



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

LP168/2013

Analyse métallurgique des coupons 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	37	1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

PRÉPARÉ PAR

Original en anglais

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

APPROUVÉ PAR

Original en anglais

V. Guertsman, Ph.D. (Ingénieur spécialiste principal – Métallurgie)

DIFFUSÉ PAR

DIFFUSÉ LE

20 janvier 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
1.3	Pièces reçues	1
1.4	Matériaux exigés pour les wagons-citernes considérés	2
2.0	EXAMEN	4
2.1	Analyse chimique.....	4
2.2	Mesures de l'épaisseur	5
2.3	Examen métallurgique	5
2.4	Essais de dureté.....	8
2.5	Essais de traction.....	9
3.0	DISCUSSION.....	10
4.0	CONCLUSION.....	12

Liste des tableaux:

Tableau 1: Pièces reçues	1
Tableau 2: Identification et origine des coupons	2
Tableau 3: Matériaux exigés pour les wagons-citernes considérés	3
Tableau 4: Résistance à la traction exigée des aciers de wagon-citerne.....	3
Tableau 5: Composition chimique exigée des aciers de wagon-citerne	4
Tableau 6: Résultats des mesures d'épaisseur	6
Tableau 7: Résultats des essais de dureté Rockwell B	8
Tableau 8: Résultats des essais de traction – Coupons de tête	9
Tableau 9: Résultats des essais de traction – Coupons de coque.....	10

Liste des figures:

Figure 1: Photographies des coupons marqués sur le wagon-citerne WFIX 130682	14
Figure 2: Photographies des coupons marqués sur le wagon-citerne TILX 316641	15
Figure 3: Photographies des coupons marqués sur le wagon-citerne ACFX 79709.....	16
Figure 4: Photographies des coupons marqués sur le wagon-citerne PROX 44293.....	17
Figure 5: Photographie d'un coupon marqué sur la tête du wagon-citerne ACFX 76605	18
Figure 6: Photographie de l'endroit (encerclé) où on a prélevé un coupon sur le wagon-citerne WFIX 130571	18
Figure 7: Photographie des coupons marqués sur la tête et la coque du wagon-citerne CTCX 735572	19
Figure 8: Photographies des coupons marqués sur le wagon-citerne NATX 310515	20
Figure 9: Photographies des coupons marqués sur le wagon-citerne ACFX 79383.....	21
Figure 10: Photographies des coupons à leur réception.....	22
Figure 11: Photographie des échantillons découpés dans chaque coupon.....	25
Figure 12: Coupes transversales métallurgiques (attaque au nital) des coupons provenant du wagon WFIX 130682.....	26
Figure 13: Coupes transversales métallurgiques (attaque au nital) des coupons provenant du wagon TILX 316641	27

Figure 14: Coupes transversales métallurgiques (attaque au nital) des coupons provenant du wagon ACFX 79709	28
Figure 15: Coupes transversales métallurgiques (attaque au nital) des coupons provenant du wagon PROX 44293	29
Figure 16: Coupe transversale métallurgique (attaque au nital) provenant du coupon 24H (wagon ACFX 76605 - tête)	30
Figure 17: Coupe transversale métallurgique du coupon prélevé sur la coque du wagon WFIX 130571 près du trou de brûlure	31
Figure 18: Coupe transversale métallurgique du coupon prélevé sur la coque du wagon WFIX 130571 à l'écart du trou de brûlure	33
Figure 19: Coupes transversales métallurgiques (attaque au nital) des coupons provenant du wagon CTCX 735572	35
Figure 20: Coupes transversales métallurgiques (attaque au nital) des coupons provenant du wagon NATX 310515.....	36
Figure 21: Coupes transversales métallurgiques (attaque au nital) des coupons provenant du wagon ACFX 79383	37

Liste des annexes:

Annexe A: Résultats de l'analyse chimique des coupons des wagons-citernes.....	A-1
--	-----

1.0 INTRODUCTION

1.1 Description de l'événement

1.1.1 Le 6 juillet 2013, un train-bloc transportant du pétrole brut et exploité par le chemin de fer Montreal, Maine & Atlantic Railway déraile à Lac-Mégantic (Québec). De nombreux wagons-citernes se rompent et un incendie s'ensuit.

1.2 Services techniques demandés

1.2.1 Le bureau des Opérations d'enquêtes de la région de l'Est - Rail/Pipeline du Bureau de la sécurité des transports du Canada (BST) a demandé une analyse métallurgique de coupons prélevés sur certains wagons-citernes.

1.3 Pièces reçues

1.3.1 Les coupons, provenant de 9 wagons-citernes déraillés, ont été prélevés au cours de l'examen sur le terrain. Le tableau 1 résume les coordonnées pertinentes des wagons-citernes. L'échantillonnage a porté sur au moins un wagon-citerne représentatif de chaque constructeur.

Tableau 1: Pièces reçues

Numéro du wagon sur le terrain ¹	Position dans le convoi	Marque du wagon	Numéro du wagon	Marque du propriétaire ²	Constructeur ³	Nombre de coupons
8	10	WFIX	130682	FURX	Trinity Tank Car	2
9	11	TILX	316641	TILX	Trinity Tank Car	2
15	17	ACFX	79709	NATX	ACF Industries	2
20	26	PROX	44293	PROX	Union Tank Car	2
24	25	ACFX	76605	NATX	ACF Industries	1
34	31	WFIX	130571	FURX	Trinity Tank Car	1
40	42	CTCX	735572	CEFX	ARI	2
58	63	NATX	310515	NATX	Gunderson	2
59	58	ACFX	79383	NATX	ACF Industries	2

1.3.2 Les figures 1 à 9 sont des photographies des coupons tels qu'ils sont marqués sur les wagons. Les coupons ont été prélevés à des endroits présentant le moins possible de signes d'impact et de dommages causés par le feu, sauf dans le cas du wagon WFIX 130571, dont on a prélevé à dessein un coupon dans une zone endommagée de façon importante par le feu et contenant un trou de brûlure⁴ (figure 6). On s'est servi de cisailles hydrauliques pour découper les parties marquées sur les wagons avant de mettre ces derniers à la casse. Comme les

¹ Numéro attribué par l'entrepreneur en assainissement.

² Source : Railinc Umler Equipment Management Information System.

³ Source : AAR Application for Approval and Certificate of Construction.

⁴ Perforation due à des dommages causés par le feu.

travaux à chaud étaient interdits sur le site de l'accident en raison du danger d'incendie, on a fait appel à une compagnie externe pour découper, au moyen d'un équipement de coupe au jet d'eau, des coupons circulaires dans les sections prélevées sur les wagons-citernes. La figure 1a montre un exemple représentatif d'une partie prélevée sur un wagon-citerne après la découpe d'un coupon circulaire. Le tableau 2 résume les coordonnées de chaque coupon. La figure 10 montre les coupons découpés au jet d'eau dans l'état où ils ont été reçus au Laboratoire d'ingénierie du BST.

Tableau 2: Identification et origine des coupons

Identification des coupons	Marque du wagon	Numéro du wagon	Origine du coupon ⁵
8H	WFIX	130682	Tête du bout B
8S	WFIX	130682	Section de coque 2
9H	TILX	316641	Tête du bout A
9S	TILX	316641	Section de coque 5
15H	ACFX	79709	Tête du bout A
15S	ACFX	79709	Section de coque 2
20H	PROX	44293	Tête du bout B
20S	PROX	44293	Section de coque 2
24H	ACFX	76605	Tête du bout B ⁶
34S	WFIX	130571	Section de coque 5
40H	CTCX	735572	Tête du bout A
40S	CTCX	735572	Section de coque 6
58H	NATX	310515	Tête du bout B
58S	NATX	310515	Section de coque 1
59H	ACFX	79383	Tête du bout A
59S	ACFX	79383	Section de coque 2

1.4 Matériaux exigés pour les wagons-citernes considérés

1.4.1 Le tableau 3 résume le type de matériau, la nuance et l'épaisseur indiqués dans le document *Application for Approval and Certificate of Construction* des wagons-citernes considérés. Les tableaux 4 et 5 résument, respectivement, la résistance à la traction et la composition chimique exigées des aciers spécifiés pour wagons-citernes.

1.4.2 Les têtes de 4 wagons (WFIX 130582, TILX 316641, PROX 44293 et WFIX 130571) et celles de 2 wagons (CTCX 735572 et NATX 310515) étaient constituées respectivement d'acier non normalisé et d'acier normalisé de nuance 70, tous deux conformes à la norme ASTM A516. Les têtes de 3 wagons

⁵ Sections de coque de la citerne numérotées depuis le bout B.

⁶ On avait marqué des coupons sur les têtes et la coque du wagon ACFX 76605, mais celui de la coque n'a pas été recouvert.

(ACFX 79709, ACFX 76605 et ACFX 79383) étaient construites d'acier non normalisé ASTM A515 de nuance 70.

1.4.3 Toutes les coques étaient faites en acier non normalisé AAR TC128 de nuance B, à l'exception du wagon NATX 310515, dont la coque était en acier normalisé conforme à la même norme.

Tableau 3: Matériaux exigés pour les wagons-citernes considérés

Marque du wagon	Numéro du wagon	Têtes		Coque	
		Type et nuance d'acier	Épaisseur nominale (pouce)	Type et nuance d'acier	Épaisseur nominale (pouce)
WFIX	130682	ASTM A516 ⁷ de nuance 70	7/16	AAR TC128 ⁸ de nuance B	7/16
TILX	316641	ASTM A516 de nuance 70	7/16	AAR TC128 de nuance B	7/16
ACFX	79709	ASTM A515 ⁹ de nuance 70	15/32	AAR TC128 de nuance B	7/16
PROX	44293	ASTM A516 de nuance 70	15/32	AAR TC128 de nuance B	7/16
ACFX	76605	ASTM A515 de nuance 70	15/32	AAR TC128 de nuance B	7/16
WFIX	130571	ASTM A516 de nuance 70	7/16	AAR TC128 de nuance B	7/16
CTCX	735572	ASTM A516 de nuance 70, normalisé	7/16	AAR TC128 de nuance B	7/16
NATX	310515	ASTM A516 de nuance 70, normalisé	0,443	AAR TC128 de nuance 70, normalisé	0,438
ACFX	79383	ASTM A515 de nuance 70	15/32	AAR TC128 de nuance B	7/16

Tableau 4: Résistance à la traction exigée des aciers de wagon-citerne

Spécification	Limite d'élasticité minimale (lb/po ²)	Résistance à la traction (lb/po ²)	Allongement minimum sur 2 pouces (%)
ASTM A515 de nuance 70	38 000	70 000 à 90 000	21
ASTM A516 de nuance 70	38 000	70 000 à 90 000	21
AAR TC128 de nuance B	50 000	81 000 à 101 000	22,0 min.

⁷ ASTM A516/A516M-10 - Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, for Moderate - and Lower - Temperature Service.

⁸ AAR TC128 - Specification for High-Strength Carbon Manganese Steel Plates for Tank Cars.

⁹ ASTM A515/A515M-10 - Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, for Intermediate - and Higher - Temperature Service.

Tableau 5: Composition chimique exigée des aciers de wagon-citerne

Élément	Exigences chimiques		
	AAR TC128 de nuance B ¹⁰	ASTM A516 de nuance 70 ¹¹	ASTM A515 de nuance 70 ¹²
Carbone (% max.)	0,26	0,25 ^A	0,31 ^B
Manganèse (%)	1,00 à 1,70 ^A	0,79 à 1,26 ^C	1,30 ^C
Phosphore (% max.)	0,025	0,025	0,025
Soufre (% max.)	0,015	0,015	0,025
Silicium (%)	0,13 à 0,45 ^A	0,15 à 0,45	0,13 à 0,45
Vanadium (% max.)	0,084	0,04 ^D	0,04 ^D
Cuivre (% max.)	0,35	0,35	0,43 ^D
Nickel (% max.)	Aucune limite	0,43 ^D	0,43 ^D
Chrome (% max.)	Aucune limite	0,34 ^D	0,34 ^D
Molybdène (% max.)	Aucune limite	0,13 ^D	0,13 ^D
Aluminium (%)	0,015 à 0,060	0,015 à 0,060	Non spécifié
Niobium (% max.)	0,03 ^D	0,03 ^D	0,03 ^D
Titane (% max.)	0,020	0,020	0,04 ^D
Bore (% max.)	0,0005	0,0005	0,0015 ^D
Azote (% max.)	0,012	0,012	Non spécifié
Étain (% max.)	0,020	0,020	Non spécifié
C _{Eq} (% max.) ^E	0,55	0,45	0,47 ^F
Cu+Ni+Cr+Mo (% max.)	0,65	0,65	1,00 ^D
Nb+V+Ti (% max.)	0,11	0,11	Non spécifié
Ti/N (ratio max.)	4,0	4,0	Non spécifié

^A pour une tôle de $\leq 3/4$ pouce d'épaisseur

^B 1 pouce et moins

^C pour chaque réduction de 0,01 point de pourcentage sous la teneur maximale en carbone spécifiée, une augmentation de 0,06 point de pourcentage au-dessus de la teneur maximale en manganèse spécifiée est permise, jusqu'à une teneur maximale de 1,60 %

^D selon la norme ASTM A20/A20M, tableau 1

^E $C_{Eq} = C + Mn/6 + (Cr+Mo+V)/5 + (Ni+Cu)/15$ ¹³

^F selon la norme ASTM A20/A20M, tableau S20.1

2.0 EXAMEN

2.1 Analyse chimique

2.1.1 Sur chacun des coupons de wagon-citerne, on a découpé des échantillons d'environ 1 pouce sur 2 aux endroits indiqués par les lignes rouges en pointillés

¹⁰ AAR Manual of Standards and Recommended Practices – Specifications for Tank Cars, Table M2 Chemical Requirements for AAR TC128 Grade B steel - Product Analysis, 10/2007, p. C-III [M-1002] 338.

¹¹ AAR Manual of Standards and Recommended Practices – Specifications for Tank Cars, Table M11 Supplemental Chemical Requirements for ASTM A516 Grade 70 – Product Analysis, 10/2007, p. C-III [M-1002] 345.

¹² ASTM A515/A515M-10 - Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, for Intermediate - and Higher - Temperature Service.

¹³ Équivalent carbone calculé en conformité avec la norme ASTM A20/A20M, article S20.2.

dans la figure 10. Ces échantillons apparaissent à la figure 11. Les échantillons ont été envoyés à un laboratoire externe¹⁴ en vue d'une analyse chimique en conformité avec les normes ASTM E415-08¹⁵ et ASTM E1019-11.¹⁶ L'annexe A (tableaux A-1 à A-9) présente les résultats détaillés de l'analyse chimique.

2.1.2 L'analyse chimique de tous les coupons des wagons-citernes, à l'exception du coupon 15S (coque du wagon ACFX 79709), a donné des résultats qui correspondaient aux exigences actuellement applicables en matière de composition chimique. Le coupon 15S a donné un résultat de 0,74 % pour la composition Cu+Ni+Cr+Mo (tableau 3), soit une valeur légèrement supérieure à la limite maximale de 0,65 % pour une telle composition dans un acier TC128 de nuance B (tableau 5). Cependant, le wagon ACFX 79709 a été commandé en 1979 et, à l'époque, la spécification n'exigeait aucune teneur maximale en Cu+Ni+Cr+Mo. Par conséquent, le coupon 15S aurait satisfait aux exigences pertinentes en matière de composition chimique au moment de la commande du wagon-citerne.

2.2 Mesures de l'épaisseur

2.2.1 Le tableau 6 résume les résultats des mesures d'épaisseur obtenues sur les coupons des wagons-citernes. Comme les dommages causés par le feu avaient visiblement érodé le coupon 34S, celui-ci n'a pas été mesuré. L'écart admissible d'épaisseur pour une tôle dont l'épaisseur spécifiée est de 0,438 (7/16) à 0,5 pouce varie de 0,03 à 0,06 pouce, selon la largeur de la tôle¹⁷. Les coupons des wagons-citernes considérés respectaient cet écart.

2.3 Examen métallurgique

2.3.1 À partir des coupons, on a préparé des coupes transversales métallurgiques pour en analyser la microstructure. Dans le cas des coupons de la coque, les coupes transversales ont été prélevées parallèlement à l'axe longitudinal de la citerne, c.-à-d. transversalement à la direction de la passe finale de laminage de la tôle. Pour les coupons de tête, on a fait les prélèvements parallèlement à l'axe vertical de la citerne (à défaut de connaître la direction de la passe finale de laminage des tôles de tête par rapport à la citerne). Les figures 12 à 21 montrent des micrographies représentatives des coupes transversales.

2.3.2 La microstructure des coupons de tête et de coque prélevés sur les wagons WFIX 130682, TILX 316641, ACFX 79709, PROX 44293 et ACFX 79383, ainsi que celle du coupon de coque provenant du wagon CTCX 735572 était formée de ferrite équiaxe ou légèrement allongée (constituant blanc) et de perlite¹⁸ (constituant noir) (figures 12, 13, 14, 15, 21 et 19). Les

¹⁴ Exova Burlington Laboratory, accrédité ISO/IEC 17025.

¹⁵ ASTM E415-08 - Standard Test Method for Atomic Emission Vacuum Spectrometric Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel.

¹⁶ ASTM E1019-11 - Standard Test Methods for Determination of Carbon, Sulfur, Nitrogen, and Oxygen in Steel, Iron, Nickel, and Cobalt Alloys by Various Combustion and Fusion Techniques.

¹⁷ ASTM A20/A20M-11 Standard Specification for General Requirements for Steel Plates for Pressure Vessels, Table A1.1.

¹⁸ La perlite est un mélange de ferrite et de cémentite (carbure de fer) dans lequel les deux phases se forment à partir de l'austénite dans un schéma lamellaire alterné.

coupons 20S (coque du wagon CTCX 735572) et 59H (tête du wagon ACFX 79383) contenaient aussi des grains de ferrite aciculaire (figures 15d et 21c), ce qui suggère la présence probable de bainite. L'examen sous un plus fort grossissement dans un microscope électronique à balayage (MEB) a révélé que la perlite était lamellaire, sans sphéroïdisation visible¹⁹. Les coupes transversales présentaient divers degrés de structure en bandes de ferrite et de perlite²⁰. Dans l'ensemble, ces microstructures correspondaient à la microstructure caractéristique des tôles d'acier non normalisé à l'état brut de laminage. Par rapport aux autres coupons d'acier à l'état brut de laminage dans ce groupe, les coupons 15H (tête du wagon ACFX 79709) et 24H (tête du wagon ACFX 76605) présentaient de la perlite et des grains visiblement plus gros, avec un espacement interlamellaire plus grossier.

2.3.3 La microstructure des coupons 58H et 58S (tête et coque du wagon NATX 310515) était formée de ferrite à grains fins et de perlite lamellaire, avec une certaine structure en bandes (figure 20), indiquant un acier normalisé. Le coupon 40H (wagon CTCX 735572) était également constitué d'acier normalisé, mais sa microstructure était visiblement plus grossière (figures 19a, 19c et 19e).

Tableau 6: Résultats des mesures d'épaisseur

Identification des coupons	Marque et numéro du wagon, origine du coupon	Épaisseur mesurée (pouce)	Épaisseur nominale (pouce)
8H	WFIX 130682 - tête	0,532	0,438
8S	WFIX 130682 - coque	0,455	0,438
9H	TILX 316641 - tête	0,515	0,438
9S	TILX 316641 - coque	0,455	0,438
15H	ACFX 79709 - tête	0,465	0,469
15S	ACFX 79709 - coque	0,450	0,438
20H	PROX 44293 - tête	0,477	0,469
20S	PROX 44293 - coque	0,455	0,438
24H	ACFX 76605 - tête	0,465	0,469
34S	WFIX 130571 - coque	non déterminé	0,438
40H	CTCX 735572 - tête	0,473	0,438
40S	CTCX 735572 - coque	0,448	0,438
58H	NATX 310515 - tête	0,456	0,443
58S	NATX 310515 - coque	0,437	0,438
59H	ACFX 79383 - tête	0,477	0,469
59S	ACFX 79383 - coque	0,457	0,438

2.3.4 Les figures 17 et 18 montrent la microstructure du coupon 34S (tête du wagon WFIX 130571). Deux coupes transversales ont été préparées pour ce

¹⁹ La sphéroïdisation survient par suite du chauffage et du refroidissement qui produisent dans l'acier des carbures de forme globulaire.

²⁰ Répartition hétérogène de ferrite et de perlite alignées dans des filaments ou des plaques parallèles à la direction du travail.

coupon : la première par le bord du trou de brûlure (figure 17), et la seconde à quelques centimètres du trou de brûlure (figure 18). Les deux coupes transversales ont révélé des variations importantes dans la microstructure à travers l'épaisseur de la tôle (figures 17a et 18a). Il y avait une réduction visible de la quantité de perlite (constituant noir) près de la surface extérieure, tandis que le matériau adjacent à la surface intérieure était presque complètement de nature perlitique. On n'a pas observé de telles variations sur les autres coupons des wagons-citernes.

- 2.3.5 Sur la première coupe transversale (par le bord du trou de brûlure), le matériau adjacent à la surface intérieure présentait une microstructure perlite lamellaire avec des grains de ferrite polyédriques décorant les joints de grains d'austénite antérieure grossière (figures 7b et 17c). Sur la seconde coupe transversale (à l'écart du trou de brûlure), le matériau adjacent à la surface intérieure présentait lui aussi une microstructure lamellaire de nature complètement perlitique, mais les joints des grains d'austénite antérieure étaient décorés d'un film continu de carbure (très probablement de la cémentite) (figures 18b, 18c, 18d et 18e). Ces observations suggèrent que la région adjacente à la surface intérieure présentait un enrichissement important en carbone. La teneur en carbone correspondait à une microstructure entièrement perlitique d'environ 0,8 % poids²¹, comparativement à la concentration initiale de carbone de 0,11 % poids (tableau A-6). On estime très probable que cet enrichissement en carbone ait eu lieu au moment où l'acier a été exposé à un environnement riche en carbone à des températures élevées au cours de l'incendie qui a suivi le déraillement. Le pétrole brut dans le wagon-citerne a probablement agi comme source de carbone qui a été absorbé et diffusé dans l'acier.
- 2.3.6 Les parties intermédiaires des coupes transversales du coupon 34S affichaient des quantités de ferrite et de perlite similaires à celles observées dans les autres coupes transversales d'acier à l'état brut de laminage TC128 de nuance 70 (par exemple, le coupon 8S). Cependant, les coupes transversales du coupon 34S présentaient des grains visiblement plus gros, comme le démontre une comparaison de la taille des grains dans les figures 12b et 12f (coupon 8S) avec celle montrée dans les figures 17d, 17e, 18f et 18g (coupon 34S). Ces données sont compatibles avec le fait que l'acier a surchauffé au cours de l'incendie qui a suivi le déraillement.
- 2.3.7 La microstructure à la surface extérieure du coupon 34S était composée principalement de ferrite, avec seulement une petite quantité de perlite. La surface extérieure était recouverte d'une couche irrégulière d'oxyde. La figure 17f montre une coupe transversale représentative pratiquée dans cet oxyde. La spectroscopie à dispersion d'énergie (spectroscopie EDS) a montré que l'oxyde était composé d'oxyde de fer (zone 1 des figures 17f et 17g) et d'oxyde de fer-silicium (zone 2 des figures 17f et 17g). Les observations ci-dessus indiquent que la surface extérieure du coupon 34S était à la fois décarburée et oxydée. Quand l'acier est exposé à un environnement qui contient de l'oxygène et de la vapeur d'eau à une température élevée (comme l'environnement présumé présent au cours de la lutte contre l'incendie qui a suivi le déraillement), les atomes de carbone près de la

²¹ W. F. Smith, Structure and Properties of Engineering Alloys, (McGraw-Hill, 1981), p. 7.

surface réagissent avec l'oxygène et la vapeur d'eau, entraînant une réduction de la teneur en carbone à la surface et, par conséquent, une augmentation de la teneur en ferrite. Les atomes de fer dans l'acier réagissent également avec l'oxygène et l'eau pour former de l'oxyde de fer à la surface.

2.4 Essais de dureté

2.4.1 Les coupes transversales métallurgiques ont été soumises à des mesures de la dureté Rockwell B. On a également mesuré la dureté sur un second jeu d'échantillons découpés à 90 degrés par rapport à l'orientation des coupes transversales métallurgiques (c.-à-d., parallèlement à la passe finale de laminage dans le cas des coupons de coque, et à l'axe horizontal de la citerne pour ce qui est des coupons de tête; se reporter au paragraphe 2.3.1). Les résultats sont résumés dans le tableau 7. La résistance à la traction exigée de l'acier AAR TC128 de nuance B utilisé pour les coques va de 81 000 à 101 000 lb/po², ce qui correspond à une exigence de dureté d'environ 84 à 95,4 HRBW²². Les coupons de coque satisfaisaient à cette exigence, sauf les coupons 9S, 15S et 40S, qui ont donné des résultats légèrement au-dessous de la limite de 84 HRBW. La résistance à la traction exigée des aciers ASTM A515 et ASTM A516 de nuance 70 utilisés pour les têtes va de 70 000 à 90 000 lb/po², ce qui correspond à une exigence de dureté d'environ 79 à 91 HRBW. Les coupons de tête 9H, 20H et 59H se pliaient à cette exigence, tandis que les coupons 8H, 15H, 24H, 40H et 58H ont donné des résultats légèrement au-dessous de la limite de 79 HRBW.

Tableau 7: Résultats des essais de dureté Rockwell B

Identification des coupons	Marque et numéro du wagon, origine du coupon	Dureté moyenne (HRBW)	
		Coupe transversale métallurgique	90° par rapport à la coupe transversale métallurgique
8H	WFIX 130682 - tête	78	76
8S	WFIX 130682 - coque	85	82
9H	TILX 316641 - tête	81	79
9S	TILX 316641 - coque	85	83
15H	ACFX 79709 - tête	79	76
15S	ACFX 79709 - coque	85	84
20H	PROX 44293 - tête	82	81
20S	PROX 44293 - coque	95	95
24H	ACFX 76605 - tête	76	73
34S	WFIX 130571 - coque	88	non déterminé
40H	CTCX 735572 - tête	77	76
40S	CTCX 735572 - coque	83	82
58H	NATX 310515 - tête	80	78

²² Conversion de la résistance à la traction en dureté Rockwell B approximative d'après la norme ASTM A370-12a Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, tableau 3.

Identification des coupons	Marque et numéro du wagon, origine du coupon	Dureté moyenne (HRBW)	
		Coupe transversale métallurgique	90° par rapport à la coupe transversale métallurgique
58S	NATX 310515 - coque	87	85
59H	ACFX 79383 - tête	87	86
59S	ACFX 79383 - coque	91	90

2.5 Essais de traction

2.5.1 Des essais de traction ont été effectués sur les coupons de certains wagons-citernes par un laboratoire extérieur²³ en conformité avec la norme ASTM A370-12a. On a usiné les échantillons de traction avec leur axe longitudinal parallèle à celui de la citerne (coupons de coque) ou à son axe vertical (coupons de tête). La longueur entre repères était de 2 pouces, et la largeur nominale de la partie calibrée, de 0,5 pouce. Trois échantillons ont été testés sur chaque coupon; les tableaux 8 (pour les coupons de tête) et 9 (pour les coupons de coque) présentent les résultats des essais.

2.5.2 Tous les coupons de tête satisfaisaient aux exigences de résistance à la traction pour les aciers spécifiés ASTM A515 et A516 de nuance 70 (tableau 8). Tous les coupons de coque satisfaisaient aux exigences de résistance à la traction pour l'acier spécifié AAR TC128 de nuance B; cependant, deux échantillons (40S-2 et 40S-3) du coupon 40S (wagon CTCX 735572) présentaient des résultats de résistance à la traction (RT) légèrement inférieurs à la valeur minimale exigée (tableau 9).

2.5.3 Les essais de traction sur les coupons constitués d'acier non normalisé ont donné des résultats généralement comparables à ceux obtenus des coupons d'acier normalisé (tableaux 8 et 9).

Tableau 8: Résultats des essais de traction – Coupons de tête

Marque et numéro du wagon	Type et nuance d'acier	Identification de l'échantillon	Limite d'élasticité à 0,2 % (lb/po ²)	Résistance à la traction (lb/po ²)	Allongement (%)
TILX 316641	ASTM A516 de nuance 70, non normalisé	9H-1	51 600	72 900	38
		9H-2	53 400	75 300	36
		9H-3	52 300	74 800	35
PROX 44293	ASTM A516 de nuance 70, non normalisé	20H-1	48 400	76 200	35
		20H-2	46 300	76 800	33
		20H-3	49 900	75 700	33
CTCX 735572	ASTM A516 de nuance 70, normalisé	40H-1	44 000	71 400	38
		40H-2	41 100	71 100	34
		40H-3	41 900	71 400	36
NATX 310515	ASTM A516 de nuance 70, normalisé	58H-1	46 900	73 600	36
		58H-2	52 600	74 800	34
		58H-3	51 400	75 000	34

²³ Exova Burlington Laboratory, accrédité ISO/IEC 17025.

Marque et numéro du wagon	Type et nuance d'acier	Identification de l'échantillon	Limite d'élasticité à 0,2 % (lb/po ²)	Résistance à la traction (lb/po ²)	Allongement (%)
ACFX 79383	ASTM A515 de nuance 70, non normalisé	59H-1	48 100	81 500	24
		59H-2	60 300	85 800	29
		59H-3	61 600	86 200	29
Résistance à la traction exigée par les normes ASTM A515-70 et ASTM A516-70 (se reporter au tableau 4)			38 000 min.	70 000 à 90 000	21 min.

Tableau 9: Résultats des essais de traction – Coupons de coque

Marque et numéro du wagon	Type et nuance d'acier	Identification de l'échantillon	Limite d'élasticité à 0,2 % (lb/po ²)	Résistance à la traction (lb/po ²)	Allongement (%)
TILX 316641	AAR TC128 de nuance B, non normalisé	9S-1	54 100	81 600	30
		9S-2	51 700	81 600	30
		9S-3	52 100	82 000	34
PROX 44293	AAR TC128 de nuance B, non normalisé	20S-1	67 800	98 400	24
		20S-2	71 500	97 500	22
		20S-3	70 300	97 400	22
CTCX 735572	AAR TC128 de nuance B, non normalisé	40S-1	52 600	81 000	34
		40S-2	53 400	80 700	32
		40S-3	50 600	80 300	32
NATX 310515	AAR TC128 de nuance 70, normalisé	58S-1	62 500	84 500	28
		58S-2	62 900	84 900	28
		58S-3	62 800	85 000	30
ACFX 79383	AAR TC128 de nuance B, non normalisé	59S-1	66 400	89 700	26
		59S-2	68 600	91 400	26
		59S-3	67 600	91 300	26
Résistance à la traction exigée par la norme AAR TC128-B (se reporter au tableau 4)			50 000 min.	81 000 à 101 000	22,0 min.

3.0 DISCUSSION

3.1 Les résultats de l'analyse chimique des coupons de wagon-citerne concordaient avec les exigences actuellement applicables en matière de composition chimique. Cependant, le coupon 15S (coque du wagon ACFX 79709) présentait une quantité légèrement renforcée de la concentration collective de 4 éléments métalliques (les concentrations de ces éléments pris séparément se pliaient aux exigences actuelles des spécifications). Néanmoins, ce coupon aurait satisfait aux exigences en matière de composition chimique en vigueur au moment de la commande du wagon-citerne ACFX 79709.

3.2 La microstructure des coupons de wagon-citerne comportait principalement des grains de ferrite et de perlite, avec une certaine variation dans la taille des grains et le degré de structure en bandes de ferrite et de perlite. Dans l'ensemble, la microstructure des coupons correspondait généralement à celle attendue des aciers pour tôle spécifiés.

- 3.3 Les coupons 58H et 58S (tête et coque du wagon NATX 310515), qui étaient constitués d'aciers normalisés, présentaient des grains visiblement plus fins que ceux des autres coupons, en conformité avec l'effet prévu de la normalisation. Au cours du processus de normalisation, l'acier est réchauffé pour former de l'austénite, opération suivie d'un refroidissement à l'air au cours de la transformation de phase. Ce processus a généralement pour but d'affiner la taille des grains de ferrite et d'obtenir une structure de perlite fine²⁴.
- 3.4 Les coupons 15H (tête du wagon ACFX 79709), 24H (tête du wagon ACFX 76605), 40H et 40S (tête et coque du wagon CTCX 735572) présentaient des grains visiblement plus gros et une perlite plus grossière que les autres coupons. On a remarqué sur la surface extérieure de ces wagons-citernes une décoloration indicatrice de dommages causés par le feu (figures 3, 5 et 7). Le réchauffage d'aciers de ferrite-perlite à des températures de plus de 600 à 700 °C entraîne éventuellement un grossissement des grains de la microstructure²⁵. La croissance des grains de ferrite est due à la vitesse améliorée de diffusion à plus haute température. Les particules de cémentite de la phase perlitique peuvent aussi grossir et, ultimement, devenir sphéroïdes (globulaires). On estime probable que les microstructures plus grossières présentées par les coupons 15H, 24H, 40H et 40S résultent de l'exposition à l'incendie qui a suivi le déraillement.
- 3.5 Les résultats de dureté Rockwell B obtenus des coupons de wagon-citerne concordaient généralement avec les limites de dureté équivalentes correspondant à l'exigence de résistance à la traction; cependant, certains coupons ont donné des résultats de dureté légèrement bas. Comme on l'a noté plus haut, les coupons 15H, 24H, 40H et 40S montraient visiblement des microstructures plus grossières dues probablement à l'incendie qui a suivi le déraillement. Cette constatation explique leur dureté inférieure, puisque la croissance des grains se traduit par un adoucissement de l'acier. Il est possible qu'un certain grossissement de la taille des grains dû à l'exposition au feu ait affecté la microstructure d'autres coupons présentant des résultats de dureté plus faibles.
- 3.6 Les coupons de tête provenant des wagons TILX 316641, PROX 44293, CTCX 735572, NATX 310515 et ACFX 79383 satisfaisaient aux exigences de résistance à la traction pour les aciers spécifiés ASTM A515 et A516 de nuance 70. Les coupons de coque se pliaient aussi à ces exigences pour l'acier spécifié AAR TC128 de nuance B; cependant, deux échantillons du coupon 40S (wagon CTCX 735572) affichaient des résultats RT légèrement inférieurs à l'exigence minimale. Comme il a été mentionné plus haut, la microstructure de ce coupon avait probablement été adoucie en raison de l'exposition à l'incendie qui a suivi le déraillement.
- 3.7 L'examen d'un coupon prélevé sur un wagon-citerne fortement endommagé par le feu a révélé une région riche en carbone au niveau de la surface intérieure de la citerne. Le pétrole brut dans le wagon-citerne a probablement agi comme source de carbone qui a été absorbé et diffusé dans l'acier au cours de l'exposition à l'incendie subséquent au déraillement. Une attaque de carburation à température élevée peut produire une fragilisation, une piqûration et une perte rapide de

²⁴ R. W. K. Honeycombe, *Steels - Microstructure and Properties*, (Edward Arnold, UK, 1981).

²⁵ Ibid.

matériau (appelée « carburation catastrophique »)²⁶. La surface extérieure de l'acier a été décarburée et oxydée, signe d'une exposition à l'oxygène ou à la vapeur d'eau à une température élevée. On n'a observé aucun signe de fusion sur les coupes transversales des coupons; ce n'est donc pas la fusion qui a causé le trou de brûlure. On en conclut que la réaction chimique de l'acier au pétrole brut et à l'environnement externe a été le responsable probable de l'érosion de la tôle et de la perte de matériau à l'origine du trou de brûlure.

- 3.8 Les coupes transversales du coupon endommagé par le feu présentaient de gros grains; il semble donc que l'acier ait été exposé à des températures élevées dans le domaine de l'austénite (bien au-delà de 800 °C), ce qui a entraîné un grossissement important des grains d'austénite. Ces faits sont compatibles avec la gamme de températures (de 900 à 1100 °C) qui règnent à l'intérieur de feux en nappe dont il est question dans la documentation disponible²⁷.

4.0 CONCLUSION

- 4.1 Les coupons prélevés sur les wagons-citernes satisfaisaient aux exigences en matière de composition chimique au moment de la construction des wagons.
- 4.2 Les coupons des wagons-citernes répondaient aux normes d'épaisseur actuelles.
- 4.3 À l'exception de certains coupons probablement affectés par leur exposition à l'incendie qui a suivi le déraillement, la microstructure des coupons des wagons-citernes était généralement compatible avec celle attendue des aciers pour tôle spécifiés.
- 4.4 Les grains de la microstructure de certains coupons ont probablement grossi à cause d'une exposition à des températures élevées au cours de l'incendie qui a suivi le déraillement.
- 4.5 Les coupons des wagons-citernes satisfaisaient aux exigences spécifiées pour la résistance à la traction; cependant, 1 coupon (celui de la coque du wagon CTCX 735572) a donné des résultats légèrement inférieurs pour la résistance à la traction (RT). Ces résultats sont probablement dus à l'adoucissement de l'acier provoqué par l'exposition à l'incendie qui a suivi le déraillement.
- 4.6 Les coupons constitués d'aciers non normalisés et normalisés présentaient en général des propriétés similaires de traction.
- 4.7 Le coupon qui a subi des dommages importants causés par le feu présentait des changements dans sa teneur en carbone et une oxydation externe compatibles avec une exposition au pétrole brut et à l'air à des températures élevées au cours de l'incendie qui a suivi le déraillement. Les réactions chimiques résultantes ont probablement été à l'origine de la perte de matériau qui a entraîné le trou de brûlure. On a observé la présence de gros grains, indication que l'acier a sans doute été exposé à des températures bien supérieures à 800 °C.

²⁶ *Metals Handbook: Volume 13 Corrosion*, (ASM International 1987), p. 1312.

²⁷ *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, 3rd Edition (National Fire Protection Association, 2002), p. 3–289.

- 4.8 L'examen des coupons n'a révélé aucun vice important qui aurait pu nuire à la performance des wagons-citernes au cours du déraillement.



(a) Tête prélevée sur la citerne, avec trou rond à l'endroit où le coupon a été découpé au moyen d'un équipement de coupe au jet d'eau



(b) Coupon marqué sur la coque

Figure 1: Photographies des coupons marqués sur le wagon-citerne WFIX 130682



(a) Coupon marqué sur la tête



(b) Coupon marqué sur la coque

Figure 2: Photographies des coupons marqués sur le wagon-citerne TILX 316641



(a) Coupon marqué sur la tête



(b) Coupon marqué sur la coque

Figure 3: Photographies des coupons marqués sur le wagon-citerne ACFX 79709



(a) Coupon marqué sur la tête



(b) Coupon marqué sur la coque

Figure 4: Photographies des coupons marqués sur le wagon-citerne PROX 44293



Figure 5: Photographie d'un coupon marqué sur la tête du wagon-citerne ACFX 76605



Figure 6: Photographie de l'endroit (encerclé) où on a prélevé un coupon sur le wagon-citerne WFIX 130571



Figure 7: Photographie des coupons marqués sur la tête et la coque du wagon-citerne CTCX 735572



(a) Coupon marqué sur la tête



(b) Coupon marqué sur la coque

Figure 8: Photographies des coupons marqués sur le wagon-citerne NATX 310515



(a) Coupon marqué sur la tête

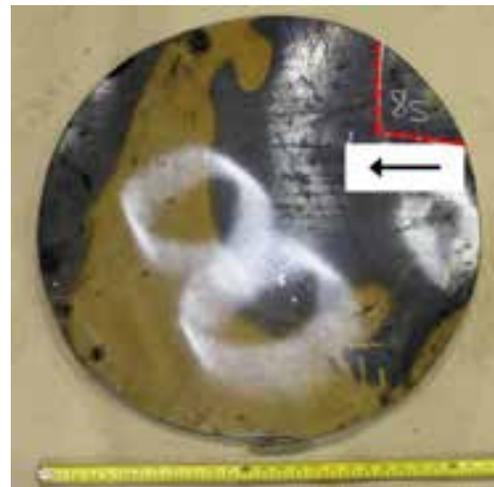


(b) Coupon marqué sur la coque

Figure 9: Photographies des coupons marqués sur le wagon-citerne ACFX 79383



Coupon 8H



Coupon 8S



Coupon 9H



Coupon 9S



Coupon 15H



Coupon 15S

Figure 10: Photographies des coupons à leur réception

Les flèches indiquent la direction « haut » (coupons de tête) ou l'axe longitudinal du wagon (coupons de coque). Les lignes rouges en pointillés indiquent la partie utilisée à des fins d'analyse chimique, d'examen métallurgique et d'essai de la dureté.



Coupon 20H



Coupon 20S



Coupon 24H



Coupon 34S



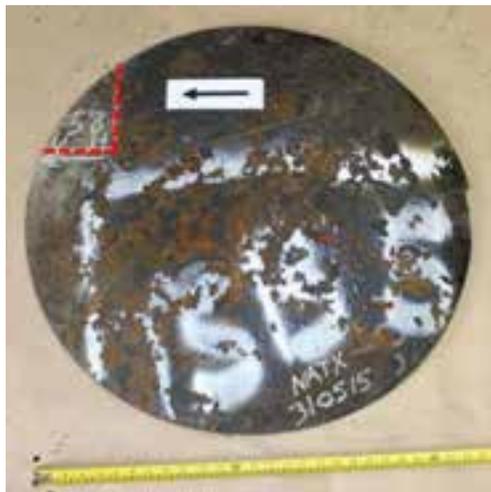
Coupon 40H



Coupon 40S

Figure 10: Photographies des coupons à leur réception

Les flèches indiquent la direction « haut » (coupons de tête) ou l'axe longitudinal du wagon (coupons de coque). Les lignes rouges en pointillés indiquent la partie utilisée à des fins d'analyse chimique, d'examen métallurgique et d'essai de la dureté.



Coupon 58H



Coupon 58S



Coupon 59H



Coupon 59S

Figure 10: Photographies des coupons à leur réception

Les flèches indiquent la direction « haut » (coupons de tête) ou l'axe longitudinal du wagon (coupons de coque). Les lignes rouges en pointillés indiquent la partie utilisée à des fins d'analyse chimique, d'examen métallurgique et d'essai de la dureté.



Figure 11: Photographie des échantillons découpés dans chaque coupon

Le morceau plus petit a été utilisé pour l'analyse chimique, et le plus gros, pour l'examen métallurgique et l'essai de dureté. Les flèches marquées sur les morceaux plus gros indiquent la direction verticale (coupons de tête) ou l'axe longitudinal du wagon-citerne (coupon de coque).

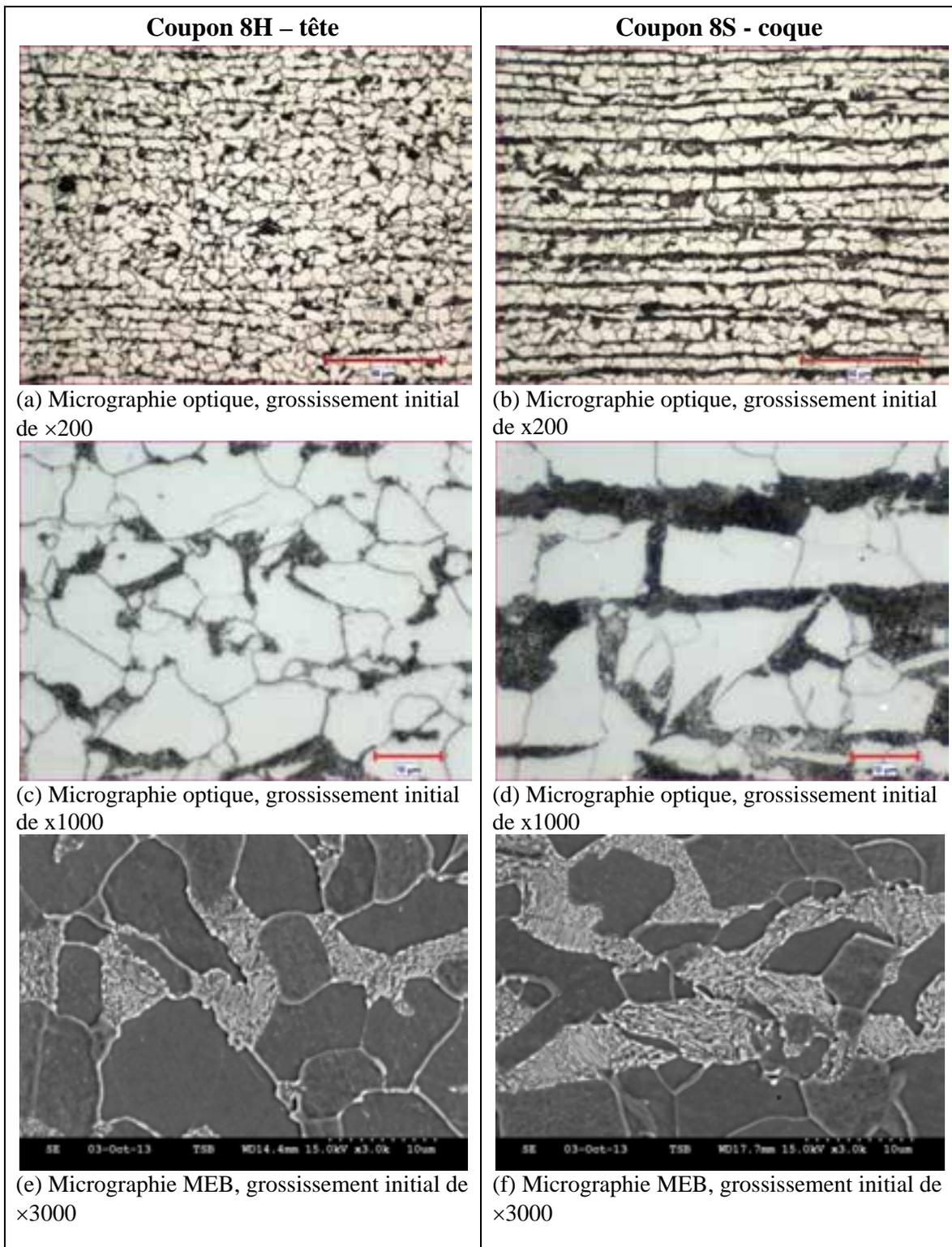


Figure 12: Coupes transversales métallurgiques (attaque au nital) des coupons provenant du wagon WFIX 130682

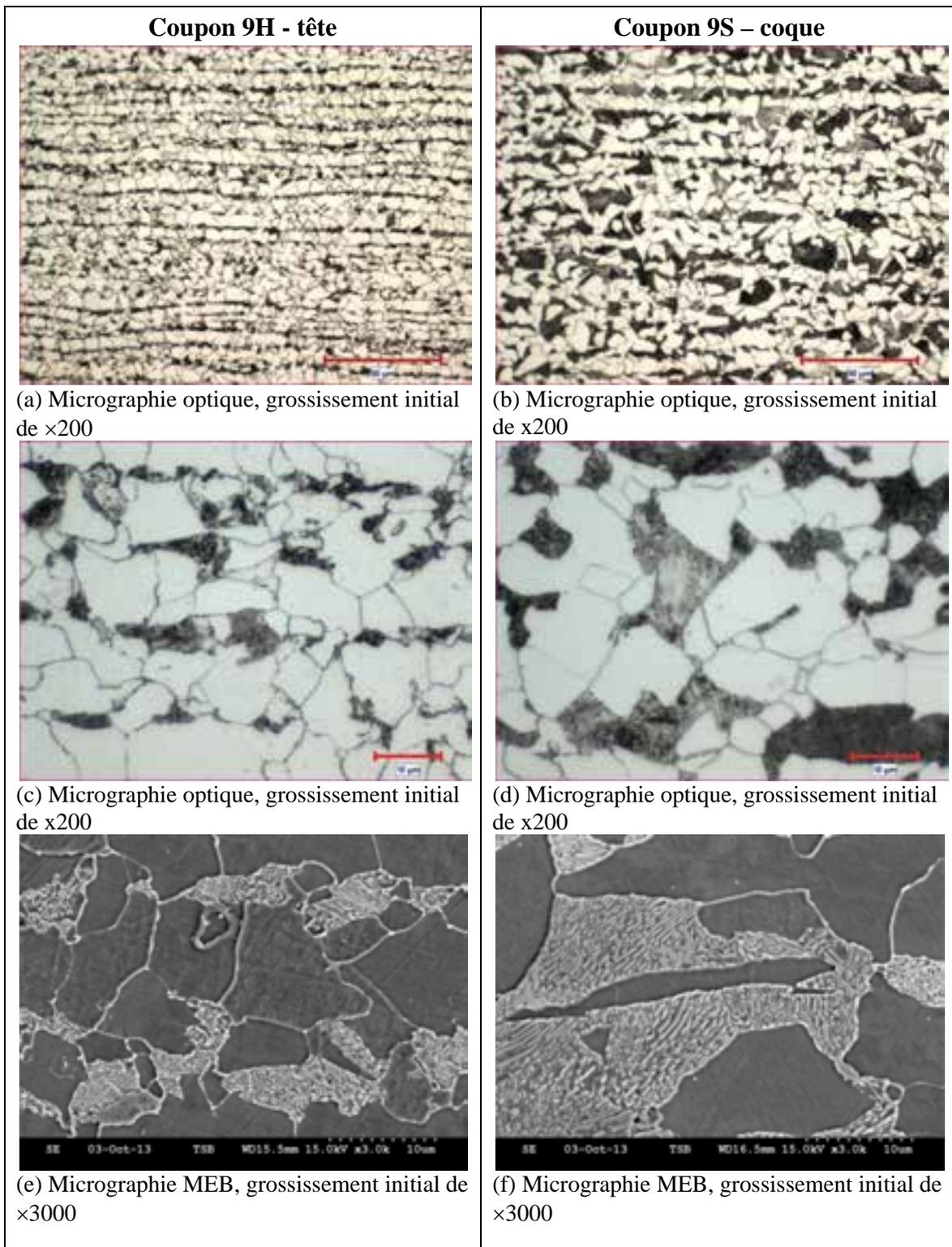


Figure 13: Coupes transversales métallurgiques (attaque au nital) des coupons provenant du wagon TILX 316641

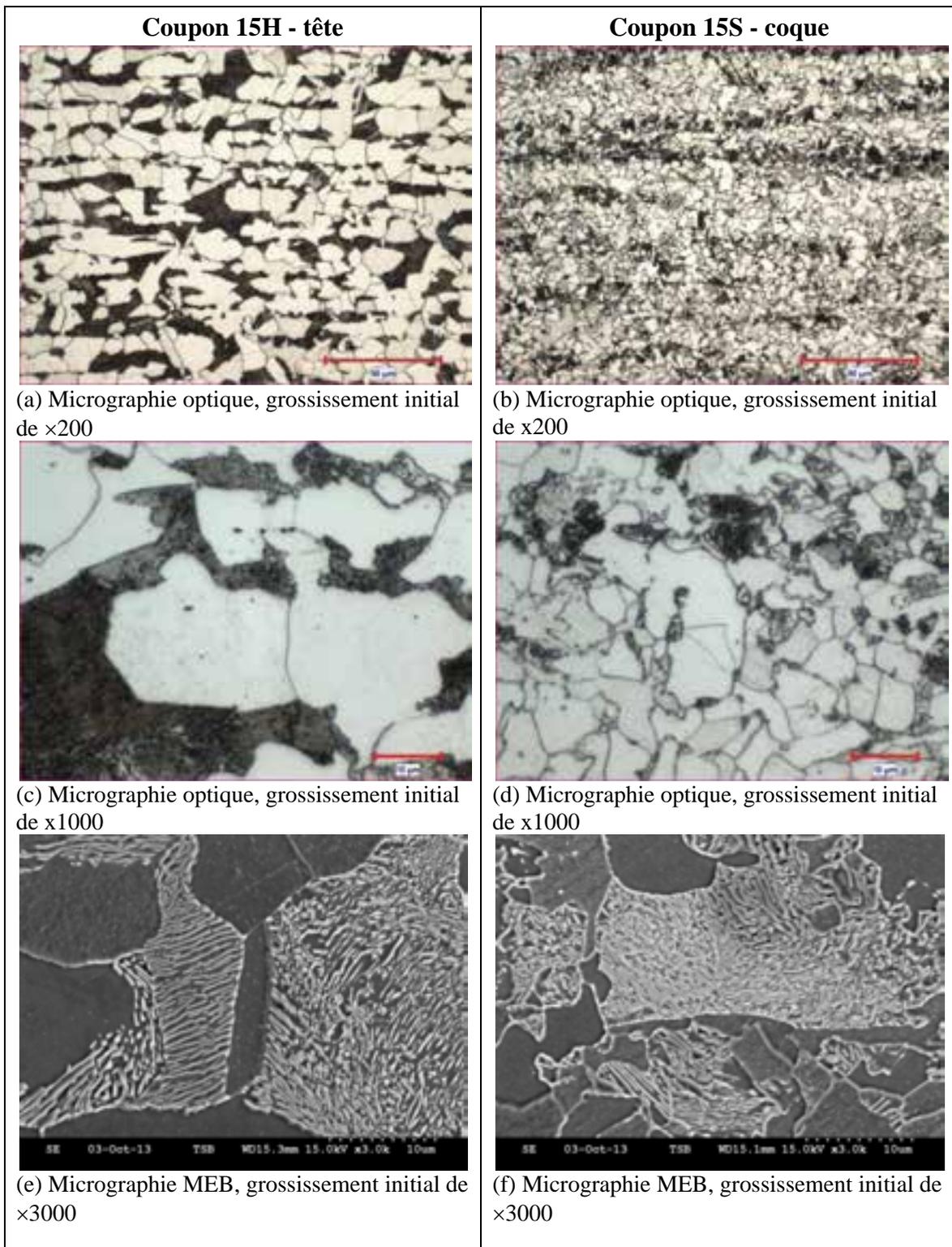


Figure 14: Coupes transversales métallurgiques (attaque au nital) des coupons provenant du wagon ACFX 79709

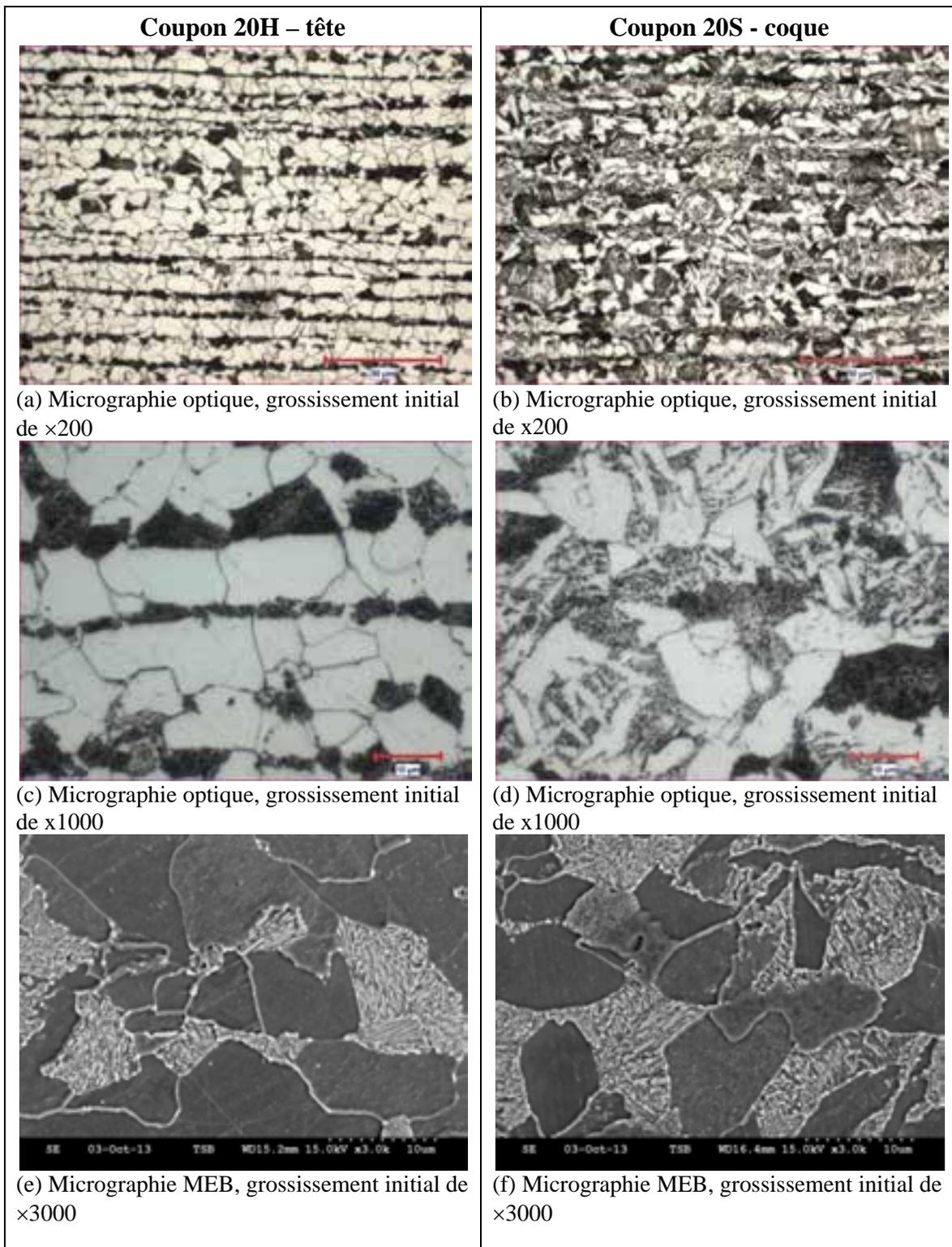
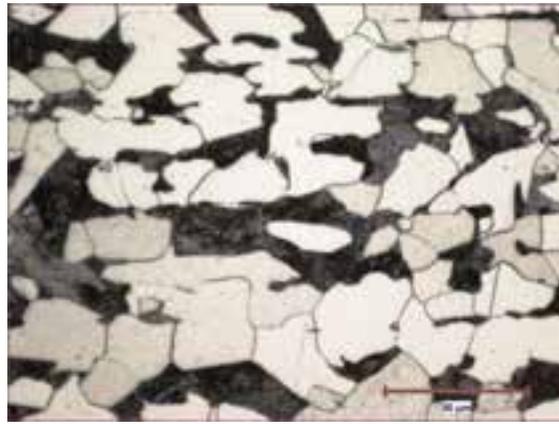
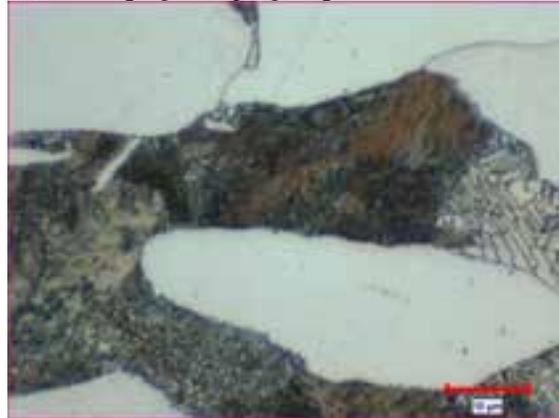


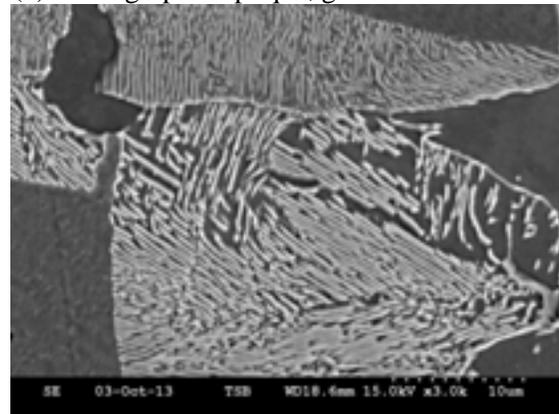
Figure 15: Coupes transversales métallurgiques (attaque au nital) des coupons provenant du wagon PROX 44293



(a) Micrographie optique, grossissement initial de x200

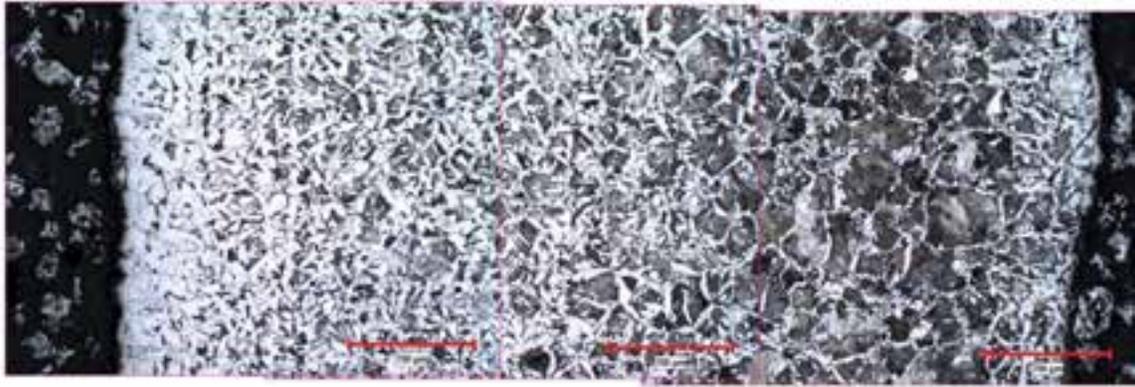


(b) Micrographie optique, grossissement initial de x1000



(c) Micrographie MEB, grossissement initial de $\times 3000$

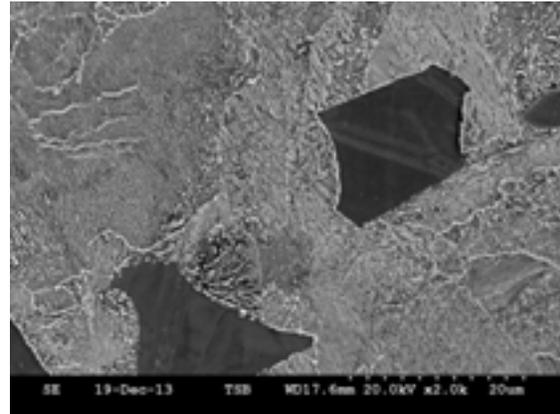
Figure 16: Coupe transversale métallurgique (attaque au nital) provenant du coupon 24H (wagon ACFX 76605 - tête)



(a) Montage de micrographies optiques montrant la variation de microstructure à travers l'épaisseur de la tôle (surface extérieure à gauche, surface intérieure à droite, attaque au nital, grossissement initial de $\times 25$)



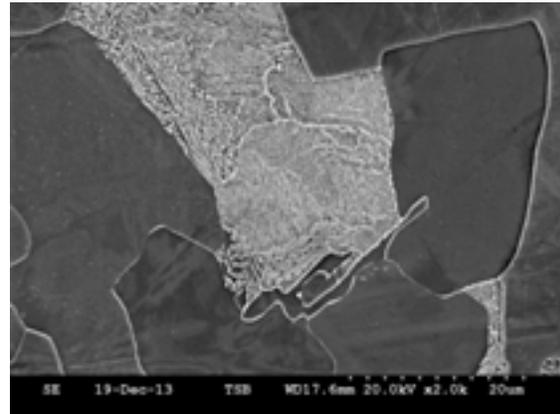
(b) Micrographie optique prise à proximité de la surface intérieure (attaque au nital, grossissement initial de $\times 200$)



(c) Micrographie MEB prise à proximité de la surface intérieure (attaque au nital, grossissement initial de $\times 2000$)

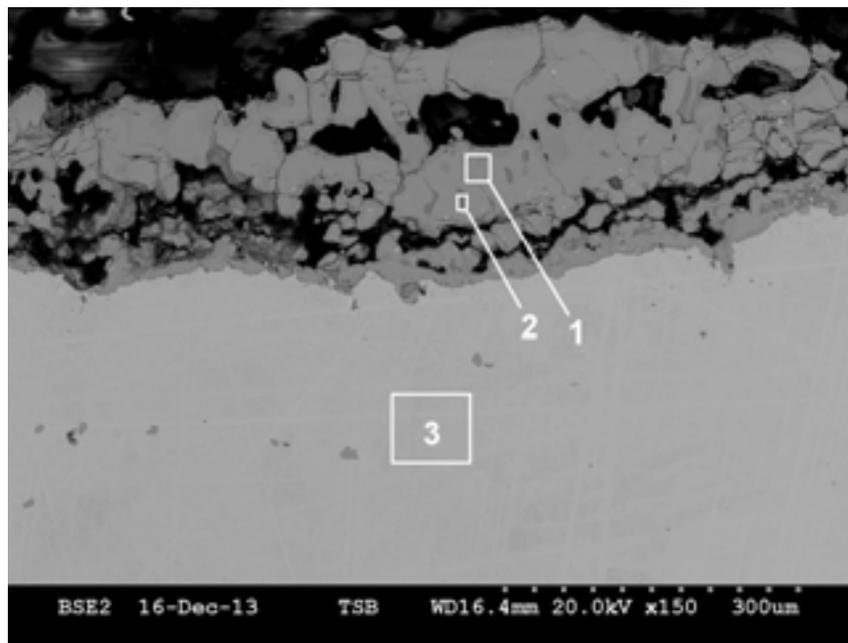


(d) Micrographie optique prise au milieu de la coupe transversale (attaque au nital, grossissement initial de $\times 200$)



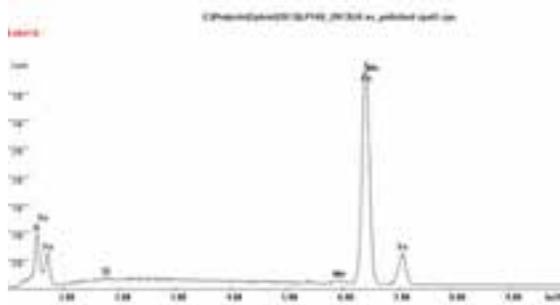
(e) Micrographie MEB prise au milieu de la coupe transversale (attaque au nital, grossissement initial de $\times 2000$)

Figure 17: Coupe transversale métallurgique du coupon prélevé sur la coque du wagon WFIX 130571 près du trou de brûlure

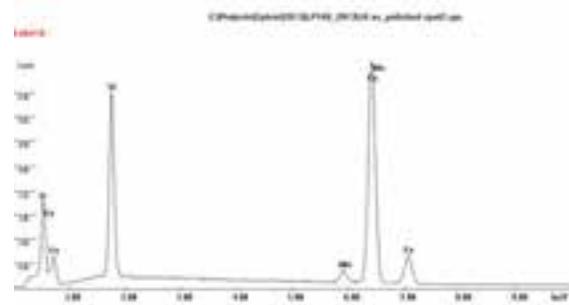


(f) Micrographie MEB montrant la couche d'oxyde recouvrant la surface extérieure (en mode d'électrons rétrodiffusés, à l'état poli, grossissement initial de ×150)

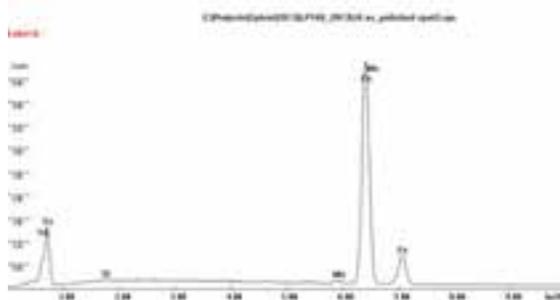
Zone 1



Zone 2

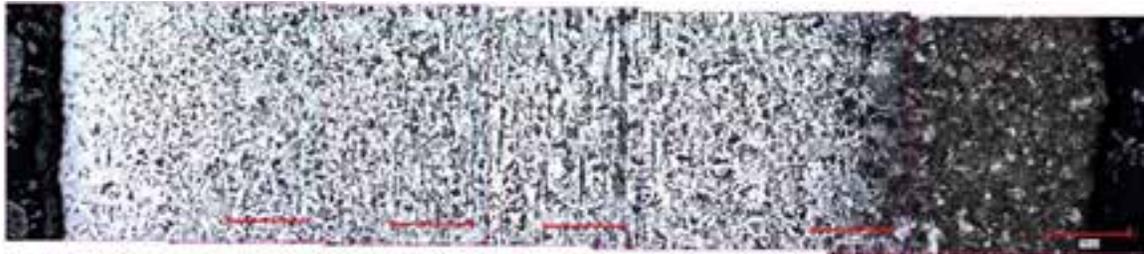


Zone 3



(g) Spectres à dispersion d'énergie obtenus des zones mises en évidence dans la figure 17f (O - oxygène, Si - silicium, Mn - manganèse, Fe - fer).

Figure 17: Coupe transversale métallurgique du coupon prélevé sur la coque du wagon WFIX 130571 près du trou de brûlure



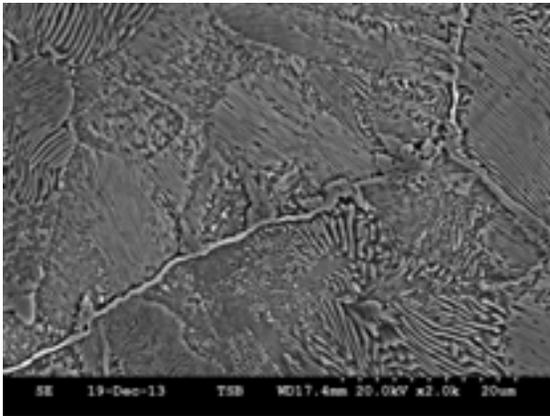
(a) Montage de micrographies optiques montrant la variation de microstructure à travers l'épaisseur de la tôle (surface extérieure à gauche, surface intérieure à droite, attaque au nital, grossissement initial de $\times 25$)



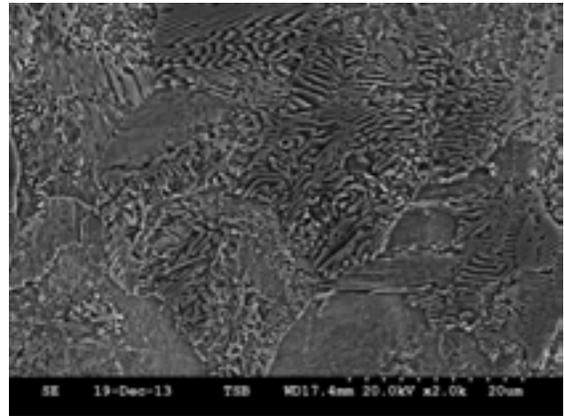
(b) Micrographie optique prise à proximité de la surface intérieure (attaque au nital, grossissement initial de $\times 200$)



(c) Micrographie optique prise à proximité de la surface intérieure (attaque au nital, grossissement initial de $\times 1000$)

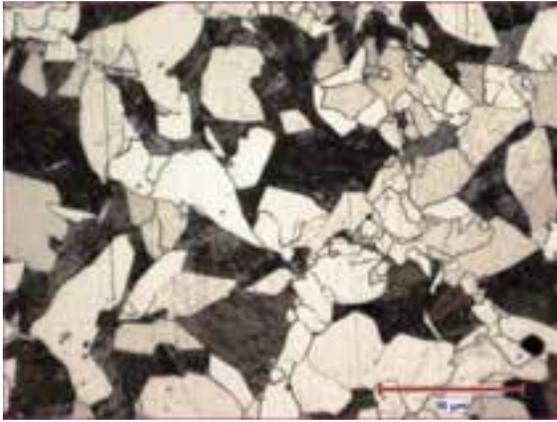


(d) Micrographie MEB, prise à proximité de la surface intérieure, des carbures décorant les joints des grains d'austénite antérieure (attaque au nital, grossissement initial de $\times 2000$).

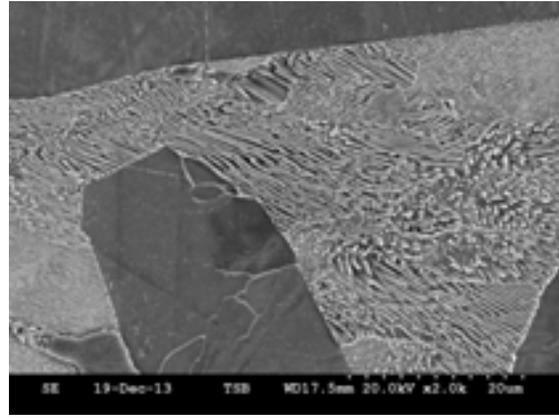


(e) Micrographie MEB, prise à proximité de la surface intérieure, de la microstructure perlitique (attaque au nital, grossissement initial de $\times 2000$)

Figure 18: Coupe transversale métallurgique du coupon prélevé sur la coque du wagon WFIX 130571 à l'écart du trou de brûlure



(f) Micrographie optique prise au milieu de la coupe transversale (attaque au nital, grossissement initial de $\times 200$)



(g) Micrographie MEB prise au milieu de la coupe transversale (attaque au nital, grossissement initial de $\times 2000$)

Figure 18: Coupe transversale métallurgique du coupon prélevé sur la coque du wagon WFIX 130571 à l'écart du trou de brûlure

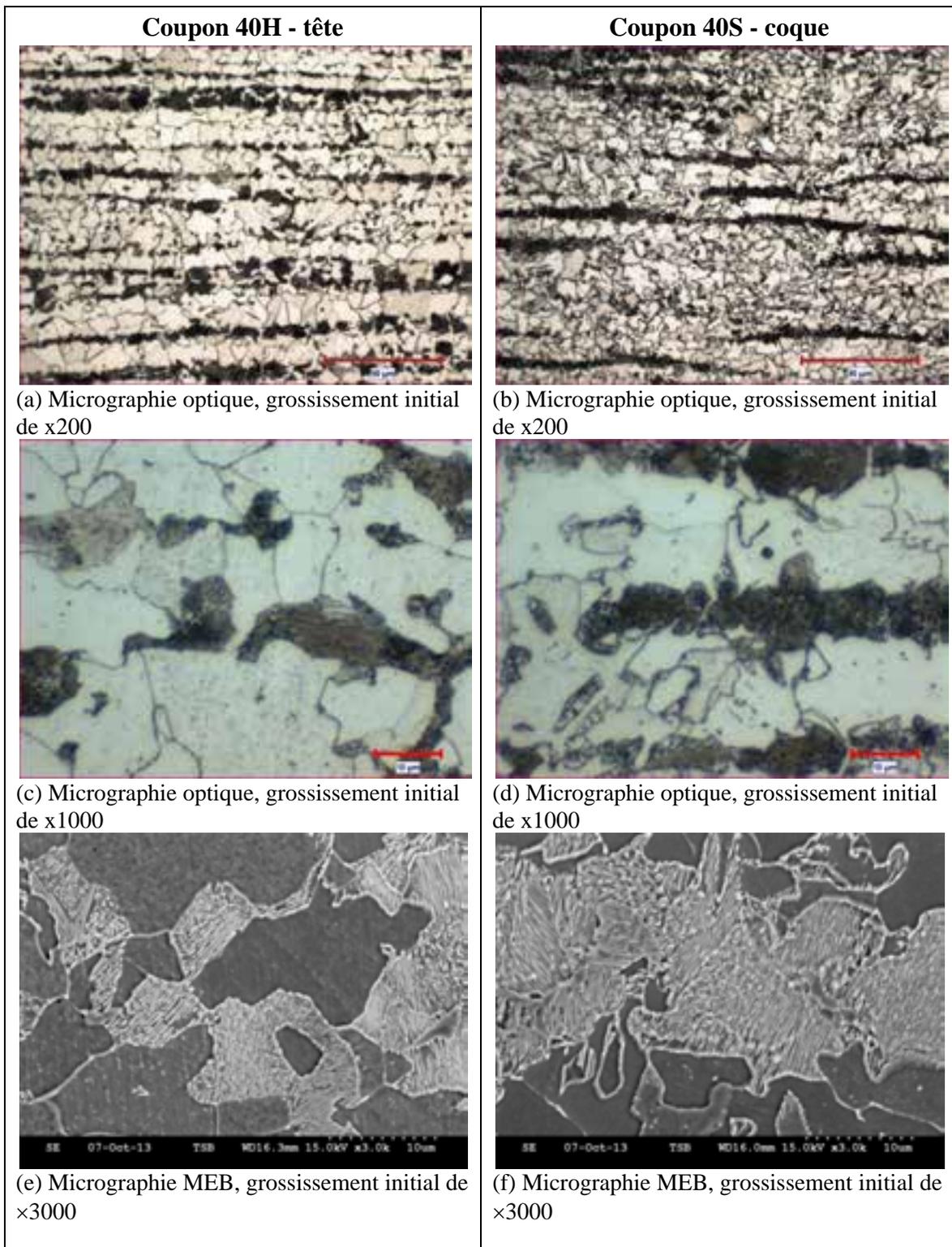


Figure 19: Coupes transversales métallurgiques (attaque au nital) des coupons provenant du wagon CTCX 735572

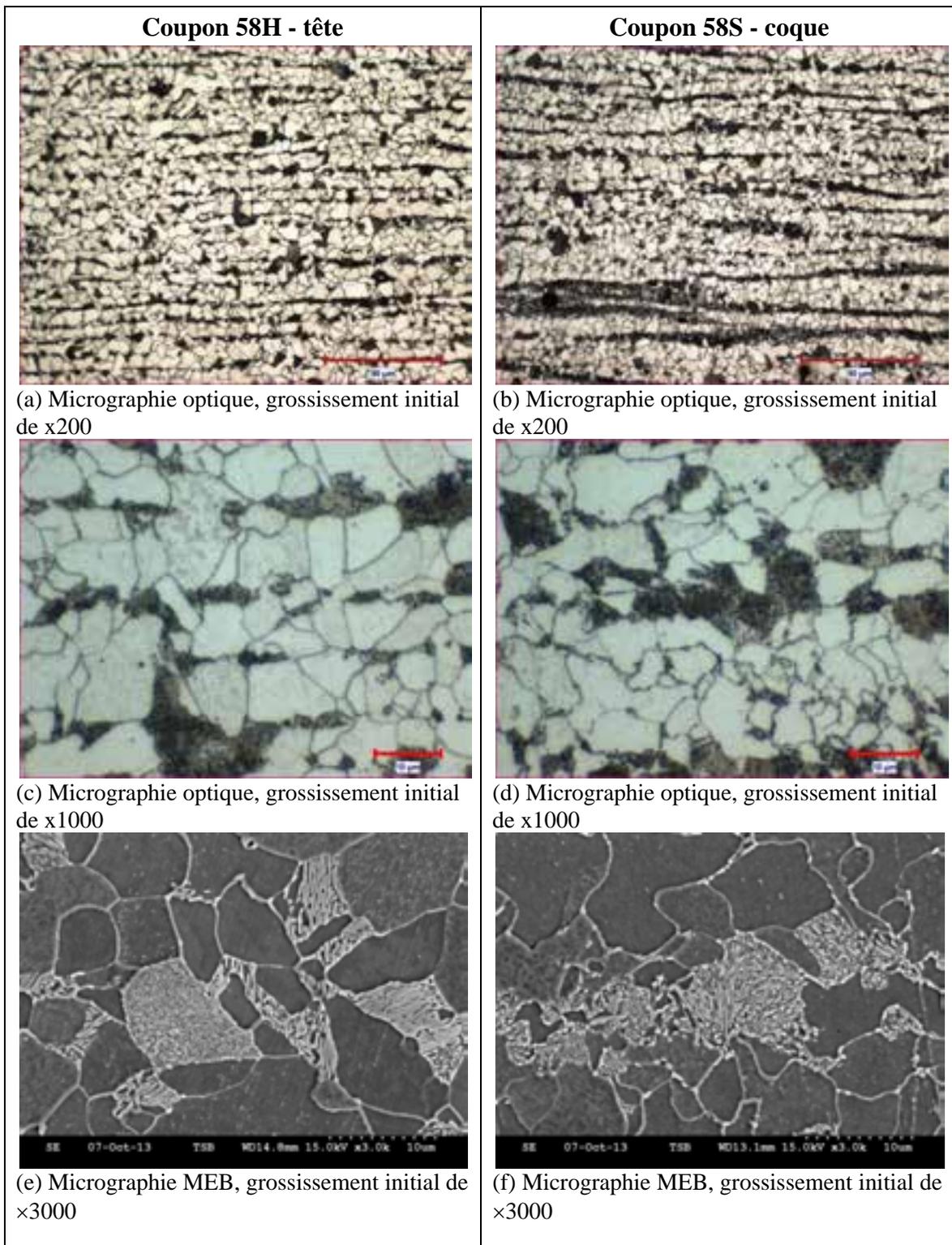


Figure 20: Coupes transversales métallurgiques (attaque au nital) des coupons provenant du wagon NATX 310515

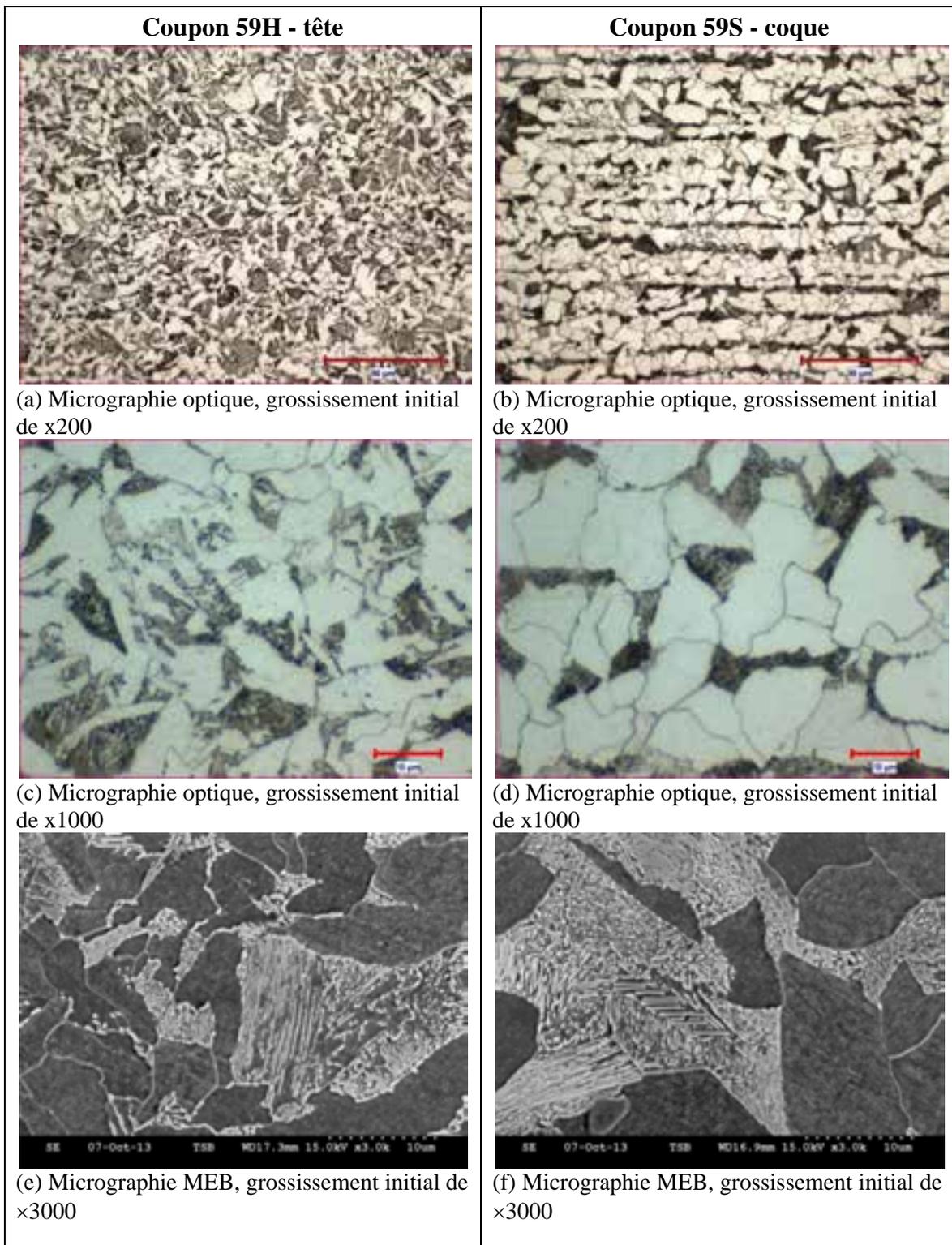


Figure 21: Coupes transversales métallurgiques (attaque au nital) des coupons provenant du wagon ACFX 79383

Annexe A: Résultats de l'analyse chimique des coupons des wagons-citernes**Tableau A-1. Coupons du wagon WFIX 130682**

Élément	Coupon 8H - tête		Coupon 8S - coque	
	Exigence de la norme ASTM A516-70 ^A (%)	Résultat (%)	Exigence de la norme TC128-B ^A (%)	Résultat (%)
Carbone	0,25 max.	0,16	0,26 max.	0,20
Manganèse	0,79 à 1,26	1,06	1,00 à 1,70	1,42
Phosphore	0,025 max.	0,012	0,025 max.	0,021
Soufre	0,015 max.	0,012	0,015 max.	0,005
Silicium	0,15 à 0,45	0,26	0,13 à 0,45	0,32
Vanadium	0,04 max.	<0,005	0,084 max.	<0,005
Cuivre	0,35 max.	0,17	0,35 max.	0,02
Nickel	0,43 max.	0,06	aucune limite	0,02
Chrome	0,34 max.	0,05	aucune limite	0,02
Molybdène	0,13 max.	0,02	aucune limite	<0,01
Aluminium	0,015 à 0,060	0,024	0,015 à 0,060	0,030
Niobium	0,03 max.	<0,005	0,03 max.	<0,005
Titane	0,020 max.	<0,005	0,020 max.	<0,005
Bore	0,0005 max.	<0,0005	0,0005 max.	<0,0005
Azote	0,012 max.	0,006	0,012 max.	0,007
Étain	0,020 max.	0,01	0,020 max.	<0,01
C_{Eq}	0,45 max.	<0,37	0,55 max.	<0,45
Cu+Ni+Cr+Mo	0,65 max.	0,3	0,65 max.	<0,07
Nb+V+Ti	0,11 max.	<0,015	0,11 max.	<0,015
Ti/N	4,0 max.	<0,83	4,0 max.	<0,71

^A Se reporter au tableau 5 dans le corps principal du rapport pour obtenir les détails.

Tableau A-2. Coupons du wagon TILX 316641

Élément	Coupon 9H - tête		Coupon 9S - coque	
	Exigence de la norme ASTM A516-70 ^A (%)	Résultat (%)	Exigence de la norme TC128-B ^A (%)	Résultat (%)
Carbone	0,25 max.	0,12	0,26 max.	0,21
Manganèse	0,79 à 1,26	1,31	1,00 à 1,70	1,43
Phosphore	0,025 max.	0,014	0,025 max.	0,020
Soufre	0,015 max.	0,008	0,015 max.	0,006
Silicium	0,15 à 0,45	0,31	0,13 à 0,45	0,33
Vanadium	0,04 max.	<0,005	0,084 max.	<0,005
Cuivre	0,35 max.	0,24	0,35 max.	0,03
Nickel	0,43 max.	0,13	aucune limite	0,02
Chrome	0,34 max.	0,10	aucune limite	0,02
Molybdène	0,13 max.	0,04	aucune limite	<0,01
Aluminium	0,015 à 0,060	0,036	0,015 à 0,060	0,028
Niobium	0,03 max.	<0,005	0,03 max.	<0,005
Titane	0,020 max.	<0,005	0,020 max.	<0,005
Bore	0,0005 max.	<0,0005	0,0005 max.	<0,0005
Azote	0,012 max.	0,009	0,012 max.	0,007
Étain	0,020 max.	0,01	0,020 max.	<0,01
C_{Eq}	0,45 max.	<0,39	0,55 max.	<0,46
Cu+Ni+Cr+Mo	0,65 max.	0,51	0,65 max.	<0,08
Nb+V+Ti	0,11 max.	<0,015	0,11 max.	<0,015
Ti/N	4,0 max.	<0,56	4,0 max.	<0,71

^A Se reporter au tableau 5 dans le corps principal du rapport pour obtenir les détails.

Tableau A-3. Coupons du wagon ACFX 79709

Élément	Coupon 15H - tête		Coupon 15S - coque	
	Exigence de la norme ASTM A515-70 ^A (%)	Résultat (%)	Exigence de la norme TC128-B ^A (%)	Résultat (%)
Carbone	0,31 max.	0,27	0,26 max.	0,18
Manganèse	1,30 max.	0,46	1,00 à 1,70	1,13
Phosphore	0,025 max.	0,012	0,025 max.	0,010
Soufre	0,025 max.	0,008	0,015 max.	0,014
Silicium	0,15 à 0,45	0,25	0,13 à 0,45	0,19
Vanadium	0,04 max.	<0,005	0,084 max.	0,044
Cuivre	0,43 max.	0,16	0,35 max.	0,30
Nickel	0,43 max.	0,12	aucune limite	0,22
Chrome	0,34 max.	0,11	aucune limite	0,17
Molybdène	0,13 max.	0,03	aucune limite	0,05
Aluminium	non spécifié	<0,005	0,015 à 0,060	0,018
Niobium	0,03 max.	<0,005	0,03 max.	<0,005
Titane	0,04 max.	<0,005	0,020 max.	<0,005
Bore	0,0015 max.	<0,0005	0,0005 max.	<0,0005
Azote	non spécifié	0,008	0,012 max.	0,010
Étain	non spécifié	0,01	0,020 max.	0,02
C_{Eq}	0,47 max.	<0,39	0,55 max.	0,46
Cu+Ni+Cr+Mo	1,00 max.	0,42	0,65 max.	0,74
Nb+V+Ti	non spécifié	<0,015	0,11 max.	<0,054
Ti/N	non spécifié	<0,63	4,0 max.	<0,50

^A Se reporter au tableau 5 dans le corps principal du rapport pour obtenir les détails.

Tableau A-4. Coupons du wagon PROX 44293

Élément	Coupon 20H - tête		Coupon 20S - coque	
	Exigence de la norme ASTM A516-70 ^A (%)	Résultat (%)	Exigence de la norme TC128-B ^A (%)	Résultat (%)
Carbone	0,25 max.	0,18	0,26 max.	0,23
Manganèse	0,79 à 1,26	1,13	1,00 à 1,70	1,51
Phosphore	0,025 max.	0,016	0,025 max.	0,014
Soufre	0,015 max.	0,007	0,015 max.	0,012
Silicium	0,15 à 0,45	0,33	0,13 à 0,45	0,27
Vanadium	0,04 max.	<0,005	0,084 max.	0,034
Cuivre	0,35 max.	0,02	0,35 max.	0,02
Nickel	0,43 max.	0,01	aucune limite	0,01
Chrome	0,34 max.	0,12	aucune limite	0,16
Molybdène	0,13 max.	<0,08	aucune limite	0,04
Aluminium	0,015 à 0,060	0,038	0,015 à 0,060	0,023
Niobium	0,03 max.	0,005	0,03 max.	<0,005
Titane	0,020 max.	<0,005	0,020 max.	<0,005
Bore	0,0005 max.	<0,0005	0,0005 max.	<0,0005
Azote	0,012 max.	<0,005	0,012 max.	0,005
Étain	0,020 max.	<0,01	0,020 max.	0,01
C_{Eq}	0,45 max.	<0,41	0,55 max.	0,53
Cu+Ni+Cr+Mo	0,65 max.	0,23	0,65 max.	0,23
Nb+V+Ti	0,11 max.	<0,015	0,11 max.	<0,044
Ti/N	4,0 max.	1,0	4,0 max.	<1,0

^A Se reporter au tableau 5 dans le corps principal du rapport pour obtenir les détails.

Tableau A-5. Coupons du wagon ACFX 76605

Élément	Coupon 24H - tête	
	Exigence de la norme ASTM A515-70 ^A (%)	Résultat (%)
Carbone	0,31 max.	0,25
Manganèse	1,30 max.	0,50
Phosphore	0,025 max.	0,006
Soufre	0,025 max.	0,008
Silicium	0,15 à 0,45	0,29
Vanadium	0,04 max.	<0,005
Cuivre	0,43 max.	0,16
Nickel	0,43 max.	0,13
Chrome	0,34 max.	0,11
Molybdène	0,13 max.	0,03
Aluminium	non spécifié	<0,005
Niobium	0,03 max.	<0,005
Titane	0,04 max.	<0,005
Bore	0,0015 max.	<0,0005
Azote	non spécifié	0,007
Étain	non spécifié	0,01
C_{Eq}	0,47 max.	0,38
Cu+Ni+Cr+Mo	1,00 max.	0,43
Nb+V+Ti	non spécifié	<0,015
Ti/N	non spécifié	<0,71

^A Se reporter au tableau 5 dans le corps principal du rapport pour obtenir les détails.

Tableau A-6. Coupon du wagon WFIX 130571

Élément	Coupon 34S - coque	
	Exigence de la norme TC128-B ^A (%)	Résultat (%)
Carbone	0,26 max.	0,11
Manganèse	1,00 à 1,70	1,23
Phosphore	0,025 max.	0,015
Soufre	0,015 max.	<0,005
Silicium	0,13 à 0,45	0,32
Vanadium	0,084 max.	0,031
Cuivre	0,35 max.	0,28
Nickel	aucune limite	0,12
Chrome	aucune limite	0,12
Molybdène	aucune limite	0,02
Aluminium	0,015 à 0,060	0,035
Niobium	0,03 max.	<0,005
Titane	0,020 max.	<0,005
Bore	0,0005 max.	<0,0005
Azote	0,012 max.	0,008
Étain	0,020 max.	0,01
C_{Eq}	0,55 max.	0,38
Cu+Ni+Cr+Mo	0,65 max.	0,54
Nb+V+Ti	0,11 max.	<0,041
Ti/N	4,0 max.	<0,63

^A Se reporter au tableau 5 dans le corps principal du rapport pour obtenir les détails.

Tableau A-7. Coupons du wagon CTCX 735572

Élément	Coupon 40H - tête		Coupon 40S - coque	
	Exigence de la norme ASTM A516-70 ^A (%)	Résultat (%)	Exigence de la norme TC128-B ^A (%)	Résultat (%)
Carbone	0,25 max.	0,17	0,26 max.	0,26
Manganèse	0,79 à 1,26	1,13	1,00 à 1,70	1,23
Phosphore	0,025 max.	0,015	0,025 max.	0,011
Soufre	0,015 max.	0,007	0,015 max.	<0,005
Silicium	0,15 à 0,45	0,32	0,13 à 0,45	0,31
Vanadium	0,04 max.	<0,005	0,084 max.	0,027
Cuivre	0,35 max.	0,02	0,35 max.	0,25
Nickel	0,43 max.	0,02	aucune limite	0,12
Chrome	0,34 max.	0,12	aucune limite	0,11
Molybdène	0,13 max.	0,09	aucune limite	0,04
Aluminium	0,015 à 0,060	0,035	0,015 à 0,060	0,036
Niobium	0,03 max.	<0,005	0,03 max.	<0,005
Titane	0,020 max.	<0,005	0,020 max.	<0,005
Bore	0,0005 max.	<0,0005	0,0005 max.	<0,0005
Azote	0,012 max.	<0,005	0,012 max.	0,007
Étain	0,020 max.	<0,01	0,020 max.	0,01
C_{Eq}	0,45 max.	<0,40	0,55 max.	0,53
Cu+Ni+Cr+Mo	0,65 max.	0,25	0,65 max.	0,52
Nb+V+Ti	0,11 max.	<0,015	0,11 max.	<0,037
Ti/N	4,0 max.	1,0	4,0 max.	<0,71

^A Se reporter au tableau 5 dans le corps principal du rapport pour obtenir les détails.

Tableau A-8. Coupons du wagon NATX 310515

Élément	Coupon 58H - tête		Coupon 58S - coque	
	Exigence de la norme ASTM A516-70 ^A (%)	Résultat (%)	Exigence de la norme TC128-B ^A (%)	Résultat (%)
Carbone	0,25 max.	0,17	0,26 max.	0,20
Manganèse	0,79 à 1,26	1,08	1,00 à 1,70	1,36
Phosphore	0,025 max.	0,009	0,025 max.	0,012
Soufre	0,015 max.	0,006	0,015 max.	0,008
Silicium	0,15 à 0,45	0,31	0,13 à 0,45	0,20
Vanadium	0,04 max.	<0,005	0,084 max.	0,040
Cuivre	0,35 max.	0,04	0,35 max.	0,26
Nickel	0,43 max.	0,02	aucune limite	0,12
Chrome	0,34 max.	0,11	aucune limite	0,11
Molybdène	0,13 max.	<0,08	aucune limite	0,03
Aluminium	0,015 à 0,060	0,031	0,015 à 0,060	0,023
Niobium	0,03 max.	<0,005	0,03 max.	<0,005
Titane	0,020 max.	<0,005	0,020 max.	<0,005
Bore	0,0005 max.	<0,0005	0,0005 max.	<0,0005
Azote	0,012 max.	0,005	0,012 max.	0,008
Étain	0,020 max.	0,01	0,020 max.	0,01
C_{Eq}	0,45 max.	<0,39	0,55 max.	0,49
Cu+Ni+Cr+Mo	0,65 max.	0,25	0,65 max.	0,52
Nb+V+Ti	0,11 max.	<0,015	0,11 max.	<0,050
Ti/N	4,0 max.	<1,0	4,0 max.	<0,63

^A Se reporter au tableau 5 dans le corps principal du rapport pour obtenir les détails.

Tableau A-9. Coupons du wagon ACFX 79383

Élément	Coupon 15H - tête		Coupon 15S - coque	
	Exigence de la norme ASTM A515-70 ^A (%)	Résultat (%)	Exigence de la norme TC128-B ^A (%)	Résultat (%)
Carbone	0,31 max.	0,27	0,26 max.	0,18
Manganèse	1,30 max.	0,42	1,00 à 1,70	1,22
Phosphore	0,025 max.	0,008	0,025 max.	0,011
Soufre	0,025 max.	0,016	0,015 max.	0,012
Silicium	0,15 à 0,45	0,19	0,13 à 0,45	0,23
Vanadium	0,04 max.	<0,005	0,084 max.	0,068
Cuivre	0,43 max.	0,33	0,35 max.	0,24
Nickel	0,43 max.	0,21	aucune limite	0,13
Chrome	0,34 max.	0,20	aucune limite	0,07
Molybdène	0,13 max.	0,07	aucune limite	0,03
Aluminium	non spécifié	<0,005	0,015 à 0,060	0,005
Niobium	0,03 max.	<0,005	0,03 max.	<0,005
Titane	0,04 max.	<0,005	0,020 max.	<0,005
Bore	0,0015 max.	<0,0005	0,0005 max.	<0,0005
Azote	non spécifié	0,007	0,012 max.	0,008
Étain	non spécifié	0,02	0,020 max.	0,02
C_{Eq}	0,47 max.	<0,43	0,55 max.	0,44
Cu+Ni+Cr+Mo	1,00 max.	0,81	0,65 max.	0,47
Nb+V+Ti	non spécifié	<0,015	0,11 max.	<0,078
Ti/N	non spécifié	<0,71	4,0 max.	<0,63

^A Se reporter au tableau 5 dans le corps principal du rapport pour obtenir les détails.