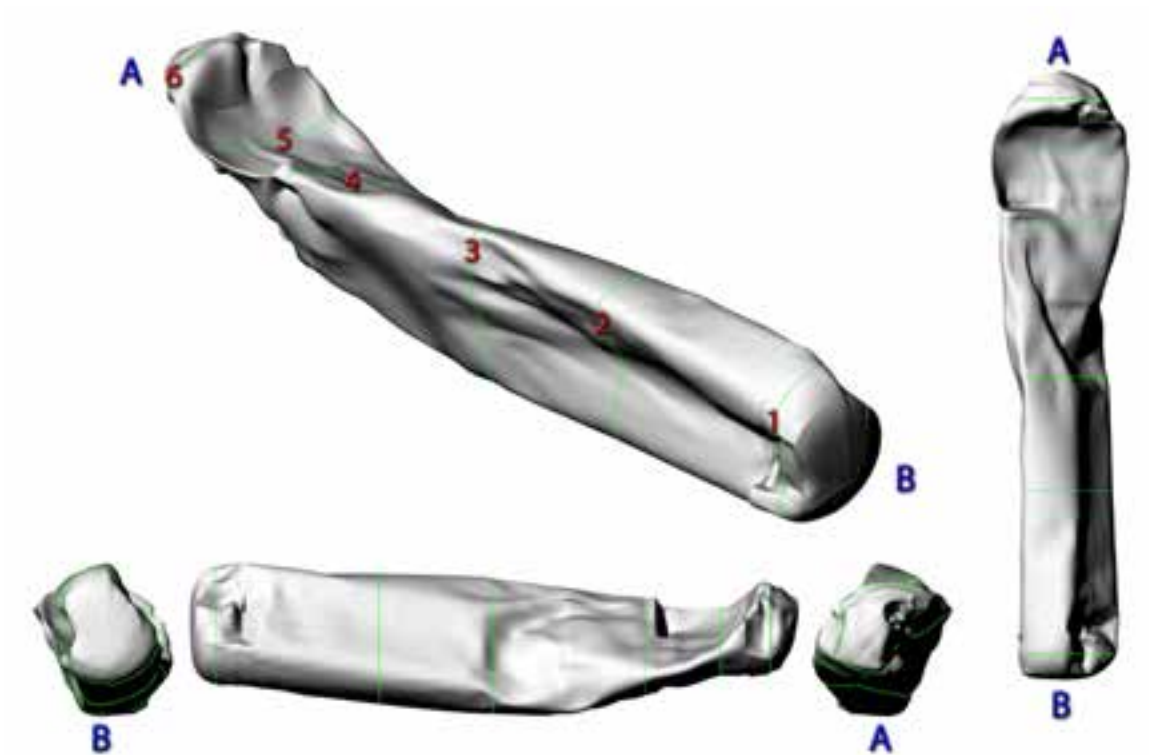
B-3.0 ACFX 76605

Figure B-7: Vues obliques du volume de surface reconstruit du wagon-citerne ACFX 76605 montrant les bouts A et B avec sections transversales marquées

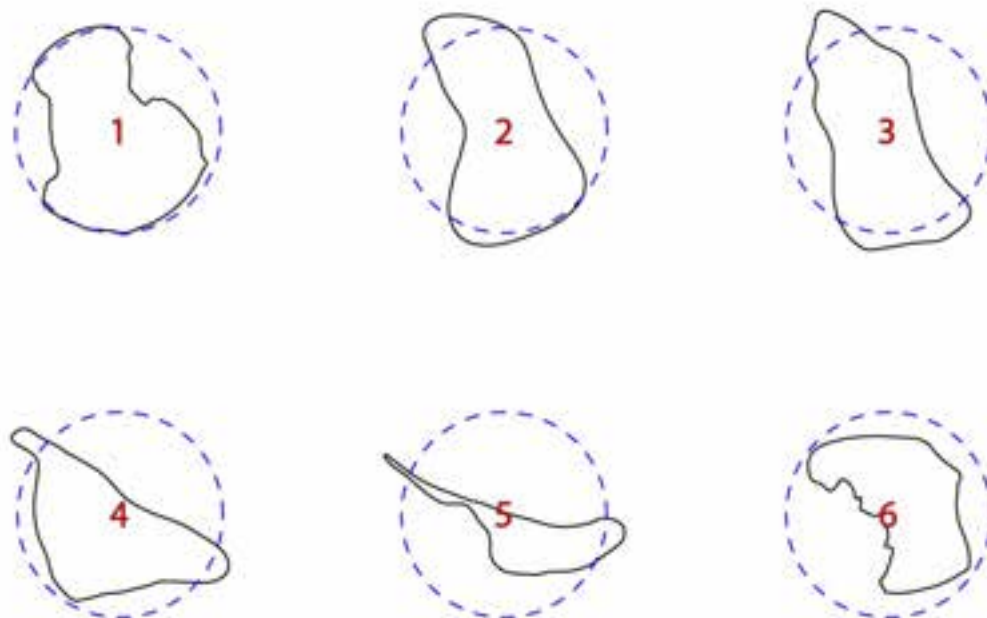


Figure B-8: Sections transversales marquées pour le wagon-citerne ACFX 76605, avec représentation sous forme de pointillés des sections transversales pour un wagon-citerne non endommagé du CDC A841016

Tableau B-3: Sections transversales du wagon ACFX 76605

Section transversale	Emplacement (m)	Superficie (m ²)	Superficie (m ²) selon le CDC A841016	Aire Δ (m ²)	Différence en %
1	+7,0	5,02	7,30	-2,28	-31,2
2	+3,0	5,09	7,30	-2,21	-30,3
3	0	4,93	7,30	-2,37	-32,5
4	-4,0	4,06	7,30	-3,24	-44,4
5	-6,0	1,93	7,30	-5,37	-73,6
6	-7,25	3,52	7,30	-3,78	-51,8

Le tableau B-3 indique les mesures pour le wagon-citerne ACFX 76605, par comparaison avec le wagon-citerne de référence non endommagé du CDC A841016.

Comme ce wagon-citerne présentait une rupture mineure, qui n'a pas déformé sa coque, on peut représenter le changement dans le volume en comparant sur l'ensemble de la coque le volume du wagon de référence avec celui du wagon-citerne susmentionné.

Volume du wagon ACFX 76605 : 69,76 m³

Volume selon le CDC A841016 : 115,71 m³

Volume Δ en section : -45,95 m³

Différence en pourcentage : -39,7 %

Il n'y avait qu'une réduction mineure dans la longueur du wagon ACFX 76605 par rapport à la longueur du wagon-citerne non endommagé.

Longueur du wagon ACFX 76605 : 15,97 m (52 pi 4 21/32 po)

Longueur selon le CDC A841016 : 16,42 m (53 pi 10 1/2 po)

Longueur Δ : -0,45 m (1 pi 5 27/32 po)

Différence en % : -2,76 %

La superficie des sections transversales du wagon ACFX 76605 avait diminué de près des trois quarts, à quelque 1 mètre du bout A. La compression de la coque avait réduit le volume de plus du tiers de celui du wagon-citerne non endommagé.

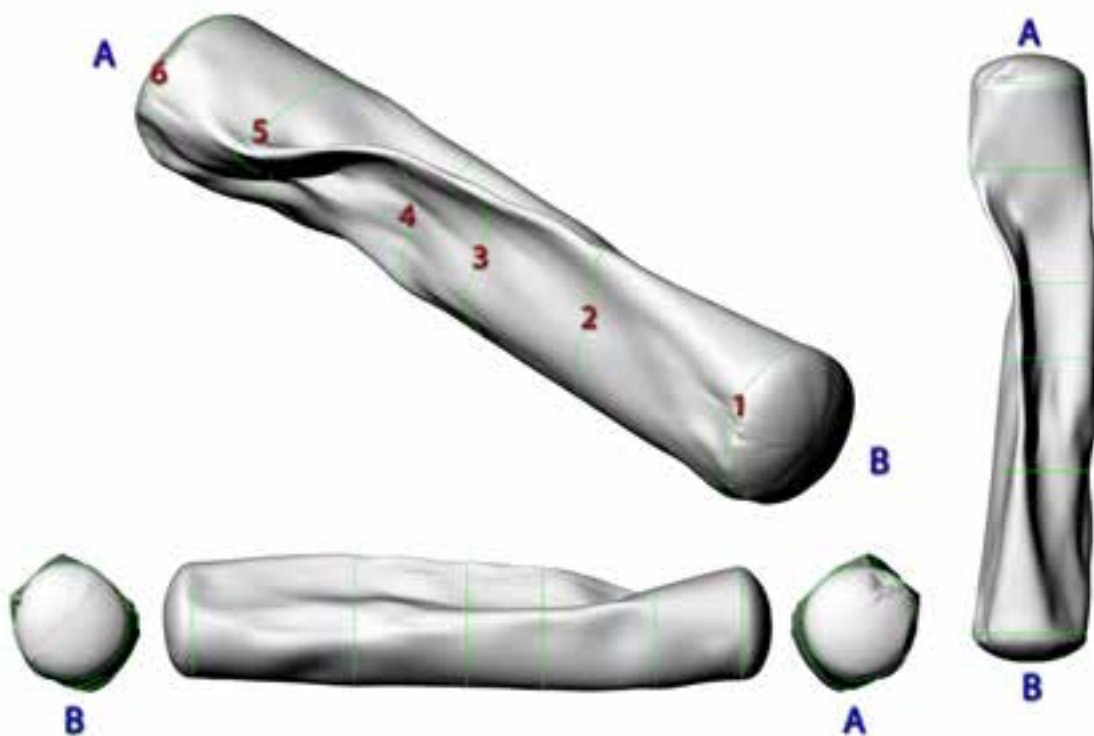
B-4.0 WFIX 130545

Figure B-9: Vues obliques du volume de surface reconstruit du wagon-citerne WFIX 130545 montrant les bouts A et B avec sections transversales marquées

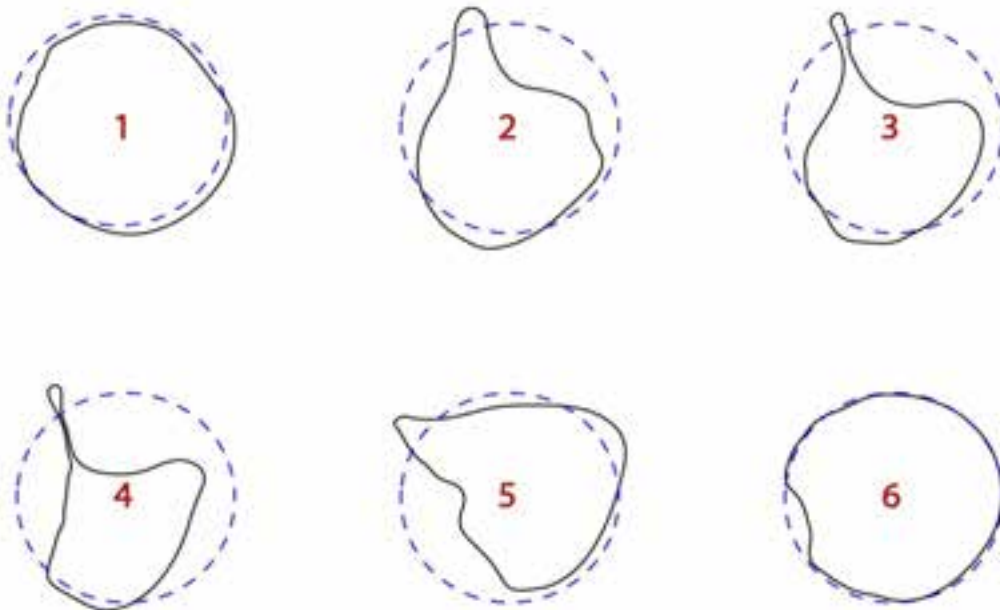


Figure B-10: Sections transversales marquées pour le wagon-citerne WFIX 130545, avec représentation sous forme de pointillés des sections transversales pour un wagon-citerne non endommagé du CDC L116012A

Tableau B-4: Sections transversales du wagon WFIX 130545

Section transversale	Emplacement (m)	Superficie (m ²)	Superficie (m ²) selon le CDC L116012A	Aire Δ (m ²)	Différence en %
1	+7,3	7,16	7,33	-0,17	-2,3
2	+3,0	5,38	7,33	-1,95	-26,6
3	0	4,41	7,33	-2,92	-39,8
4	-2,0	3,46	7,33	-3,87	-52,8
5	-5,0	5,62	7,33	-1,71	-23,3
6	-7,3	6,93	7,33	-0,40	-5,5

Le tableau B-4 indique les mesures pour le wagon-citerne WFIX 130545, par comparaison avec le wagon-citerne de référence non endommagé du CDC L116012A.

Comme ce wagon-citerne ne présentait aucune rupture pouvant déformer sa coque, on peut représenter le changement dans le volume en comparant sur l'ensemble de la coque le volume du wagon de référence avec celui du wagon-citerne susmentionné.

Volume du wagon WFIX 130545 : 85,21 m³
 Volume selon le CDC L116012A : 116,43 m³
 Volume Δ en section : -31,22 m³
 Différence en % : -26,8 %

Il n'y avait qu'une réduction mineure dans la longueur du wagon WFIX 130545 par rapport à la longueur du wagon-citerne de référence.

Longueur du wagon WFIX 130545 : 16,14 m (52 pi 11 9/16 po)
 Longueur selon le CDC L116012A : 16,40 m (53 pi 9 13/16 po)
 Longueur Δ : -0,26 m (10 1/4 po)
 Différence en % : -1,58 %

Le rayon de courbure mesuré à la pointe du pli de flambage prononcé dans les sections transversales 3 et 4 (au centre du wagon-citerne et 2 m vers le bout A) était de 0,10 et 0,09 m respectivement; le rayon de courbure pour la section transversale du wagon-citerne de référence était de 1,524 m.

La déformation avait modifié sensiblement le volume du wagon WFIX 130545. À quelque 2 m du centre du wagon-citerne vers le bout A, la superficie des sections transversales avait diminué de près de moitié. La compression de la coque avait à son tour réduit le volume de presque du tiers par rapport à celui du wagon-citerne de référence.

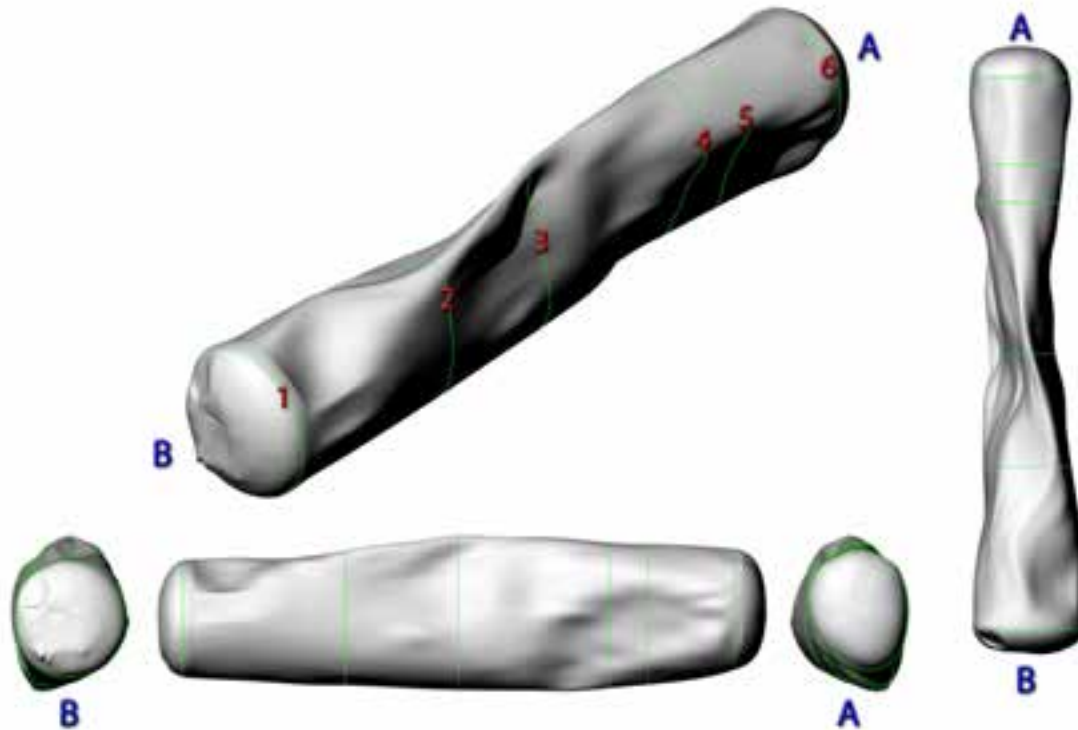
B-5.0 ACFX 71505

Figure B-11: Vues obliques du volume de surface reconstruit du wagon-citerne ACFX 71505 montrant les bouts A et B avec sections transversales marquées

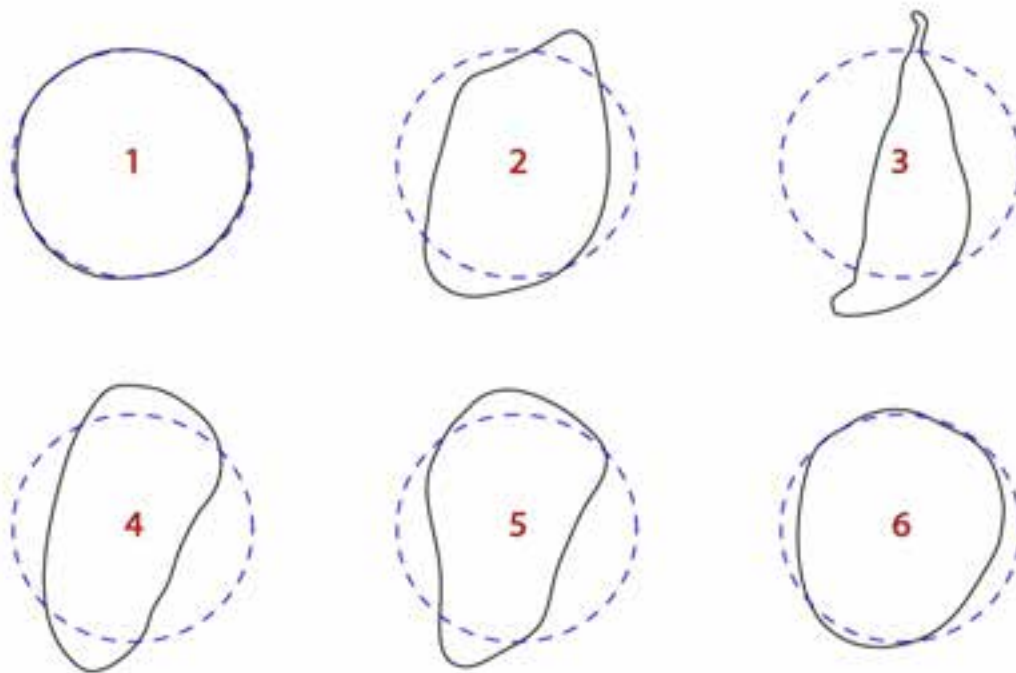


Figure B-12: Sections transversales marquées pour le wagon-citerne ACFX 71505, avec représentation sous forme de pointillés des sections transversales pour un wagon-citerne non endommagé du CDC A841016

Le temps limité n'a pas permis de balayer au laser le bout A du wagon ACFX 71505 en détail. Pour effectuer l'analyse du volume de ce wagon-citerne, on a construit le bout A au moyen de la courbure provenant des points à cette extrémité du balayage laser, le tout combiné à l'ellipsoïde de rapport 2:1 pour la tête de la citerne selon le CDC A841016.

Tableau B-5: Sections transversales du wagon ACFX 71505

Section transversale	Emplacement (m)	Superficie (m ²)	Superficie (m ²) selon le CDC A841016	Aire Δ (m ²)	Différence en %
1	+7,3	7,20	7,30	-0,10	-1,4
2	+3,0	6,26	7,30	-1,04	-14,2
3	0	3,41	7,30	-3,89	-53,3
4	-4,0	5,79	7,30	-1,51	-20,7
5	-5,0	5,77	7,30	-1,53	-21,0
6	-7,3	6,54	7,30	-0,76	-10,4

Le tableau B-5 indique les mesures pour le wagon-citerne ACFX 71505, par comparaison avec le wagon-citerne de référence non endommagé du CDC A841016.

Comme ce wagon-citerne présentait une rupture mineure, qui n'a pas déformé sa coque extérieure, on peut représenter le changement dans le volume en comparant sur l'ensemble de la coque le volume du wagon de référence avec celui du wagon-citerne susmentionné.

Volume du wagon ACFX 71505 : 89,34 m³
 Volume selon le CDC A841016 : 115,71 m³
 Volume Δ en section : -26,37 m³
 Différence en % : -22,8 %

Il y avait une réduction de la longueur du wagon ACFX 71505 par rapport à la longueur du wagon-citerne de référence.

Longueur du wagon ACFX 71505 : 16,02 m (52 pi 6 13/16 po)
 Longueur selon le CDC A841016 : 16,42 m (53 pi 10 1/2 po)
 Longueur Δ : -0,40 m (1 pi 3 11/16 po)
 Différence en % : -2,42 %

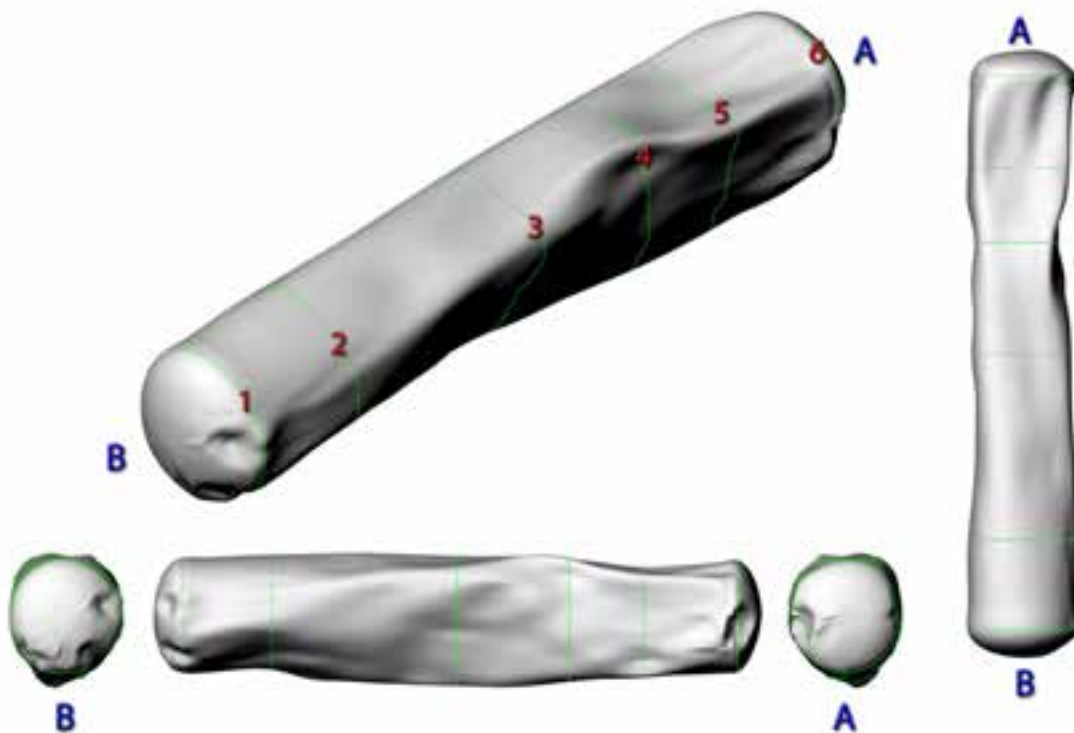
B-6.0 CTCX 735572

Figure B-13: Vues obliques du volume de surface reconstruit du wagon-citerne CTCX 735572 montrant les bouts A et B avec sections transversales marquées

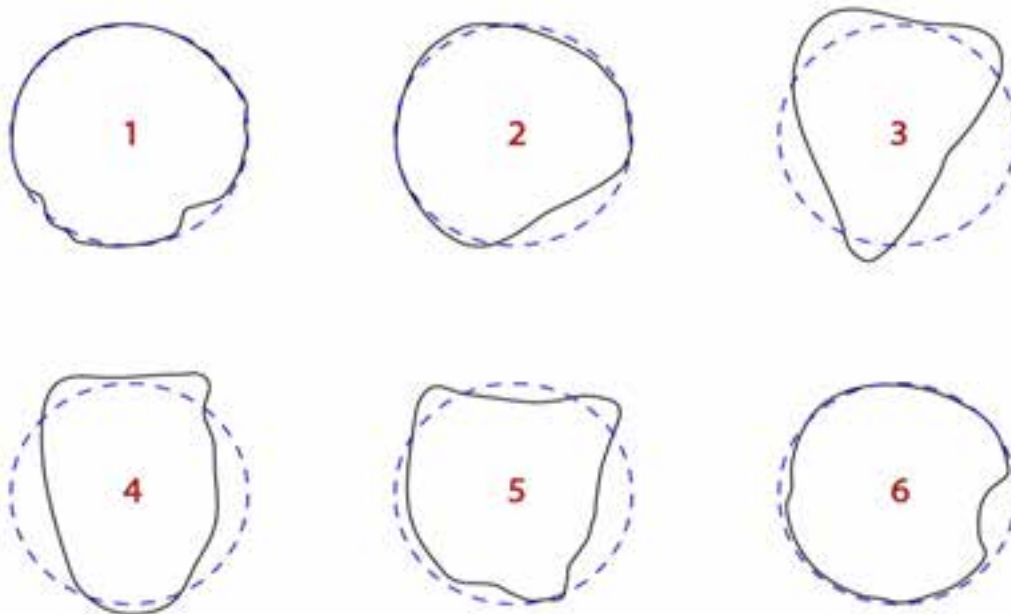


Figure B-14: Sections transversales marquées pour le wagon-citerne CTCX 735572, avec représentation sous forme de pointillés des sections transversales pour un wagon-citerne non endommagé du CDC L121031C

Tableau B-6: Sections transversales du wagon CTCX 735572

Section transversale	Emplacement (m)	Superficie (m ²)	Superficie (m ²) selon le CDC L121031C	Aire Δ (m ²)	Différence en %
1	+7,4	7,15	7,30	-0,15	-2,1
2	+5,0	6,86	7,30	-0,44	-6,0
3	0	6,01	7,30	-1,29	-17,7
4	-3,0	6,23	7,30	-1,07	-14,7
5	-5,0	6,12	7,30	-1,18	-16,2
6	-7,4	6,58	7,30	-0,72	-9,9

Le tableau B-6 indique les mesures pour le wagon-citerne CTCX 735572, par comparaison avec le wagon-citerne de référence non endommagé du CDC L121031C.

Comme ce wagon-citerne ne présentait aucune rupture pouvant déformer sa coque, on peut représenter le changement dans le volume en comparant sur l'ensemble de la coque le volume du wagon de référence avec celui du wagon-citerne susmentionné.

Volume du wagon CTCX 735572 : 102,73 m³

Volume selon le CDC L121031C : 115,71 m³

Volume Δ en section : -12,98 m³

Différence en % : -11,2 %

Il n'y avait qu'une réduction mineure dans la longueur du wagon CTCX 735572 par rapport au wagon-citerne de référence.

Longueur du wagon CTCX 735572 : 16,32 m (53 pi 6 19/32 po)

Longueur selon le CDC L121031C : 16,42 m (53 pi 10 1/2 po)

Longueur Δ : -0,10 m (3 29/32 po)

Différence en % : -0,60 %

B-7.0 WFIX 130664

Seul le bout A de ce wagon-citerne a été balayé au laser, étant donné que ce balayage visait à obtenir des renseignements plus détaillés sur les dommages subis par cette extrémité du wagon-citerne. Les points d'intérêt pour cette extrémité du wagon-citerne étaient la bosselure dans la tête de la citerne et la défaillance de la plaque de renfort de longrine avant.

Le bout A du wagon WFIX 130664 présentait une grande bosselure (figure B-15). Pour mesurer le volume de la bosselure, on a construit un modèle 3D de la tête du wagon-citerne non endommagé du CDC L116012A. La courbure des données du nuage de points a été appliquée au modèle 3D de façon à découper une section représentative de la bosselure attribuable aux chocs. Le volume mesuré de la bosselure était d'environ $0,64 \text{ m}^3$ (169 gallons américains). La bosselure avait une surface d'environ $2,8 \text{ m}^2$ (30 pi^2).

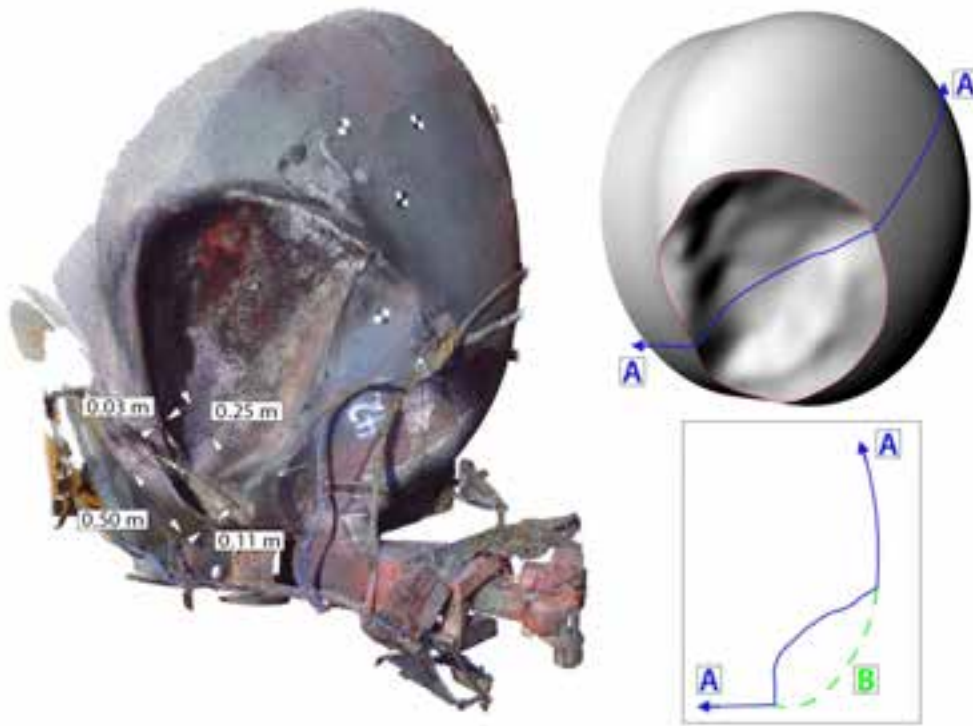


Figure B-15: Données du nuage de points pour le bout A (gauche) du wagon WFIX 130664 montrant la bosselure attribuable aux chocs, comparativement à la surface reconstruite (droite) utilisée pour mesurer le volume de la bosselure. Le profil A-A montre la section transversale le long de la bosselure attribuable aux chocs, la courbe B représentant le profil de la coque du wagon non endommagé du CDC L116012A.

La longrine tronquée du wagon WFIX 130664 s'était séparée au niveau de la soudure d'angle entre la plaque de renfort de longrine avant et la tête. Cette fissure s'était propagée à la soudure d'angle de la plaque de renfort de traverse pivot et jusque dans la soudure tête-coque. La partie inférieure de la fissure mesurait 0,50 m de longueur et avait une largeur maximale de 0,11 m. La partie supérieure de la fissure mesurait 0,25 m de longueur et avait une largeur maximale de 0,030 m.

Le long de l'axe du wagon-citerne, la mesure de l'intervalle entre la plaque de renfort de longrine avant et la tête a donné une valeur d'environ 5,3 cm (voir la figure B-16). La séparation de la plaque de renfort de longrine avant était plus grande le long de son bord supérieur et se réduisait en approchant de la partie inférieure de la plaque de renfort plus près de la longrine tronquée (voir la figure B-17).

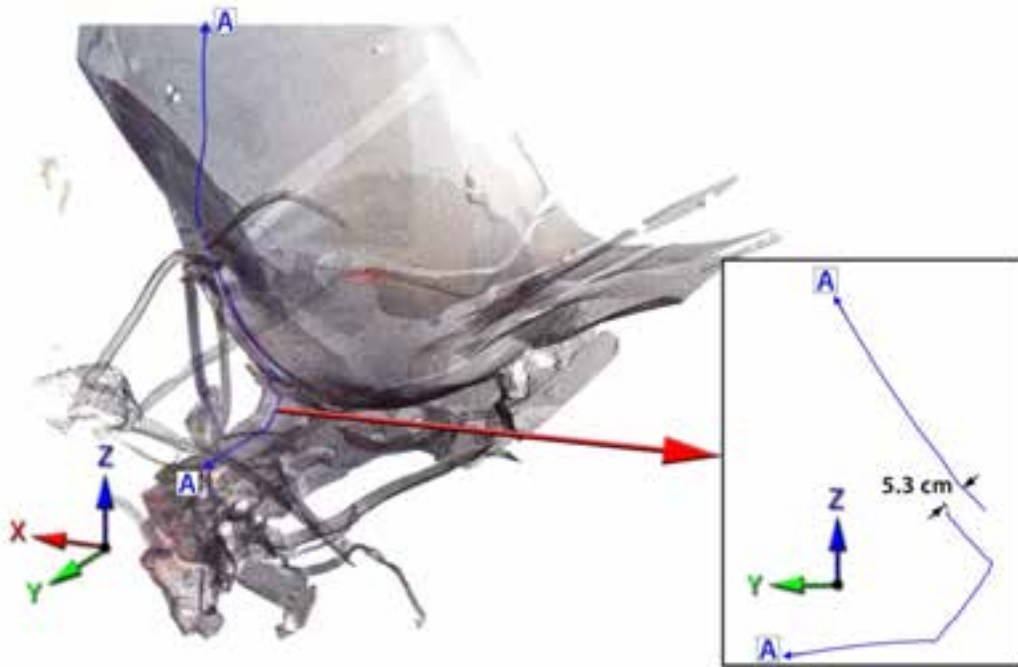


Figure B-16: Vue oblique du nuage de points pour le wagon-citerne WFIX 130664 montrant le bout A avec un profil transversal de la séparation de la plaque de renfort de longrine avant

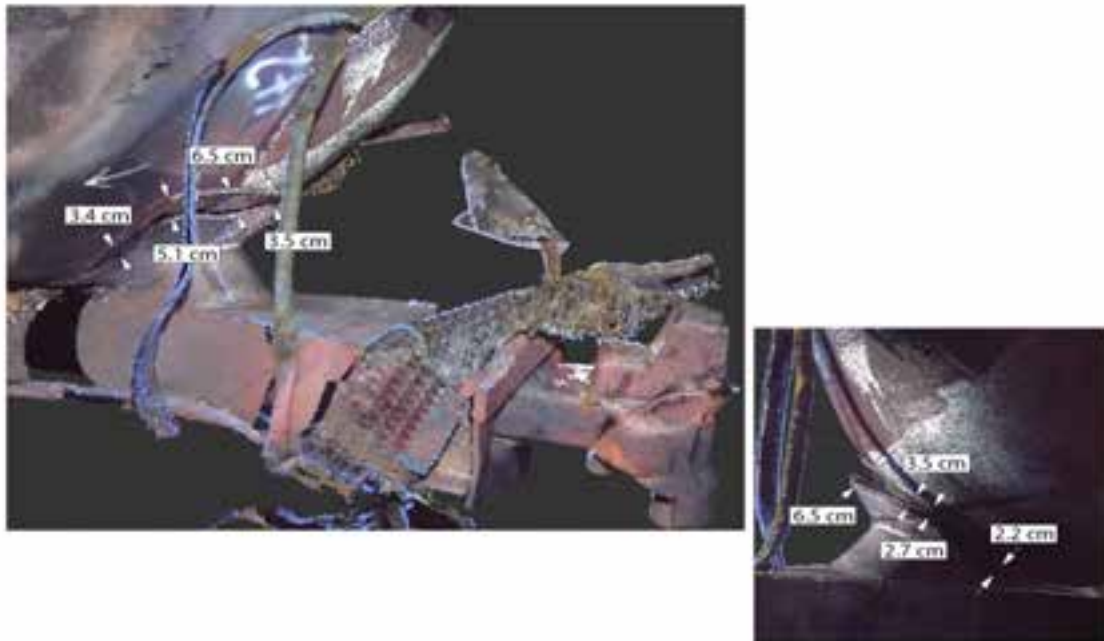


Figure B-17: Vues obliques droite et gauche de la longrine tronquée du wagon WFIX 130664 montrant la séparation de la plaque de renfort de longrine avant

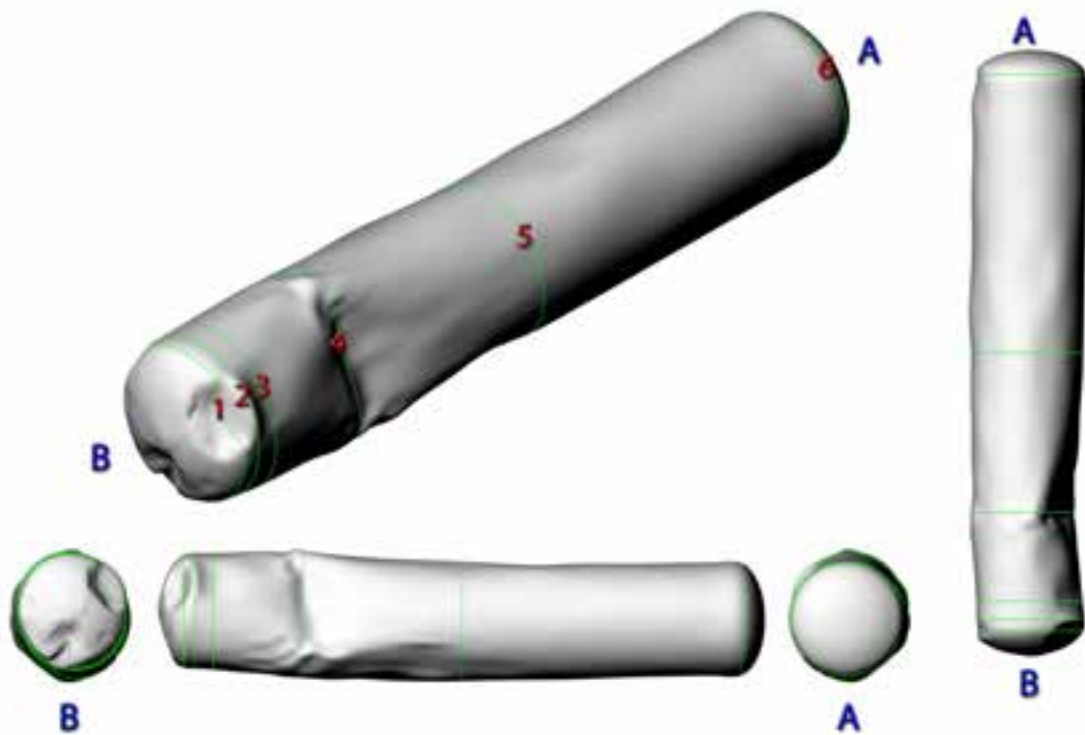
B-8.0 TILX 316533

Figure B-18: Vues obliques du volume de surface reconstruit du wagon-citerne TILX 316533 montrant les bouts A et B avec sections transversales marquées

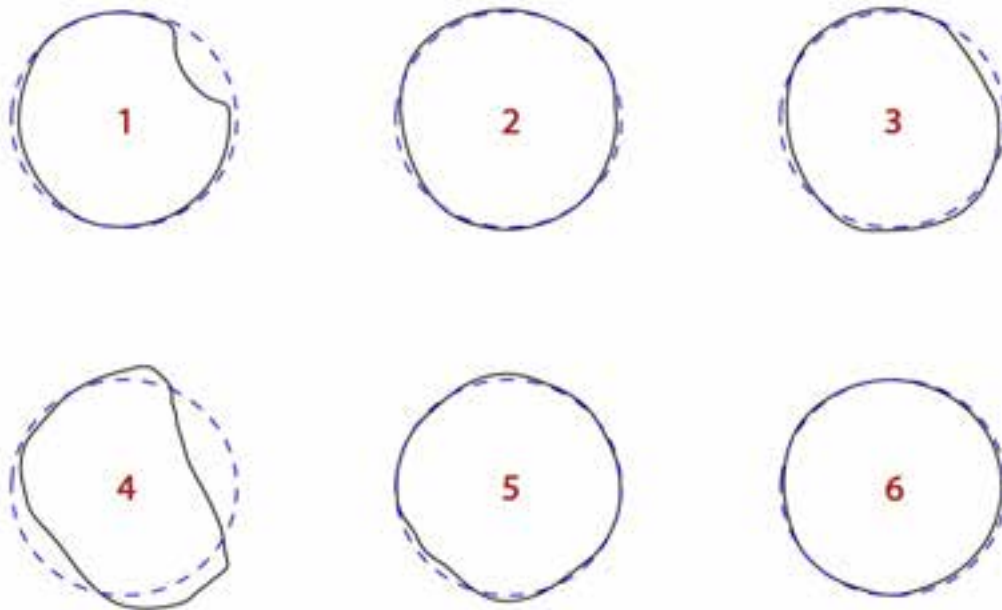


Figure B-19: Sections transversales marquées pour le wagon-citerne TILX 316533, avec représentation sous forme de pointillés des sections transversales pour un wagon-citerne non endommagé du CDC L116012A

Tableau B-7: Sections transversales du wagon TILX 316533

Section transversale	Emplacement (m)	Superficie (m ²)	Superficie (m ²) selon le CDC L116012A	Aire Δ (m ²)	Différence en %
1	+7,5	6,47	7,33	-0,86	-11,7
2	+7,2	7,27	7,33	-0,06	-0,8
3	+6,7	7,15	7,33	-0,18	-2,5
4	+4,3	6,49	7,33	-0,84	-11,5
5	0	7,28	7,33	-0,05	-0,7
6	-7,5	7,08	7,33	-0,25	-3,4

Le tableau B-7 indique les mesures pour le wagon-citerne TILX 316533, par comparaison avec le wagon-citerne de référence non endommagé du CDC L116012A.

Comme ce wagon-citerne ne présentait aucune rupture pouvant déformer sa coque, on peut représenter le changement dans le volume en comparant sur l'ensemble de la coque le volume du wagon de référence avec celui du wagon-citerne susmentionné.

Volume du wagon TILX 316533 : 113,23 m³
 Volume selon le CDC L116012A : 116,43 m³
 Volume Δ en section : -3,20 m³
 Différence en % : -2,7 %

Il n'y avait qu'une réduction mineure dans la longueur du wagon TILX 316533 par rapport au wagon-citerne de référence.

Longueur du wagon TILX 316533 : 16,32 m (53 pi 6 9/16 po)
 Longueur selon le CDC L116012A : 16,40 m (53 pi 9 13/16 po)
 Longueur Δ : -0,08 m (3 1/4 po)
 Différence en % : -0,51 %