

BEA-TT

*Bureau d'enquêtes sur les accidents
de transport terrestre*

*Rapport d'enquête technique
sur le déraillement de wagons
de matières dangereuses
survenu le 22 mai 2010
à Neufchâteau (88)*

Janvier 2012



Ressources, territoires, habitats et logement
Énergies et climat
Prévention des risques
Développement durable
Infrastructures, transports et mer

**Présent
pour
l'avenir**

**Conseil Général de l'Environnement
et du Développement Durable**

**Bureau d'Enquêtes sur les Accidents
de Transport Terrestre**

Affaire n° BEATT-2010-008

**Rapport d'enquête technique
sur le déraillement de wagons de matières dangereuses
survenu le 22 mai 2010 à Neufchâteau (88)**

Bordereau documentaire

Organisme commanditaire : Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement (MEDDTL)

Organisme auteur : Bureau d'Enquêtes sur les Accidents de Transport Terrestre (BEA-TT)

Titre du document : Rapport d'enquête technique sur le déraillement de wagons de matières dangereuses survenu le 22 mai 2010 à Neufchâteau (88)

N° ISRN : EQ-BEAT--12-01--FR

Proposition de mots-clés : transport de matières dangereuses, wagon, roue, fissuration, maintenance

Avertissement

L'enquête technique faisant l'objet du présent rapport est réalisée dans le cadre du titre III de la loi n° 2002-3 du 3 janvier 2002, codifié aux articles L 1621-1 à 1622-2 du code des transports et du décret n° 2004-85 du 26 janvier 2004, relatifs notamment aux enquêtes techniques après accident ou incident de transport terrestre.

Cette enquête a pour seul objet de prévenir de futurs accidents, en déterminant les circonstances et les causes de l'évènement analysé et en établissant les recommandations de sécurité utiles. Elle ne vise pas à déterminer des responsabilités.

En conséquence, l'utilisation de ce rapport à d'autres fins que la prévention pourrait conduire à des interprétations erronées.

SOMMAIRE

GLOSSAIRE.....	11
RÉSUMÉ.....	13
1 - CONSTATS IMMÉDIATS ET ENGAGEMENT DE L'ENQUÊTE.....	15
1.1 - L'accident.....	15
1.2 - Secours et bilan.....	16
1.3 - Mesures prises après l'accident.....	17
1.4 - Engagement et organisation de l'enquête.....	17
2 - CONTEXTE DE L'ACCIDENT.....	19
2.1 - La ligne ferroviaire de Culmont-Chalindrey à Toul.....	19
2.2 - Le train 58701.....	20
2.3 - Les wagons déraillés.....	21
3 - COMPTE RENDU DES INVESTIGATIONS EFFECTUÉES.....	23
3.1 - Résumé des déclarations et des témoignages.....	23
3.1.1 -Déclarations du conducteur du train déraillé.....	23
3.1.2 -Déclarations du régulateur du COGC de Metz-Nancy.....	23
3.1.3 -Déclarations de l'agent circulation de matinée de Neufchâteau.....	24
3.1.4 -Déclarations de l'agent circulation de soirée de Neufchâteau.....	24
3.1.5 -Déclarations de l'agent circulation de Merrey.....	24
3.1.6 -Déclarations du chef de service de Chalindrey.....	24
3.2 - Exploitation des enregistrements radio sol-train.....	24
3.3 - Examen des enregistrements graphiques.....	25
3.4 - Constats portant sur la voie.....	25
3.5 - Constats portant sur le premier wagon déraillé.....	26
3.6 - Origine du déraillement.....	27
3.7 - Caractéristiques du premier wagon déraillé.....	27
3.7.1 -Caractéristiques techniques.....	27
3.7.2 -Construction.....	28
3.7.3 -Maintenance.....	28
3.7.4 -Parcours et travail.....	29
3.8 - Examen de la roue brisée de Neufchâteau.....	29
3.9 - Retour d'expérience sur des événements similaires.....	30
4 - DÉROULEMENT DE L'ACCIDENT ET DES SECOURS.....	31
4.1 - Circulation du train 58701.....	31
4.2 - Déraillement.....	31
4.3 - Alerte et protection contre les risques ferroviaires.....	32

4.4 - Intervention des services de secours.....	32
5 - MESURES CONSERVATOIRES PORTANT SUR LE MATÉRIEL ROULANT.....	35
5.1 - Mesures décidées par l'EPSF en mai et juin 2010.....	35
5.2 - Mesures décidées par l'EPSF en janvier 2011.....	36
5.3 - Fissures détectées au titre des mesures conservatoires.....	36
5.4 - Autres détections depuis juin 2010.....	37
5.5 - Autres cas plus anciens signalés par des détenteurs.....	37
5.6 - Similitude des fissurations détectées après Neufchâteau.....	37
6 - RECHERCHE DES CAUSES DES FISSURATIONS OBSERVÉES.....	39
6.1 - Les roues des wagons.....	39
6.1.1 -Généralités.....	39
6.1.2 -La conception des roues.....	39
6.1.3 -Les roues ORE.....	39
6.1.4 -Les roues ORE fabriquées par Valdunes.....	40
6.2 - Les wagons concernés.....	42
6.3 - Rappels sommaires de physique des matériaux.....	42
6.3.1 -La fatigue des matériaux.....	42
6.3.2 -Le phénomène de concentration des contraintes.....	43
6.3.3 -La fissuration par fatigue d'une pièce réelle.....	43
6.4 - Examen des différentes causes de fissuration possibles.....	44
6.4.1 -Les sollicitations.....	44
6.4.2 -La forme de la roue fabriquée.....	47
6.4.3 -Les caractéristiques de surface de la roue fabriquée.....	49
6.4.4 -Les caractéristiques du métal des roues.....	50
6.5 - Synthèse sur les causes des fissurations.....	50
7 - LA MAINTENANCE DES WAGONS ET DES ESSIEUX.....	51
7.1 - La maintenance en exploitation.....	51
7.2 - La maintenance en atelier.....	52
7.2.1 -L'organisation en vigueur jusqu'en 2006.....	52
7.2.2 -L'organisation en vigueur depuis 2006.....	52
7.3 - La visibilité des fissures lors des opérations de maintenance.....	53
7.4 - Les examens magnétoscopiques des roues à toile brute.....	55
7.5 - Historique de la maintenance des wagons et des essieux concernés.....	56
8 - ANALYSE DES CAUSES ET ORIENTATIONS PRÉVENTIVES.....	57
8.1 - Le déraillement.....	57
8.1.1 -Les données de conception des roues de wagon.....	57
8.1.2 -La détection des fissures de roues de wagon en maintenance.....	59
8.2 - Les mesures prises après le déraillement.....	60
8.2.1 -L'alerte et la protection ferroviaire.....	60

8.2.2 -Les mesures conservatoires.....	61
9 - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	63
9.1 - Causes de l'accident.....	63
9.2 - Recommandations.....	63
9.2.1 -Les données de conception des roues	63
9.2.2 -La détection des fissures de roues de wagon en maintenance.....	64
9.2.3 -Le suivi des wagons et des essieux.....	65
ANNEXES.....	67
Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête.....	69
Annexe 2 : Liste des rapports d'études et d'expertises en lien avec l'enquête	70
Annexe 3 : Conclusions du rapport d'étape du 26 janvier 2011.....	71
Annexe 4 : Diagramme du wagon citerne AFR de 70 m3.....	72
Annexe 5 : Processus de fabrication des roues Valdunes.....	73
Annexe 6 : Analyse statistique.....	75
Annexe 7 : Historiques de maintenance de certains wagons présentant des roues fissurées	77

Glossaire

- **AC** : Agent Circulation
- **AEF** : Agence d'Essai Ferroviaire
- **AFR** : Arbel-Fauvet-Rail, constructeur de wagons
- **AFWP** : Association Française des Wagons de Particuliers
- **Atirrail, Ermewa, EVS, GATX, NACCO, VTG** : Détenteurs de wagons
- **CG** : Conduite Générale de frein
- **CIM** : Centre d'Ingénierie du Matériel (SNCF)
- **CUU** : Contrat Uniforme d'Utilisation des wagons.
- **COGC** : Centre Opérationnel de Gestion des Circulations
- **DB** : Deutsche Bahn, entreprise ferroviaire allemande
- **ECM** : Entité en Charge de la Maintenance
- **EPSF** : Etablissement Public de Sécurité Ferroviaire
- **ERRI** : European Railway Research Institute
- **ORE** : Office de Recherche et d'Essais de l'UIC
- **PK** : Point kilométrique
- **RAT** : Reconnaissance de l'Aptitude au Transport
- **RFN** : Réseau Ferré National
- **SNCF** : Société Nationale des Chemins de fer Français
- **TIV** : Tableau Indicateur de Vitesse
- **UIC** : Union Internationale des Chemins de fer.
- **Valdunes** : Fabricant français de roues, d'axes et d'essieux montés ferroviaires
- **VPI** : Vereinigung der Privatgüterwagen Interessenten, association de détenteurs de wagons
- **VT** : Visite Technique

Résumé

Le 22 mai 2010, à 10h45, les quatre derniers wagons du train de Fret-SNCF 58701 déraillent en pleine voie peu avant la gare de Neufchâteau (88). Trois d'entre eux se couchent sur la voie adjacente.

Ces trois wagons sont des citernes de matières dangereuses. L'un qui contient du phénol, présente une fuite au niveau de son dôme qui nécessite la mise en place d'un périmètre de sécurité, puis des opérations de colmatage et de transvasement longues et complexes.

L'accident ne fait aucune victime et la pollution est très ponctuelle. Cependant, les dégâts causés à l'infrastructure et les conséquences sur la circulation ferroviaire sont importants.

Le déraillement est dû à une cause directe unique : la rupture de la roue avant gauche du wagon citerne n° 33 87 792 9543-9.

Cette rupture, accompagnée de la perte d'environ un tiers de la jante de la roue, a occasionné la perte de guidage de l'essieu avant de ce wagon et son déraillement.

Elle est la conséquence d'une fissuration de fatigue qui s'est amorcée en plusieurs endroits de la face externe de la toile de roue, à proximité du raccordement entre la toile et la jante, et qui s'est propagée, sans être détectée, jusqu'à atteindre une taille suffisante pour provoquer la rupture de la roue.

Des fissurations similaires, dont certaines avaient déjà atteint une taille critique, ont été mises en évidence après le déraillement de Neufchâteau sur 29 roues identiques.

L'analyse des causes de l'accident conduit à formuler huit recommandations dans les deux domaines suivants :

- les données utilisées pour la conception des roues de wagon ;
- la détection des fissures de roues de wagon en maintenance.

Les conditions de mise en œuvre des mesures conservatoires appellent une recommandation supplémentaire portant sur le suivi des wagons et des essieux par les détenteurs et les entités en charge de la maintenance.

Par ailleurs, l'examen de la mise en œuvre des mesures d'alerte et de protection ferroviaire est l'occasion de rappeler à la SNCF les recommandations émises sur ce thème à l'issue des enquêtes techniques réalisées sur les accidents de Boisseuil et d'Orthez et de l'inviter à veiller à la mise en œuvre des actions annoncées.

1 - Constats immédiats et engagement de l'enquête

1.1 - L'accident

Le 22 mai 2010, à 10h45, les quatre derniers wagons du train de Fret-SNCF 58701, qui circulait alors entre Culmont-Chalindrey et Toul, déraillent, en pleine voie, à 3 km au sud de la gare de Neufchâteau (88), juste avant d'atteindre cette agglomération.

Trois des wagons déraillés se couchent sur la voie adjacente et subissent des dégâts importants.

Ces trois wagons sont des citernes de matières dangereuses. Celui portant le n° 33 87 792 9543-9, qui est le premier wagon déraillé, présente une légère fuite au niveau de son dôme.

Les deux autres wagons citernes concernés ne présentent pas de fuite.



Figure 1 : Vue d'ensemble du déraillement

La roue avant gauche du premier wagon déraillé est cassée. Un tiers environ de la jante est manquant.



Figure 2 : Vue du wagon n° 33 87 792 9543-9 et de sa roue cassée

Outre le déraillement des 4 derniers wagons du train qui en comportait 30, une rupture d'attelage s'est produite dans le corps du train, entre le 20^e et le 21^e wagon.

Par ailleurs, sur près de 3 km en amont du déraillement, la file gauche du rail présente des traces d'impacts à intervalles réguliers, tous les 3 m environ.

1.2 - Secours et bilan

Les pompiers et les gendarmes sont avisés à 11h33. Ils sont sur les lieux du déraillement à 11h50 et mettent en place un périmètre de sécurité sur un rayon de 200 m.

Les pompiers inspectent les wagons déraillés et confirment la fuite au niveau du dôme du wagon n° 33 87 792 9543-9.

Le produit transporté est du phénol liquide qui est un produit très toxique par inhalation, ingestion ou contact (code danger 60). Toutefois, comme ce produit se solidifie à température ambiante, la fuite s'est colmatée d'elle-même, limitant ainsi la pollution du sol et de l'atmosphère et le risque d'inhalation par les personnes.

Des spécialistes des sociétés NOVAPEX et BASF, respectivement expéditrice et destinataire du produit, sont dépêchés sur les lieux pour conseiller les pompiers et aider aux opérations de transvasement qui s'avèrent difficiles et durent jusqu'au 25 mai.

L'accident n'a pas fait de victime et la pollution a été très ponctuelle, limitée au ballast souillé par la fuite de phénol.

En revanche, le bilan matériel de l'accident est important :

- 4 wagons sont endommagés ;
- la voie 1 sur laquelle le déraillement a eu lieu est fortement détériorée sur 600 m ;
- la voie 2 sur laquelle les wagons se sont couchés est endommagée.

1.3 - Mesures prises après l'accident

Les travaux de réparation des infrastructures sont réalisés les 26 et 27 mai et les voies sont rendues à la circulation ce 27 mai à 18h50 avec une limitation temporaire de vitesse à 40 km/h.

La rupture de roue du wagon n° 33 87 792 9543-9 ainsi que les fissures observées sur cette roue lors de l'enquête immédiate conduisent l'Etablissement Public de Sécurité Ferroviaire (EPSF) à envisager la possibilité d'un défaut affectant d'autres roues du même lot de fabrication. L'EPSF émet donc, dès le 27 mai, un ordre d'arrêt et de vérification visant tous les wagons ayant des roues provenant des mêmes coulées que les roues du wagon susvisé.

L'EPSF étendra et précisera ces mesures conservatoires dans les jours et les semaines qui suivront, à la lumière des résultats des vérifications demandées et des avis des experts sollicités.

1.4 - Engagement et organisation de l'enquête

Au vu des circonstances et du contexte de cet accident, le directeur du BEA-TT a ouvert le 26 mai 2010 une enquête technique en application du deuxième alinéa de l'article 20 du décret n° 2004-85 du 26 janvier 2004 relatif notamment aux enquêtes techniques après accident de transport terrestre (annexe 1).

L'enquêteur a eu communication des pièces de l'enquête préliminaire diligentée par le Procureur de la République d'Épinal ainsi que des rapports d'intervention du service départemental d'incendie et de secours des Vosges (SDIS 88).

La cause directe du déraillement ayant été rapidement identifiée, l'essentiel de l'enquête a porté sur la recherche des causes de la rupture de roue qui l'a provoqué.

Dans ce cadre, l'enquêteur s'est rendu à diverses reprises à l'Agence d'Essai Ferroviaire (AEF) où l'essieu à l'origine du déraillement ainsi que d'autres essieux de wagon, dont les roues présentaient des défauts semblables, ont été envoyés pour expertises.

Il a visité l'usine Valdunes de Dunkerque où les roues concernées sont forgées et a rencontré les responsables techniques de cette société.

Il a assisté à des examens magnétoscopiques de roues dans différents ateliers, SNCF et privés.

Il a rencontré des experts en matière de conception et de maintenance des essieux de la SNCF, de la RATP et de la DB.

Il a également rencontré chacun des détenteurs des wagons initialement concernés.

Il a visité les infrastructures ferroviaires de plusieurs sites expéditeurs ou destinataires de phénol ou de lessive de soude.

L'enquête s'est également appuyée sur¹ :

- les rapports des expertises réalisées par l'AEF à la demande conjointe de SNCF, Valdunes et NACCO ;
- les rapports des expertises réalisées par la DB à la demande de NACCO ;
- les calculs de contraintes réalisés par le Centre d'Ingénierie du Matériel de la SNCF (CIM) et par Valdunes ;
- les essais effectués par l'AEF à la demande du BEA-TT, afin d'évaluer le rôle de la fatigue à faible nombre de cycles dans l'amorçage et la propagation des fissures des toiles de roues.

Des réunions d'information et d'échanges ont été tenues les 15 octobre 2010, 10 mars 2011 et 4 mai 2011 avec les entités les plus concernées.

Par ailleurs, en janvier 2011, compte tenu des éléments qu'il avait déjà recueillis, le BEA-TT a émis, sans attendre la conclusion de l'enquête et en application de l'article L 1621-20 du code des transports, une première série de recommandations de sécurité. Elles ont fait l'objet d'un rapport d'étape, paru le 26 janvier 2011, dont les conclusions figurent en annexe 3 du présent rapport.

1 Les documents présentant les résultats des expertises, calculs et essais précités peuvent être consultés sur le site internet du BEA-TT (<http://www.bea-tt.developpement-durable.gouv.fr>). L'annexe 2 du présent document en donne la liste.

2 - Contexte de l'accident

2.1 - La ligne ferroviaire de Culmont-Chalindrey à Toul

Le déraillement s'est produit au km 67,118 de la ligne de Culmont-Chalindrey à Toul. Cette ligne est, pour le trafic fret, l'une des plus importantes du réseau ferré national (RFN) puisqu'elle fait partie du corridor reliant les ports et les industries du Nord-Ouest de l'Europe à la vallée du Rhône et à la Méditerranée.

Elle est également empruntée par des trains régionaux et les TGV desservant l'axe Metz – Lyon – Marseille.

Au total, environ 60 trains y circulent quotidiennement dans chaque sens.

Il s'agit d'une ligne à double voie électrifiée en 25 kV, pouvant être parcourue à une vitesse maximale de 120 à 160 km/h selon les secteurs.

Le cantonnement des trains est assuré en block automatique lumineux (BAL).

La totalité de la ligne est équipée de la radio sol-train (RST) qui est assurée par le système normalisé européen GSM-R.

Elle est régulée par le centre opérationnel de gestion des circulations (COGC) de Nancy.

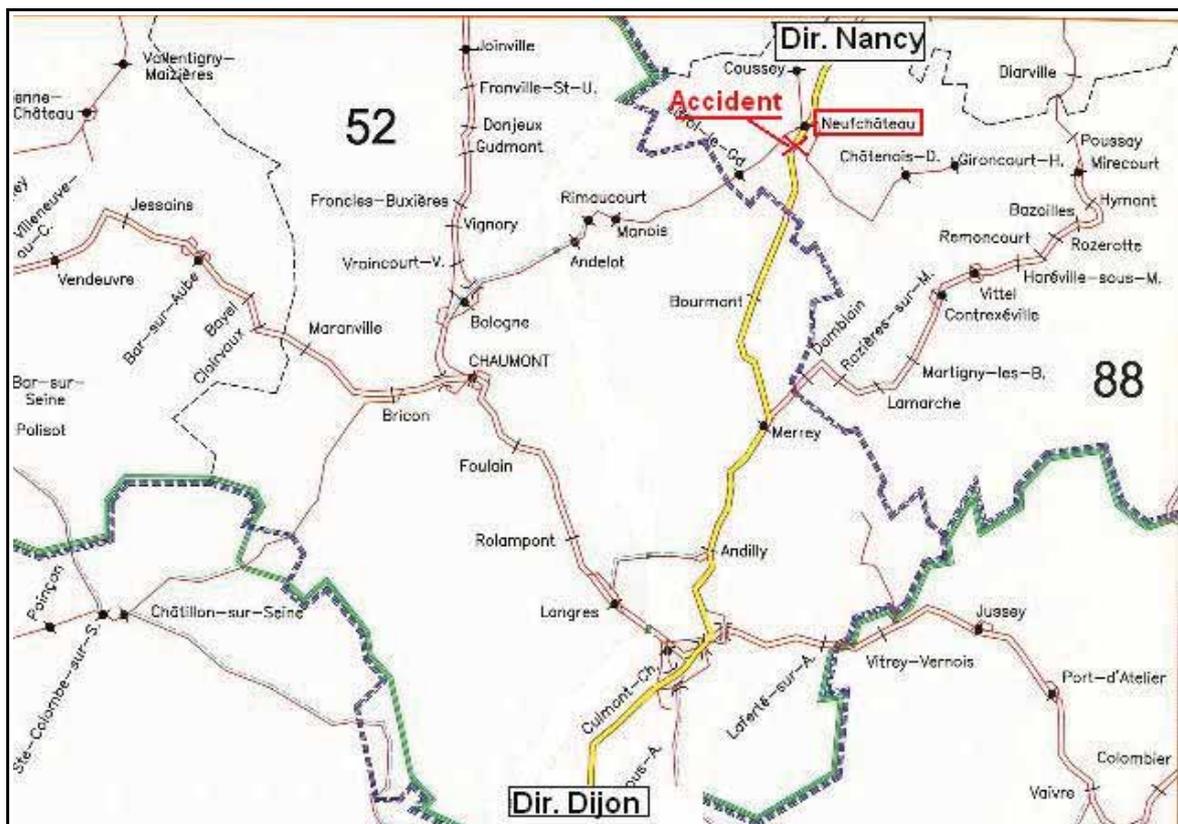


Figure 3 : Carte ferroviaire

Entre Merrey et Neufchâteau, tronçon où a eu lieu l'accident, la ligne présente un caractère sinueux n'autorisant qu'une vitesse maximale de 120 km/h.

Le lieu de l'accident est situé dans un secteur agricole et forestier où la ligne présente une courbe à gauche de 1 000 m de rayon. Les habitations les plus proches, qui font partie de l'agglomération de Neufchâteau, sont situées à 2 000 m environ.



Figure 4 : Vue aérienne du site

2.2 - Le train 58701

Le train 58701 est un train de Fret-SNCF qui circule entre les gares de triage de Sibelin (Lyon) et de Woippy (Metz).

Il appartient à la catégorie MA 100 telle que définie dans la réglementation en vigueur sur le RFN.

Le jour de l'accident, il était tracté par la locomotive BB 26095 et était composé de 30 wagons de types divers. Sa longueur était de 700 m et sa masse de 1 057 t.

Son bulletin de composition fait état de la présence de matières dangereuses dans les wagons situés en 6^e, 26^e, 27^e, 28^e et 29^e position.

Ce train a subi une opération de reconnaissance à l'aptitude au transport (RAT) à Sibelin de 0h34 à 1h52 ainsi qu'un essai de frein complet.

Il est parti de Sibelin à 4h36.

Une relève de conducteur a eu lieu à Dijon-Perrigny. Le train en est reparti à 7h47.

2.3 - Les wagons déraillés

Le premier wagon déraillé est un wagon citerne à bogies destiné au transport de produits chimiques. Il porte le n° 33 87 792 9543-9.

Le deuxième wagon déraillé est du même type que le précédent. Il porte le n° 33 87 793 2495-7.

Ces deux wagons sont chargés de phénol liquide en provenance de Salaise (38) à destination de Pratteln en Suisse.

Le troisième wagon déraillé est un wagon citerne à essieux destiné au transport de produits chimiques, immatriculé 23 80 746 5420-9. Il est chargé d'anhydride acétique en provenance de Salaise à destination de Ludwigshafen en Allemagne.

Le quatrième est un wagon plat à bogies immatriculé 33 68 398 8895-3. Il est chargé de bennes de minerai de plomb. Cette marchandise n'est pas une matière dangereuse.

3 - Compte rendu des investigations effectuées

3.1 - Résumé des déclarations et des témoignages

Les résumés présentés ci-dessous sont établis par les enquêteurs techniques sur la base des déclarations et des témoignages dont ils ont eu connaissance, en retenant les éléments qui paraissent utiles à la compréhension des événements. Il peut donc y avoir des divergences entre les différents témoignages, ou avec des constats présentés par ailleurs, ou avec la description des faits retenue par les enquêteurs telle qu'elle apparaît au chapitre 4.

3.1.1 - Déclarations du conducteur du train déraillé

Assurant la traction du train depuis Dijon-Perrigny, le conducteur ne constate rien d'anormal. A l'approche de Neufchâteau, après avoir acquitté le tableau indicateur de vitesse, signal annonçant une limitation à 80 km/h, il constate une résistance à l'avancement du train puis une fuite à la conduite générale de frein (CG).

Ne pouvant voir le train en entier depuis sa cabine et présumant un déraillement, il déclenche les signaux d'alerte radio et lumineux et demande la protection de la voie 2 auprès du Poste 1 de Neufchâteau.

Lors de la visite du train, il constate une rupture d'attelage entre le 20^e et le 21^e véhicule et le déraillement des quatre véhicules de queue avec engagement de la voie 2 et présence de matières dangereuses dans trois d'entre eux.

Ayant constaté une fuite sur un wagon, il appelle le régulateur pour demander l'intervention des pompiers et des gendarmes et il lui communique les codes danger et matière indiqués sur le wagon en cause.

Il pose des pétards à 220 m de la queue du train pour en assurer la protection.

A l'arrivée des pompiers, il leur indique les codes danger et matière et les informe que la caténaire est toujours sous tension.

Il serre les freins à main des wagons non-déraillés et fait le nécessaire pour pouvoir remorquer la première partie du train.

3.1.2 - Déclarations du régulateur du COGC de Metz-Nancy

À 10h45, le régulateur perçoit l'alerte radio émise par le conducteur du train 58701.

A 10h47, ce conducteur l'avise, par la radio, que son train a peut-être déraillé et qu'il part à sa visite.

A 11h10, le conducteur l'appelle avec son téléphone portable et lui signale qu'il voit au loin des wagons déraillés engageant la voie contiguë.

A 11h21, il reçoit un deuxième appel téléphonique du conducteur précisant qu'il y a quatre wagons couchés dont trois citernes transportant des matières dangereuses.

3.1.3 - Déclarations de l'agent circulation de matinée de Neufchâteau

A 10h46, l'agent circulation (AC) est appelé par le régulateur qui lui demande l'arrêt des trains sur la voie 2 suite à l'immobilisation du train 58701 au km 67,300 pour fuite à la conduite générale de frein (CG).

A 10h47, il réalise cette protection par fermeture des signaux en direction de Merrey et en informe le régulateur.

A 11h10, le régulateur l'informe que le train 58701 est déraillé avec les 4 wagons de queue sur la voie 2.

L'AC précise que le régulateur n'a pas jugé utile de demander la coupure d'urgence de la tension caténaire étant donné qu'il n'y avait pas de disjonction et qu'il n'y avait aucun train engagé entre Merrey et Neufchâteau, autre que le train déraillé.

3.1.4 - Déclarations de l'agent circulation de soirée de Neufchâteau

A 12h14, l'AC est appelé par l'agent d'astreinte Voie, arrivé sur les lieux du déraillement, qui lui demande la coupure d'urgence de la tension caténaire sur les voies 1 et 2.

A 12h15, il transmet cette demande au régulateur sous-stations.

A 13h57, pour permettre l'intervention des pompiers, il confirme au coordonnateur régional du COGC avoir pris les mesures pour arrêter et retenir les trains entre Neufchâteau et Merrey.

3.1.5 - Déclarations de l'agent circulation de Merrey

Lors du passage du train 58701 à 10h21 en gare de Merrey, l'agent circulation, assistant au défilé du train, ne constate rien d'anormal.

Il perçoit le bruit d'un méplat sur un essieu situé vers le milieu de la rame. Ce bruit n'est pas anormalement fort au point qu'il apparaisse nécessaire de prendre des mesures pour arrêter le train.

3.1.6 - Déclarations du chef de service de Chalindrey

Le chef de service de Chalindrey assure la surveillance des trains en marche (STEM) par caméra sur le train 58701. Il ne constate aucune anomalie.

3.2 - Exploitation des enregistrements radio sol-train

La communication passée à 10h47 entre le conducteur et le régulateur a été enregistrée. Elle révèle un manque de rigueur et de précision dans les échanges :

- le régulateur ne se présente pas au début de la communication de sorte que le conducteur croit être en contact avec l'AC de Neufchâteau ;
- le conducteur évoque clairement la présomption de déraillement mais les autres informations qu'il donne (localisation, indices...) manquent de précision ;
- les débuts des interventions du conducteur sont inaudibles.

Les communications suivantes sont passées à partir du téléphone portable du conducteur ; elles ne sont donc pas enregistrées.

3.3 - Examen des enregistrements graphiques

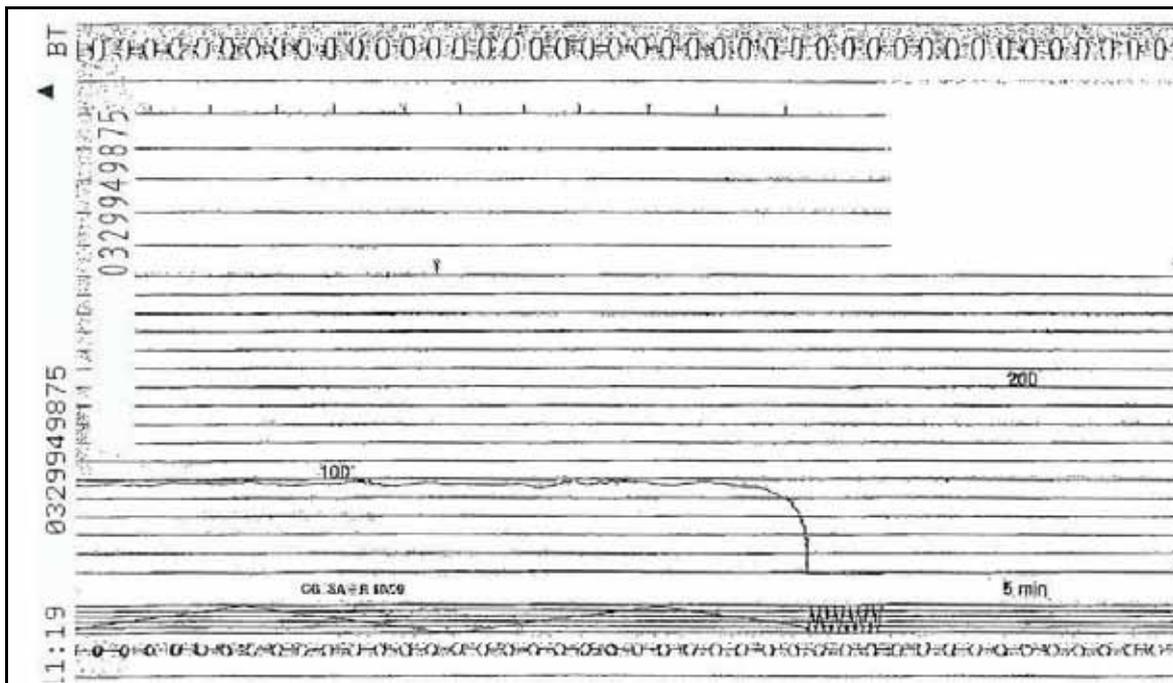


Figure 5 : Extrait de la bande graphique du train 58701

L'extrait ci-dessus montre que la vitesse maximale de 100 km/h, correspondant à la catégorie du train, est respectée. L'aspect légèrement fluctuant de la vitesse témoigne du fait que le conducteur n'utilise pas le système de vitesse imposée (VI), ce qui est conforme aux préconisations concernant les trains de marchandises.

Le ralentissement à 80 km/h est bien anticipé.

Le déraillement se produit alors que la vitesse est stabilisée à 80 km/h.

3.4 - Constats portant sur la voie

Le rail gauche de la voie 1 présente des traces d'impacts en amont du déraillement du PK 64,590 au PK 67,118.

Ces traces sont espacées de 3 m environ, distance correspondant à la circonférence des roues de wagon.



Figure 6 : Impacts sur le rail gauche voie 1

Les traces du déraillement sont visibles au PK 67,118. Ensuite, la voie est détériorée sur environ 600 m.

3.5 - Constats portant sur le premier wagon déraillé

La roue avant gauche du premier wagon déraillé est cassée. Un tiers environ de la jante est manquant et la roue présente des fissures circulaires dans une zone située à 300 mm environ de son axe.

Le morceau manquant est retrouvé au PK 60,950, environ 7 km en amont du lieu de l'accident.

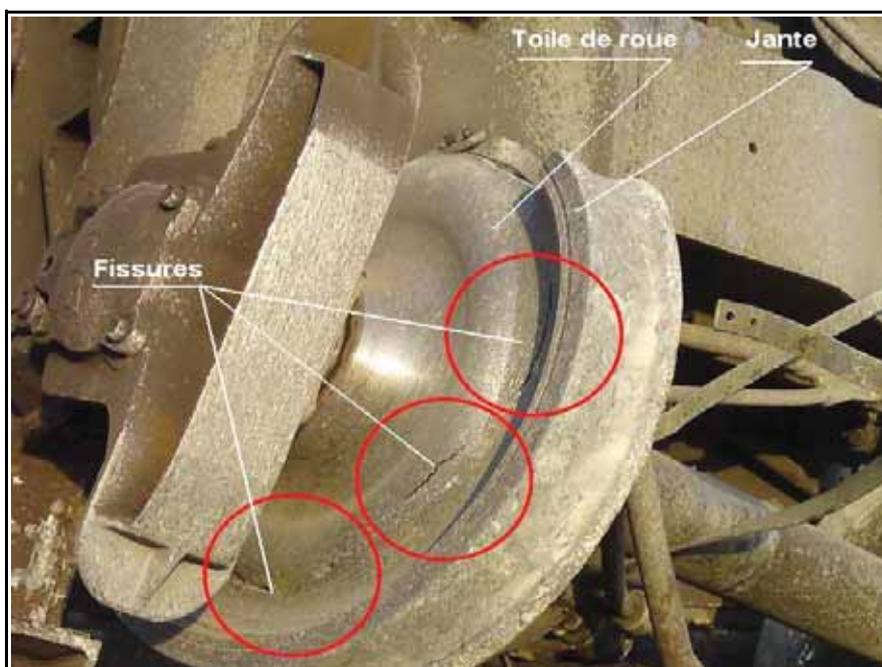


Figure 7 : Vue de l'essieu endommagé sur le premier wagon déraillé et couché

3.6 - Origine du déraillement

Le respect de la vitesse maximale autorisée et les constatations immédiates faites sur le premier wagon déraillé et sur la voie permettent de conclure que le déraillement est dû à une cause unique qui est la rupture de la roue avant gauche du wagon n° 33 87 792 9543-9.

La suite des investigations visera à comprendre les causes de cette rupture.

3.7 - Caractéristiques du premier wagon déraillé

3.7.1 - Caractéristiques techniques

Ce wagon qui porte le n° 33 87 792 9543-9 est un wagon citerne à bogies d'une capacité de 70 m³ destiné au transport de produits chimiques.

Sa longueur hors tout est de 14,920 m, sa tare de 24,6 t et sa masse totale autorisée de 90 t.

Sa vitesse maximale autorisée est de 100 km/h en charge et de 120 km/h à vide.

Il est monté sur des bogies Y25 LS équipés d'essieux de type 9054.

Le diagramme de ce wagon est donné en annexe 4. Les caractéristiques dimensionnelles et techniques de ce wagon n'ont rien d'exceptionnel.

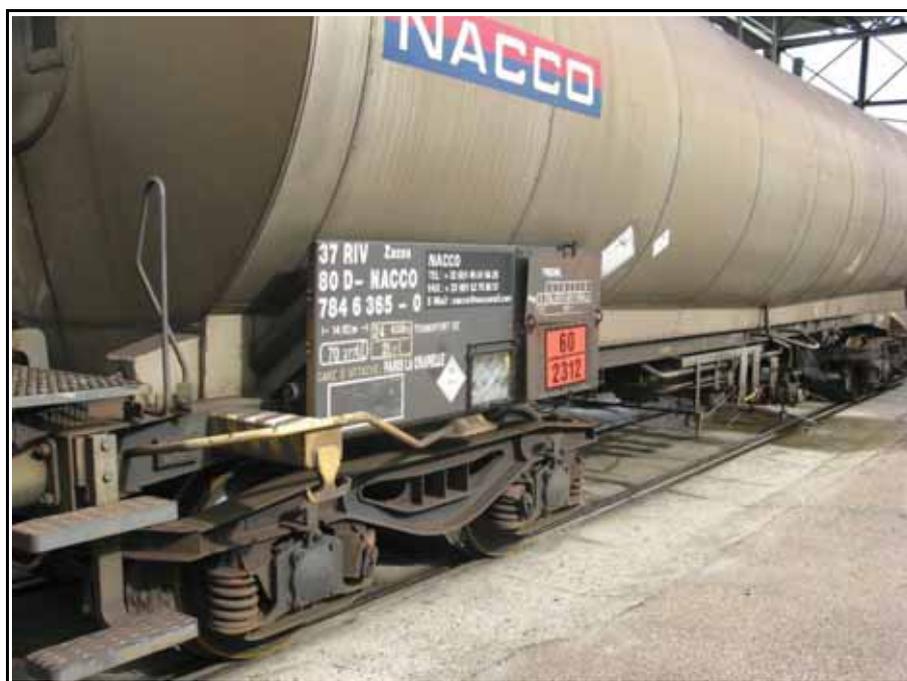


Figure 8 : Wagon identique à celui qui a déraillé

3.7.2 - Construction

Ce wagon appartenant à la Société NACCO, fait partie d'une série de 50 wagons identiques construits en 1995 par Arbel-Fauvet-Rail (AFR) pour Rhône-Poulenc.

Cette série de 50 wagons est elle-même incluse dans un marché de 150 wagons citernes de 3 types commandés par Rhône-Poulenc à AFR cette même année.

Les essieux de ces 150 wagons sont du type 9054 homologué par la SNCF et par l'Union Internationale des Chemins de fer (UIC). Il s'agit d'un type d'essieu très répandu, équipant de nombreux wagons à bogies. Ils ont été fabriqués en 1995 par la Société Valdunes suivant notamment la norme NF F 01-133².

Les sociétés AFR et Valdunes sont des constructeurs reconnus dans le monde ferroviaire. Leurs systèmes de management de la qualité sont certifiés et leurs fabrications sont agréées, de longue date, par les principales entreprises ferroviaires françaises et européennes.

3.7.3 - Maintenance

Depuis 2005, le détenteur du wagon déraillé est la société NACCO. Elle assume, depuis 2007, le rôle d'entité en charge de la maintenance (ECM). Antérieurement, la maintenance de ce wagon était pilotée par la SNCF.

Au titre de cette maintenance « SNCF », ce wagon était soumis à une révision dite REV-S tous les quatre ans et à une révision générale REV-B tous les 12 ans. L'espacement des REV-B de sa série a été porté à 16 ans en 2006 pour tenir compte du bon état et du relativement faible parcours de ces wagons.

Les essieux étaient soumis au pas d'entretien³ normal (PEN), leur parcours moyen étant inférieur à 40 000 km/an. A ce titre, leur dépose pour révision en atelier spécialisé est soumise à un pas maximal de 19 ans ou de 600 000 km.

Les dernières opérations de maintenance effectuées sur le wagon sont les suivantes, en commençant par les plus récentes :

- le 18 mai 2010, visite technique d'échange (VTE) à Woippy ;
- le 12 mai 2010, réparation de marchepied à Woippy ;
- le 5 décembre 2006, réparation de la poignée de commande du frein à Mulhouse ;
- le 18 septembre 2006, révision B du wagon à l'atelier Lormafer, incluant la mesure de la déformation totale (DT) des tables de roulement des essieux.

Il convient de noter que, sur les parcours internationaux, les wagons subissent au moins une VTE à chaque voyage. Ainsi, des visites techniques fréquentes ont été effectuées sur ce wagon, dans des réseaux différents, sans qu'aucun défaut ne soit détecté sur les roues.

Par ailleurs, ce wagon était toujours sur ses essieux d'origine, ceux-ci n'ayant jamais été endommagés et n'ayant pas atteint les limites de révision.

² Norme française : spécifications des roues monoblocs pour matériels ferroviaires.

³ Le pas d'entretien est l'intervalle de temps ou de parcours maximal entre révisions.

3.7.4 - Parcours et travail

D'après les bases de données de la SNCF, le wagon déraillé avait parcouru avant l'accident 307 000 km environ soit 20 000 km/an. Il s'agit d'une utilisation relativement modeste par rapport à la moyenne des parcours des wagons appartenant à des détenteurs privés.

La proportion entre parcours en charge et à vide est 55/45, sachant que, dans le cas des wagons citernes, la circulation en charge est généralement réalisée à la charge maximale.

Les itinéraires empruntés sont toujours les mêmes, ce wagon circulant entre le site de production du phénol à Salaise (38) et un certain nombre de sites destinataires dont les deux principaux étaient Le Havre (76) et Pratteln près de Bâle en Suisse.

3.8 - Examen de la roue brisée de Neufchâteau

L'essieu n° 543205 avec sa roue brisée a été examiné le 3 juin 2010 à l'Agence d'Essai Ferroviaire (AEF) à Vitry-sur-Seine.

La roue brisée porte le numéro de coulée B8924 ; l'autre roue, qui n'est pas fissurée, appartient à la coulée B8581.

Sur le morceau détaché, la peinture n'est pas altérée et on n'observe aucune trace de choc pouvant être à l'origine de la fissure.

La partie de roue restée sur l'essieu est oxydée, la peinture ayant été décapée par les projections lors du déraillement. L'examen visuel montre que la fissure s'était propagée sur la quasi-totalité de la toile de roue.



Figure 9 : Vues de l'essieu et du morceau de la roue détaché

L'examen du faciès de rupture révèle la présence, sur la face externe de la toile, de deux principaux départs de défauts qui ont évolué en fatigue.

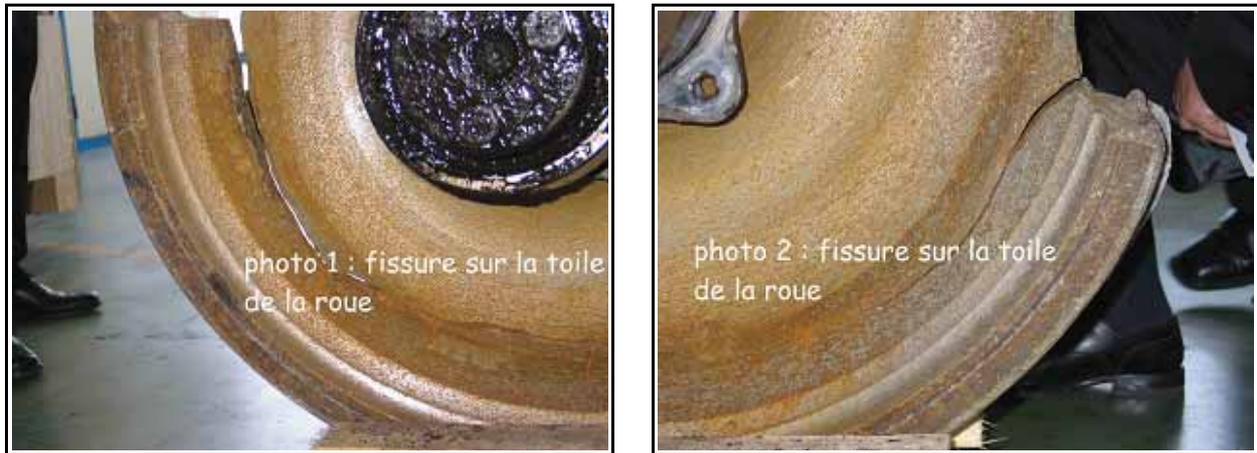


Figure 10 : Vues de la partie de la roue restée solidaire de l'essieu

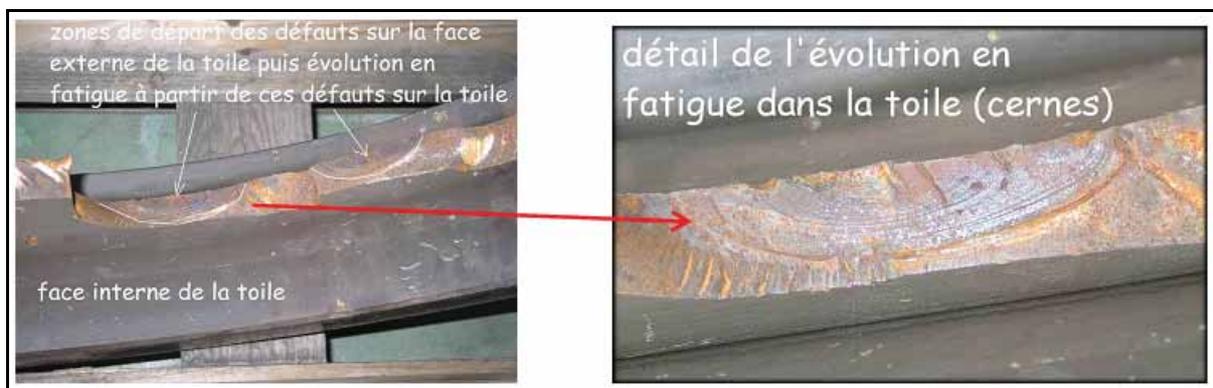


Figure 11 : Vues du faciès de rupture

3.9 - Retour d'expérience sur des événements similaires

Les fissures circulaires dans les toiles de roues sont mentionnées dès 1970 dans les documents techniques. Elles font partie des défauts qui doivent être recherchés par les agents lors des visites et des opérations de maintenance. Elles figurent, à ce titre, dans la norme européenne de maintenance des essieux EN 15313 publiée en avril 2010.

Toutefois, les ruptures de roues sont extrêmement rares. Depuis 1990, trois cas seulement ont été constatés sur le réseau ferré national :

- en 2000, sur un wagon étranger à Sibelin ;
- en 2001, sur une rame du RER B au Bourget ;
- en 2005, sur un wagon étranger à Gardanne.

Les fissures de roues sans rupture sont également très rares ; le seul cas enregistré par la SNCF concerne une roue de wagon en 2002.

4 - Déroulement de l'accident et des secours

4.1 - Circulation du train 58701

Le 22 mai 2010, le train 58701 de Fret-SNCF assurant la relation Sibelin – Woippy, est composé de 30 wagons de types divers et remorqué par la locomotive BB 26095.

Le wagon citerne n° 33 87 792 9543-9 est placé en 27^e position.

Le train part de Sibelin à 4h36 après avoir subi une reconnaissance à l'aptitude au transport (RAT) de 0h34 à 1h52 et un essai de frein complet.

Ces opérations ne donnent pas lieu à signalement d'anomalies.

Une relève de conducteur a lieu à Dijon-Perrigny d'où le train repart à 7h47.

A 9h53, le train passe à Chalindrey qui est le dernier poste de surveillance des trains en marche (STEM) avant le lieu de l'accident, situé 71 km plus loin. A ce poste, la surveillance se fait du côté droit du train par vidéo. L'agent chargé de cette surveillance ne perçoit rien d'anormal au passage du train.

A 10h21, le train passe à Merrey qui est le dernier poste d'aiguillage avant le lieu de l'accident, à 37 km de celui-ci. L'agent circulation (AC) observe le train au défilé. Il entend un bruit qu'il interprète comme un méplat sur un essieu situé vers le milieu de la rame. Ce bruit n'étant pas anormalement fort, il ne juge pas utile de faire arrêter le train.

Au PK 60,950, environ 7 km en amont du lieu de l'accident, un morceau comprenant un tiers de sa table de roulement se détache de la roue avant gauche du 27^e wagon.

L'essieu concerné continue à tourner en marquant fortement, à chaque tour, le rail de la file gauche.

Circulant à une vitesse comprise entre 95 et 100 km/h, qui est la vitesse maximale autorisée pour son train, le conducteur commence à ralentir à l'approche du tableau indicateur de vitesse (TIV) situé au PK 67,380 peu avant Neufchâteau.

Au passage du TIV, il ressent des réactions anormales suivies d'une fuite de la conduite générale de frein (CG). Il est 10h45.

4.2 - Déraillement

Le premier essieu du 27^e wagon, dont la roue gauche est démunie de table de roulement sur un tiers de sa circonférence, déraille dans la courbe à gauche, au PK 67,118.

Ce wagon se couche sur son flanc droit, brisant son attelage avec le wagon précédent et entraînant les wagons suivants qui dérailent également. Sous l'effet des réactions longitudinales, l'attelage entre le 20^e et le 21^e wagon se brise également.

A la fin, les trois wagons situés en 27^e, 28^e et 29^e position sont couchés sur leur flanc droit sur la voie 2. Le 30^e wagon est déraillé mais n'est pas couché.

Le premier wagon déraillé est un wagon citerne à bogies destiné au transport de produits chimiques. Il est immatriculé 33 87 792 9543-9.

Le deuxième wagon déraillé est du même type que le précédent ; il est immatriculé 33 87 793 2495-7.

Ces deux wagons sont chargés de phénol liquide en provenance de Salaise (38) à destination de Pratteln en Suisse.

Le troisième wagon déraillé est un wagon citerne à essieux destiné au transport de produits chimiques, immatriculé 23 80 746 5420-9. Il est chargé d'anhydride acétique en provenance de Salaise à destination de Ludwigshafen en Allemagne.

Le quatrième wagon déraillé est un wagon plat à bogies immatriculé 33 68 398 8895-3. Il est chargé de bennes de minerai de plomb. Cette marchandise n'est pas une matière dangereuse.

Le premier wagon déraillé présente une fuite de phénol au niveau du dôme.

4.3 - Alerte et protection contre les risques ferroviaires

Ressentant des réactions anormales de son train suivies d'une fuite à la conduite générale de frein, le conducteur observe son convoi par la fenêtre de sa cabine. Ne pouvant pas voir le train en entier, il présume un déraillement et actionne les signaux d'alerte radio et lumineux. Après extinction de l'alerte radio, il demande, par la radio sol-train, la protection de la voie 2.

Le conducteur croit s'adresser au poste de Neufchâteau mais c'est le régulateur de Metz-Nancy qui lui répond sans s'annoncer et qui transmet la demande à l'AC de Neufchâteau.

A 10h47, ayant reçu confirmation de la réalisation de la protection demandée, le conducteur part à la visite de son train.

A 11h10, le conducteur appelle le régulateur par téléphone portable pour lui signaler qu'il voit au loin des wagons déraillés engageant la voie contiguë.

A 11h21, le conducteur signale au régulateur que des wagons sont couchés, dont trois citernes contenant des matières dangereuses.

Ayant constaté une fuite sur l'un des wagons déraillés, il appelle le régulateur pour qu'il demande l'intervention des secours et lui indique les codes danger et matière (60 – 2312) inscrits sur le wagon en cause.

Il pose ensuite des pétards à 220 m de la queue du train pour arrêter un éventuel train suiveur.

A 12h14, la coupure d'urgence de la tension caténaire est demandée par l'agent d'astreinte Voie arrivé sur les lieux. Elle est transmise par l'agent circulation de Neufchâteau au régulateur sous-stations et réalisée à 12h15.

4.4 - Intervention des services de secours

Les pompiers et les gendarmes sont alertés par le COGC de Metz-Nancy à 11h33⁴.

Les premières équipes sont sur place à 11h50. Constatant une légère fuite de phénol, elles mettent en place un périmètre de sécurité sur un rayon de 200 m.

L'intervention des secours dure 6 jours jusqu'au jeudi 27 mai à 20h23.

⁴ Les heures sont données en référence à la chronologie SNCF, avec un décalage de 2 mn environ avec celles des services de secours.

Au cours de cette intervention, il a été procédé :

- au confinement de la pollution ;
- à la sécurisation du site (périmètre de sécurité, mise en œuvre des équipements de protection individuelle pour les personnels en contact avec les produits) ;
- à la couverture sanitaire du site (médecin, infirmier) ;
- à la récupération des produits par des spécialistes de l'industrie chimique en liaison avec les experts des sociétés NOVAPEX et BASF respectivement expéditrice et destinataire des produits ;
- au relevage des wagons et à l'évacuation sur véhicule de ceux inaptes à la circulation ;
- à la dépollution du site ;
- à la remise en état de l'infrastructure ferroviaire.

Pour les tâches de leur ressort, les services de secours ont mobilisé des moyens importants, notamment la cellule risque chimique et le poste de commandement de site.

L'ensemble des opérations s'est déroulé en sécurité malgré des difficultés pour réaliser le dépotage des wagons de phénol.

Au final, cet accident n'a pas eu de conséquence humaine et la pollution a été limitée à une zone très réduite du ballast.

5 - Mesures conservatoires portant sur le matériel roulant

5.1 - Mesures décidées par l'EPSF en mai et juin 2010

Le **27 mai 2010**, compte-tenu de la gravité de l'avarie constatée sur la roue de Neufchâteau et de la possibilité que des défauts précurseurs soient présents sur d'autres roues du même lot de fabrication, l'EPSF donne l'instruction suivante à l'ensemble des détenteurs de wagons répertoriés en France :

- *arrêt des wagons pour contrôle des essieux ayant des roues des coulées Valdunes B8924 et B8581, qui sont les coulées des roues de l'essieu à l'origine du déraillement.*

Ces instructions concernent 188 essieux appartenant à divers détenteurs.

Indépendamment de ces instructions, des fissures circulaires des toiles de roues sont détectées le 4 juin 2010 à Mannheim, par des visiteurs de la DB, sur deux roues d'un essieu d'un wagon NACCO de transport de phénol, du même type que celui de Neufchâteau et du même lot de 150 wagons fabriqués par AFR en 1995 pour Rhône-Poulenc.

Cette détection conduit l'EPSF à réorienter ses mesures conservatoires en visant la totalité des 150 wagons précités, ces wagons ayant des caractéristiques voisines et étant équipés d'essieux identiques.

Le **6 juin 2010**, l'EPSF donne aux sociétés Atirrail, Ermewa, VTG et NACCO, détenteurs de ces 150 wagons, et aux entreprises ferroviaires, l'instruction suivante :

- *arrêt des 150 wagons fabriqués par AFR en 1995 pour Rhône-Poulenc pour examen des roues.*

L'EPSF demande également aux entreprises ferroviaires de porter une attention particulière à l'examen visuel des roues de tous les wagons lors des opérations de reconnaissance de l'aptitude au transport⁵ (RAT).

Le 7 juin 2010, dans le cadre de ces mesures, le personnel NACCO détecte une fissure de roue sur un wagon au Havre et une autre sur un wagon à Thionville. Ces deux wagons de transport de phénol appartenant à NACCO font partie du lot de 150 wagons précité.

Le **10 juin 2010**, l'EPSF donne donc l'instruction suivante aux détenteurs Atirrail, Ermewa, VTG, NACCO et aux entreprises ferroviaires :

- *arrêt des 150 wagons ;*
- *examen visuel de leurs essieux avant acheminement vers un atelier de levage ;*
- *dépose de tous leurs essieux puis examen magnétoscopique des toiles de roues.*

Le **18 juin 2010**, l'EPSF étend les dispositions du 10 juin aux wagons dont un essieu a pu être monté antérieurement sous l'un des 150 wagons.

Au final, la campagne d'examen visuel et magnétoscopique couvre les 600 essieux actuellement placés sous les 150 wagons en cause ainsi que ceux qui y ont été montés à un moment ou à un autre.

Au total, ce sont 625 essieux qui sont concernés. Ils sont de fabrication Valdunes et portent les numéros 541925 à 542124, 543017 à 543426, 553253 à 553867.

⁵ Cette opération est effectuée lors de l'acceptation des wagons et en cours d'acheminement, après les opérations de tri à la gravité.

5.2 - Mesures décidées par l'EPSF en janvier 2011

Le 13 janvier 2011, en application de la recommandation R1⁶ du rapport d'étape du BEA-TT, l'EPSF étend ses mesures conservatoires à tous les wagons ayant un essieu équipé d'une roue Valdunes provenant des coulées A0674, A0925, A0927, B7416, B8313, B8337, B8361, B8600, B8922 et B8924.

Ces coulées sont celles dont une roue a été trouvée fissurée lors des vérifications prescrites par les mesures conservatoires prises en mai et juin 2010.

Cette deuxième campagne de vérifications conduit à contrôler 500 essieux supplémentaires montés sur des wagons de types divers, a priori sans rapport avec les 150 wagons visés par la première campagne.

5.3 - Fissures détectées au titre des mesures conservatoires

La première campagne de vérifications portant sur les 625 essieux évoqués plus haut est maintenant close ; elle a permis de détecter 29 roues fissurées.

La deuxième campagne n'a permis, à la date de rédaction de ce rapport, de localiser et de vérifier qu'environ 100 essieux sur les 500 concernés. Aucune fissure confirmée n'a été signalée. On peut donc penser que les éventuels cas qui pourraient être détectés après la parution de ce rapport seront en très petit nombre et sans conséquence sur les conclusions et les recommandations.

Ceci étant, la faible proportion des essieux vérifiés à ce jour conduit à s'interroger sur la connaissance, par les détenteurs et les ECM de wagons, de la situation de leurs essieux et plus généralement de la maîtrise de leur parc.

A la date de rédaction de ce rapport, les résultats des campagnes de vérifications sont les suivants :

Campagne	Détenteur	Type de wagon	Wagons	Fissures confirmées
1 ^{re}	NACCO	70 m ³ Phénol	30	18 r/17 ess
		104 m ³ Ammoniac	20	0
	VTG	50 m ³ Soude	50	11r/11 ess
	Ermewa	104 m ³ Ammoniac	10	0
	Atirrail	70 m ³ Phénol ⁷	20	0
		104 m ³ Ammoniac	20	0
2 ^e	Divers	Divers	NC ~ 500 essieux	0

On observe que les fissures n'affectent que les roues des wagons de phénol et de soude. L'analyse statistique présentée en annexe 6 montre que la différence entre les taux de fissuration de ces wagons et celui des wagons d'ammoniac est statistiquement significative.

6 Voir annexe 3.

7 Wagons utilisés maintenant au transport de l'acide acétique.

5.4 - Autres détections depuis juin 2010

Les alertes, lancées par l'EPSF et relayées par les entreprises ferroviaires et les détenteurs, ont permis, en dehors des périmètres des campagnes susvisées, de détecter des essieux avec des roues présentant des spectres de magnétoscopie laissant craindre la présence de fissures. Il s'agit notamment de :

- 1 essieu de type 9054 appartenant à NACCO, produit en juin 1989, avec une roue présentant deux spectres de 20 et 40 mm situés à 280 mm de l'axe ;
- 5 essieux de type 9054 appartenant à GATX, produits en 1990, avec des roues présentant divers spectres.

Les examens approfondis effectués par les experts de la SNCF ou de la DB ont conclu que ces spectres étaient dus à des défauts de forgeage sans fissuration.

5.5 - Autres cas plus anciens signalés par des détenteurs

Après les alertes lancées par l'EPSF, certains cas de fissurations similaires ont été remis en lumière par les détenteurs. Ils concernent :

- 4 essieux de type 9071 B avec 7 roues⁸ fissurées fabriquées en 1999, détectés le 8 février 2007 en Allemagne sous un wagon de lessive de soude NACCO. A l'époque, les essieux concernés ont été envoyés par le détenteur au fabricant Valdunes, pour expertise. Le cas n'a pas été signalé à la SNCF qui assurait l'ingénierie de maintenance ;
- 1 essieu de type 9052 avec ses deux roues fissurées produites en 1976, détecté en septembre 2009 en Roumanie sous un wagon de pulvérulents appartenant à EVS et expertisé à l'atelier SNCF de Tergnier le 26 août 2010.

5.6 - Similitude des fissurations détectées après Neufchâteau

Les roues fissurées détectées à Mannheim, Thionville et au Havre dans les jours qui ont suivi le déraillement de Neufchâteau présentent des similitudes évidentes avec la roue brisée de Neufchâteau.

Il en va de même de celles qui ont été détectées dans le cadre des campagnes de vérifications lancées par l'EPSF.

Les similitudes sont les suivantes :

- fissures de fatigue circulaires dans la toile près du raccordement jante-toile ;
- amorçages multiples sur la face externe de la toile ;
- roues de type ORE à toile brute (sauf un cas de roue à toile usinée) sur essieux 9054 ;
- roues de fabrication Valdunes⁹ ;
- wagons citernes de fabrication AFR, transportant du phénol ou de la lessive de soude ;
- détenteurs NACCO et VTG.

Au vu de ces similitudes, il est clair que la rupture de roue survenue à Neufchâteau n'est qu'une manifestation parmi d'autres d'un problème plus large et que la cause de cette rupture ne peut être trouvée qu'en abordant ce problème dans son ensemble.

La suite de l'enquête du BEA-TT est donc orientée dans ce sens.

⁸ Ces roues sont des roues VMS « basses contraintes », donc d'un type différent de celui des autres roues évoquées dans le présent rapport.

⁹ Valdunes est le seul fabricant de roues à toile brute en Europe.

6 - Recherche des causes des fissurations observées

6.1 - Les roues des wagons

6.1.1 - Généralités

En matière de sécurité, les essieux sont parmi les organes les plus critiques du matériel roulant et notamment des wagons. A ce titre, les roues ont, de tout temps, fait l'objet d'une attention particulière des techniciens du monde ferroviaire, tant pour leur conception et leur fabrication que pour leur maintenance.

Les roues des wagons destinés à circuler dans l'ensemble des réseaux ont, dès le XIX^e siècle, fait l'objet de règles internationales dans le cadre de l'Unité Technique (Convention de Berne de 1882) puis de l'Union Internationale des Chemins de fer (UIC) et du régime international des wagons (RIV) et, plus récemment, dans le cadre des spécifications techniques d'interopérabilité (STI) s'appuyant sur des normes européennes.

Compte tenu des enjeux, les évolutions techniques concernant les roues des wagons sont lentes et prudentes. L'évolution la plus notable a été le passage des roues à bandages rapportés aux roues monoblocs à partir des années 1950.

6.1.2 - La conception des roues

Les roues ont d'abord été soumises à des règles de conception empiriques et à des règles d'homologation basées sur des essais au banc et en ligne.

Avec le développement des moyens de calcul, la conception des roues et la validation de cette conception ont fait l'objet de nouvelles règles définies notamment dans la fiche UIC 510-5¹⁰ et dans la norme EN 13979-1¹¹.

Ces règles prescrivent la vérification de la conception par le calcul en :

- évaluant, par la méthode des éléments finis, le niveau des contraintes générées en tout point de la roue par un chargement conventionnel ;
- comparant ces contraintes calculées avec les contraintes admissibles du matériau utilisé.

Le chargement conventionnel et les contraintes admissibles sont définis dans les documents normatifs précités.

6.1.3 - Les roues ORE

L'Office de Recherche et d'Essais (ORE) de l'UIC a défini, dans les années 1970, les spécifications de la roue monobloc standard pour wagons de chemin de fer. Ces spécifications ont été déclinées dans les différents pays et ces roues ont été produites à des millions d'exemplaires par tous les fabricants de roues européens. C'est ce type de roue qui équipe l'essieu de type 9054.

10 Fiche UIC comprenant des parties obligatoires : Homologation technique des roues monoblocs.

11 Norme européenne : Procédure d'homologation technique, roues forgées et laminées.

Le retour d'expérience, dont dispose l'ensemble du secteur ferroviaire concerné, ne montre pas d'apparition récurrente de fissurations circulaires des toiles de roues, telles qu'observées dans les cas présents. Le point faible connu des roues ORE se situe au niveau de leur relative sensibilité aux échauffements, dus au freinage par semelles, pouvant causer des déformations axiales de la toile de roue appelées « déjettements ». Ce point faible a donné lieu, dans les années 1990, à la mise au point d'une nouvelle génération de roues de wagon, dites roues à basses contraintes. Elles remplacent progressivement les roues ORE qui ne sont plus fabriquées depuis 2003.

6.1.4 - Les roues ORE fabriquées par Valdunes

Les spécifications des roues ORE permettent aussi bien la fabrication de roues à toile usinée que de roues à toile brute de laminage.

Approximativement jusqu'à l'année 2000, les roues Valdunes pour le matériel remorqué étaient principalement des roues à toile brute qui représentaient 70% de la production de cette entreprise.

A partir de 2000, la demande de roues à toile usinée, plus légères, a progressivement augmenté au détriment des roues à toile brute.

Depuis 2003, Valdunes ne produit plus, pour l'Europe, que des roues à toile usinée et ne fabrique plus de roues ORE, celles-ci étant remplacées par ses roues à basses contraintes, Valdunes-Montagne-Sécurité (VMS).

L'annexe 5 décrit le processus de fabrication des roues par Valdunes.

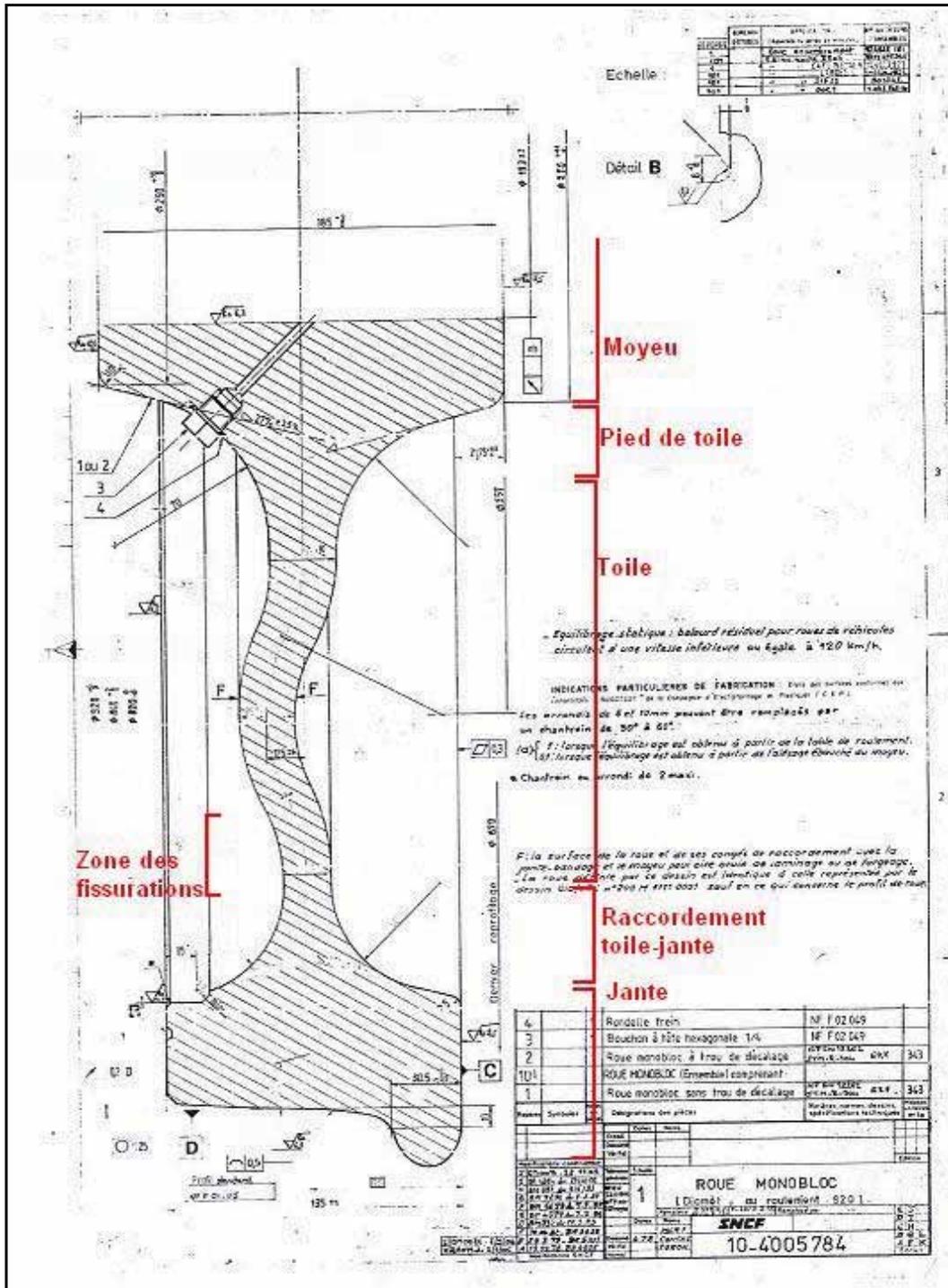


Figure 12 : Dessin de la roue ORE pour essieu de type 9054

6.2 - Les wagons concernés

Les 150 wagons concernés sont des wagons citernes construits par la société Arbel-Fauvet-Rail (AFR) à Douai entre 1995 et 1996 pour le détenteur Rhône-Poulenc-Industries.

Cet ensemble se répartit en trois séries différentes :

- 50 wagons de 50 m³, affectés au transport de lessive de soude ;
- 50 wagons de 70 m³, dont 30 sont affectés au transport de phénol et 20 au transport d'acide acétique ;
- 50 wagons de 104 m³, affectés au transport d'ammoniac.

La masse totale en charge, les organes de roulement et les équipements de freinage des trois séries sont identiques.

Leurs superstructures, leurs longueurs et les hauteurs de leur centre de gravité sont différentes.

Les dessins de ces wagons ont été vérifiés par la SNCF en sa qualité de réseau immatriculateur conformément aux procédures en vigueur à l'époque.

6.3 - Rappels sommaires de physique des matériaux

6.3.1 - La fatigue des matériaux

Des fissures de fatigue peuvent apparaître lorsque un matériau ou une structure est soumis à des contraintes variables pendant un certain nombre de cycles.

Il existe une relation statistique entre le nombre de cycles et l'amplitude maximale de la variation de contraintes que le matériau ou la structure peut supporter avant de commencer à se fissurer.

Cette relation est figurée par la courbe de Wöhler qui est propre à chaque matériau ou structure.

Toutefois, les phénomènes en cause sont complexes et présentent une dispersion qu'il ne faut pas sous-estimer. Ainsi, des cas de fissuration peuvent apparaître bien que le nombre de cycles ou le niveau de contraintes soit inférieur à la limite donnée par la courbe de Wöhler. Les organes de sécurité doivent donc être conçus avec une marge de sécurité suffisante pour tenir compte de cette dispersion.

Les courbes de Wöhler des matériaux ferreux, comme l'acier des roues de wagon, présentent une asymptote appelée « limite de fatigue ». Si l'amplitude de la variation de contraintes est inférieure à cette limite, l'acier ne fissure pas, quel que soit le nombre de cycles auxquels il est soumis.

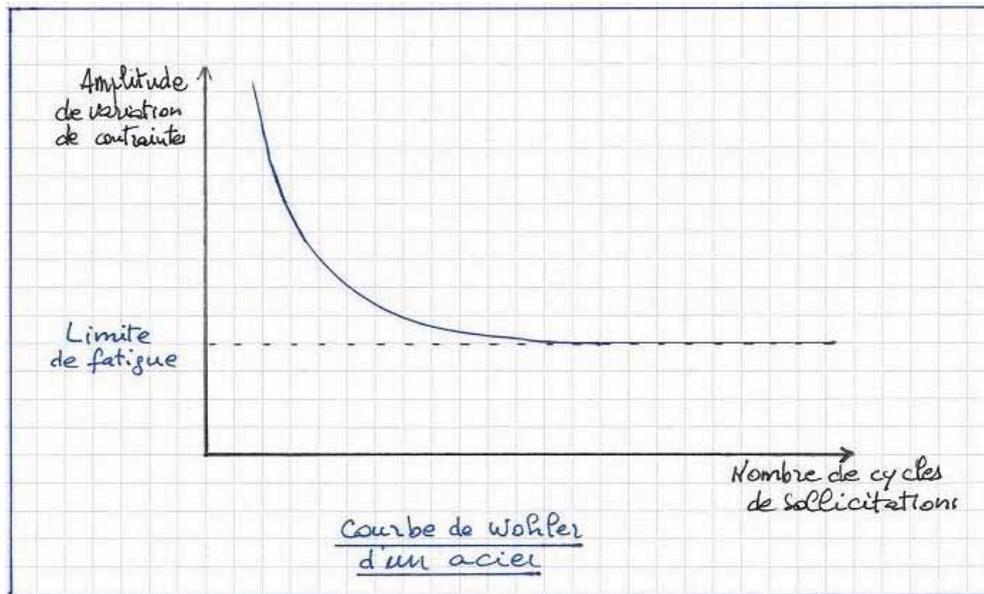


Figure 13 : Courbe de Wöhler

Les roues, comme tous les éléments de structure ou organes de sécurité du matériel ferroviaire, sont « dimensionnées en fatigue », donc étudiées de sorte que l'amplitude des contraintes variables auxquelles elles sont soumises soit inférieure en tout point à la limite de fatigue de l'acier utilisé, avec une marge de sécurité suffisante.

En résumé, l'apparition de fissures de fatigue, dans une zone donnée d'un ensemble de roues de même type, traduit, dans cette zone, un excès des contraintes variables générées par les sollicitations de service, par rapport à la limite de fatigue du matériau ou, pour le moins, une insuffisance de la marge de sécurité entre ces contraintes et la limite de fatigue.

6.3.2 - Le phénomène de concentration des contraintes

Les singularités géométriques (raccordements, arêtes, rainures...) et les défauts de surface (rayures, entailles, cratères, rugosité, corrosion...) d'une pièce modifient localement le champ de contraintes et peuvent induire, en certains points, un dépassement de la limite de fatigue conduisant à terme à l'apparition d'une fissure.

Pour une pièce donnée, on prend en compte ce phénomène en divisant la limite de fatigue théorique du matériau par un coefficient « K_f » qui tient compte des particularités géométriques et des défauts de surface de la pièce.

6.3.3 - La fissuration par fatigue d'une pièce réelle

Il résulte des éléments évoqués ci-dessus, qu'en première approche, les causes possibles de la fissuration par fatigue d'une pièce en acier sont les suivantes :

- des sollicitations réelles supérieures aux sollicitations théoriques prises en compte pour la conception de la pièce ;
- la forme de la pièce fabriquée non conforme au dessin ;

- des caractéristiques de surface de la pièce fabriquée induisant une diminution de la limite de fatigue, incompatible avec le niveau des contraintes variables subies par la pièce ;
- des caractéristiques du métal non conformes aux spécifications.

Ensuite, la détection des fissures, avant qu'elles atteignent une taille menaçant l'intégrité de la pièce, relève de la maintenance et sera examinée au chapitre 7.

6.4 - Examen des différentes causes de fissuration possibles

6.4.1 - Les sollicitations

➤ Les sollicitations conventionnelles

Les sollicitations prises en compte dans la conception des roues de wagon sont des sollicitations normalisées, appelées « chargement conventionnel », censées représenter de façon réaliste les sollicitations subies par les roues au cours de l'exploitation des wagons. Elles sont issues de l'expérience des compagnies ferroviaires historiques et définies dans la fiche UIC 510-5 et, maintenant, dans la norme EN 13979-1¹².

Le Centre d'Ingénierie du Matériel de la SNCF (CIM) a calculé et visualisé le champ de contraintes dans une roue ORE pour essieu 9054 soumise aux sollicitations correspondant au chargement conventionnel.

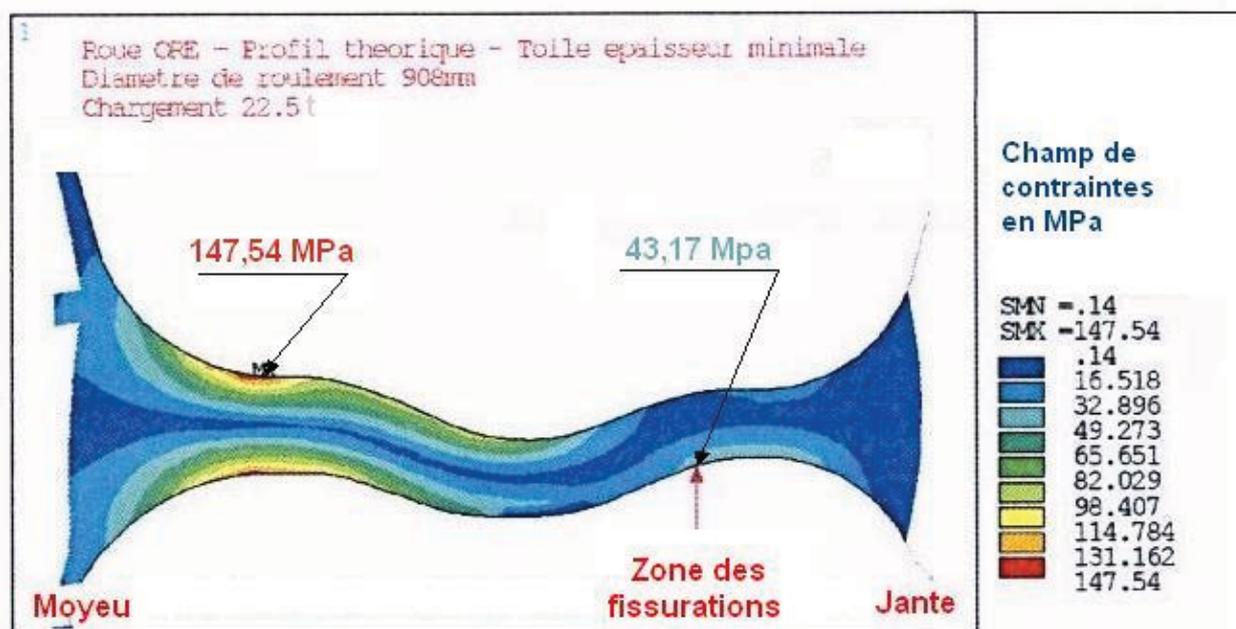


Figure 14 : Champ de contraintes dynamiques dans la roue ORE 9054

On observe que le maximum de contraintes se situe dans le pied de toile où il dépasse très légèrement la limite de fatigue habituellement admise pour les roues à toile brute qui est de 145 MPa. En revanche, la zone du raccordement toile-jante, où les fissurations ont été constatées à Neufchâteau et lors des campagnes de vérifications qui ont suivi, est très peu contrainte.

12 Norme européenne : homologation technique des roues monoblocs pour essieux ferroviaires.

Les sollicitations conventionnelles ne peuvent donc pas être à l'origine des fissurations observées.

➤ **Les sollicitations non-conventionnelles**

Le constat ci-dessus conduit à rechercher des circonstances ou des particularités, propres aux wagons en cause, susceptibles de créer des sollicitations non conventionnelles induisant des contraintes élevées dans la zone du raccordement toile-jante.

• ***Les sollicitations mécaniques spécifiques en ligne***

Outre les effets quasi-statiques du centre de gravité élevé des wagons citernes, il n'est pas impossible que les liquides transportés induisent, sur les wagons citernes de certains types, des efforts dynamiques particuliers engendrant des sollicitations spécifiques des roues qui ne sont pas prises en compte par les sollicitations conventionnelles.

De fait, les wagons citernes, comme les autres wagons classiques, ne font pas l'objet d'essais en ligne ni de simulations de leur comportement dynamique dans le cadre des procédures d'autorisation de mise en circulation. La réalité, pour chaque type de wagon, des efforts subis par les roues dans les différentes configurations de voie, de chargement et de vitesse n'est donc pas connue.

• ***Les sollicitations mécaniques sur les terminaux***

Les sites de Salaise-Roussillon et du Havre, respectivement producteur et principal utilisateur du phénol transporté dans les wagons NACCO incriminés, ont été visités. Le site de Salaise-Roussillon a également fait l'objet d'une seconde visite en tant que site destinataire de la lessive de soude transportée dans les wagons VTG dont certaines roues ont également été trouvées fissurées. Il n'a pas été relevé d'anomalie ou de caractéristique susceptible d'expliquer, a priori, les désordres observés sur les roues en cause.

• ***Les sollicitations mécaniques sur les triages***

Lors du passage dans les freins de voies des triages, les roues des wagons subissent des contraintes très différentes de celles auxquelles elles sont soumises en circulation.

Les citernes ferroviaires étant démunies de cloisonnements pare-flots, une étude commune de la société Valdunes et du Centre d'Ingénierie du Matériel de la SNCF, dont la note de présentation peut être consultée sur le site internet du BEA-TT, a montré que les mouvements longitudinaux et transversaux d'un liquide dans une citerne de 70 m³ induisent une augmentation très significative du niveau de contraintes par rapport à celles subies par les roues d'un wagon transportant un chargement solide. Ces contraintes sont maximales dans la zone de raccordement toile-jante et dépassent la limite prescrite par les normes précitées qui est de 145 MPa.

La figure ci-dessous visualise le champ de ces contraintes dans une roue ORE pour essieu 9054.

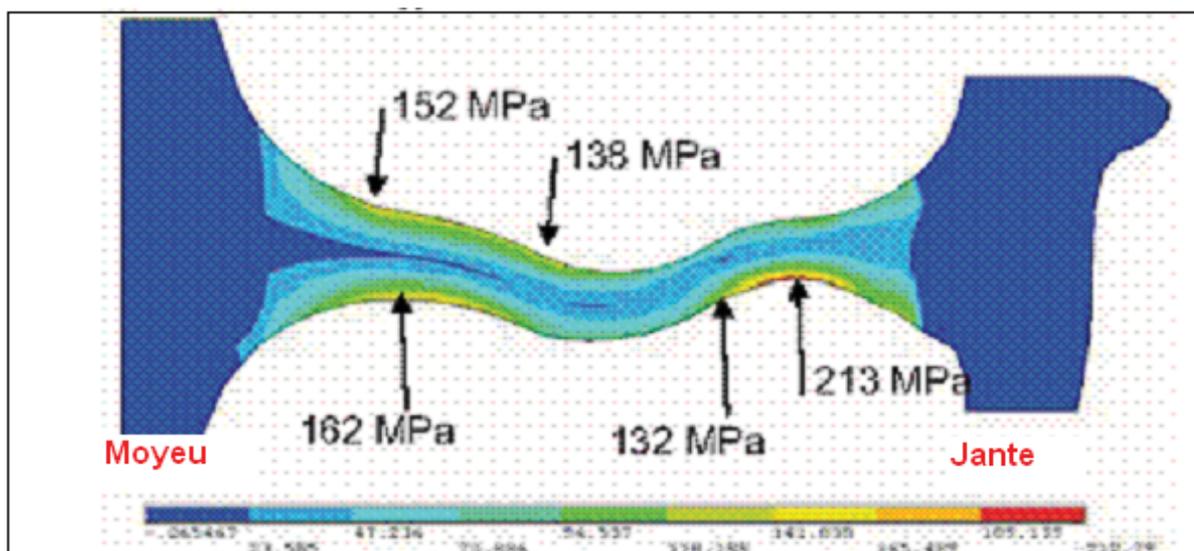


Figure 15 : Champ de contraintes dans une roue ORE 9054 au passage sur un frein de voie de triage

- **Les sollicitations mécaniques combinées**

La combinaison des sollicitations en ligne, caractérisées par un niveau de contraintes plutôt faible et un nombre de cycles très élevé, et des sollicitations sur les triages caractérisées par un niveau de contraintes élevé et un nombre de cycles plus faible a fait l'objet d'une étude basée sur les lois de cumul de Miner. Cette étude, dont la note de présentation est consultable sur le site internet du BEA-TT, montre que les sollicitations dans les triages ont un effet très significatif. Outre qu'elles diminuent la durée de vie de la roue, ces sollicitations déplacent la zone la plus exposée aux fissurations, du pied de toile vers le raccordement jante-toile.

- **Les sollicitations thermiques liées au freinage**

Les équipements et les performances de freinage des familles de wagons présentant un nombre élevé de roues fissurées n'ont rien de particulier. En effet, les 150 wagons de la commande Rhône-Poulenc de 1995 sont équipés de freins à semelles en fonte donnant un « poids frein » de 59 t, ce qui est un niveau très banal.

De plus, les lignes empruntées par ces wagons ne comportent pas de traversées alpines. Elles ne sont donc pas sévères au niveau des sollicitations de freinage de maintien sur longues distances.

Toutefois, les wagons concernés étant amenés à traverser le noeud ferroviaire lyonnais à chaque voyage, la question s'est posée de l'effet éventuel de freinages d'arrêt successifs liés aux difficultés de circulation qui sont fréquentes dans ce secteur.

Pour apprécier les effets de ce type de sollicitation en fatigue à faible nombre de cycles, dite « fatigue oligocyclique », dans l'amorçage et la propagation des fissures de roues en cause, des essais ont été effectués par l'Agence d'Essai Ferroviaire (AEF) à la demande du BEA-TT.

Ces essais dont le rapport est consultable sur le site du BEA-TT, permettent de conclure que les sollicitations de freinage ne jouent pas de rôle significatif dans les fissurations en cause.

Synthèse sur les sollicitations

Les sollicitations subies par les roues des wagons citernes transportant des liquides semblent susceptibles de s'écarter très significativement, dans la réalité, des sollicitations conventionnelles définies par les normes de conception des roues. Cet écart dépend du volume et de la forme de la citerne ainsi que des caractéristiques physiques du liquide. Il se manifeste notamment lorsque ces wagons circulent de façon habituelle dans les trains du lotissement et sont donc soumis à des opérations fréquentes de tri à la gravité.

Le fait qu'aucune fissuration n'ait été détectée sur les roues des wagons de transport d'ammoniac provenant de la même commande de 150 wagons passée en 1995 par Rhône-Poulenc corrobore cette hypothèse, sachant que ces wagons, circulant en trains complets, ne sont pas triés à la gravité.

6.4.2 - La forme de la roue fabriquée

L'essieu en cause dans le déraillement de Neufchâteau fait l'objet d'une expertise judiciaire dont les résultats ne sont pas encore connus.

En revanche, les roues des essieux détectés à Thionville et à Mannheim ont été expertisées respectivement par l'Agence d'Essai Ferroviaire (AEF) de la SNCF et par le laboratoire de la DB.

Sur les roues de l'essieu de Thionville, l'AEF a détecté, tant sur la roue A1 fissurée que sur la roue A2 non fissurée, des anomalies dans l'épaisseur de la toile et notamment une épaisseur insuffisante et irrégulière dans la zone située à un rayon de 335 mm, proche de celle où les fissures sont apparues.

		Rayons			
		380 mm	335 mm	310 mm	235 mm
Tolérances d'épaisseur		22-27	23,5-28,5	25-30	31-41
Section	Position angulaire	Epaisseurs mesurées			
A1 V1	270°	24,45	23,16	26,64	35,24
A1 V2	90°	23,44	19,45	25,80	34,40
A1 H	45°	23,94	21,79	26,64	34,90
A2 V	0°	23,94	19,13	26,47	34,40
A2 H	45°	23,61	20,14	26,47	34,23

Figure 16 : Mesures d'épaisseurs de la toile de roue (exprimées en millimètres)

L'AEF a également détecté des anomalies de forme, les ondulations de la toile n'étant pas dans les tolérances, comme le montre le schéma ci-après.

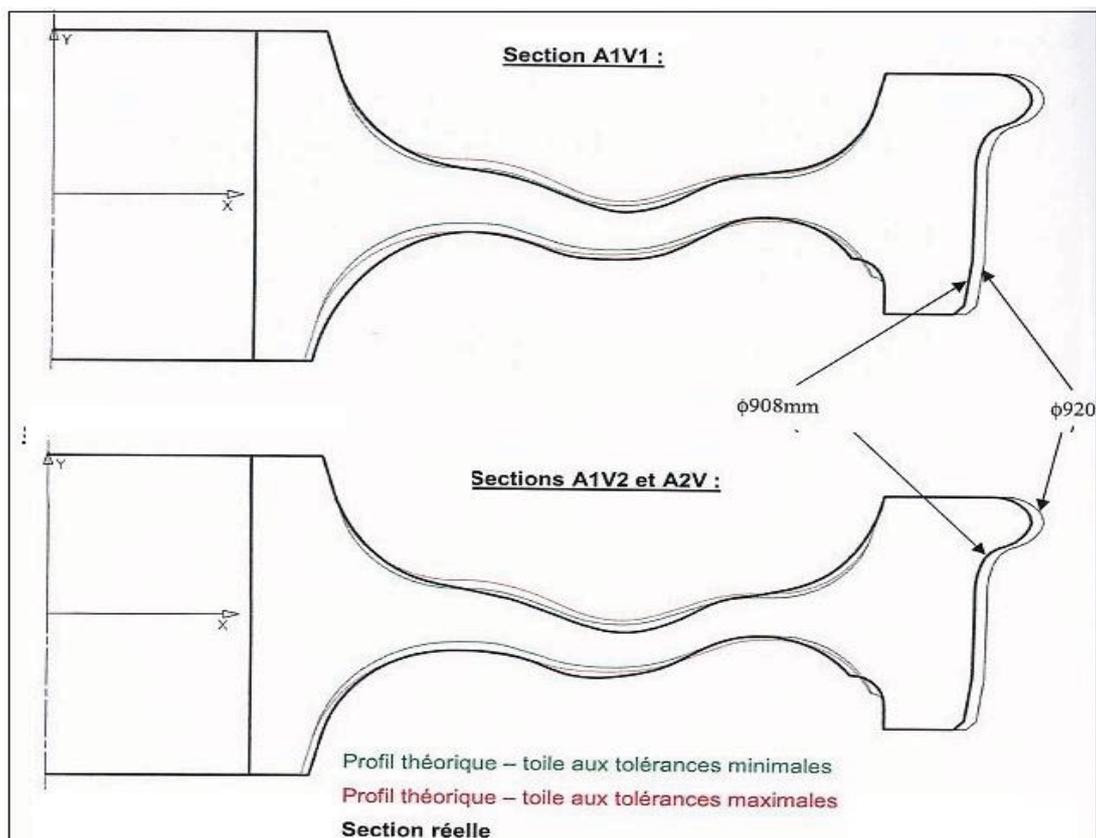


Figure 17 : Sections réelles des roues expertisées

Ces écarts portant sur les épaisseurs et la géométrie induisent dans la roue, lorsqu'elle est soumise aux sollicitations conventionnelles, un champ de contraintes différent de celui subi par une roue respectant le profil théorique. Ce champ de contraintes a été calculé par le CIM et est visualisé dans la figure ci-après.

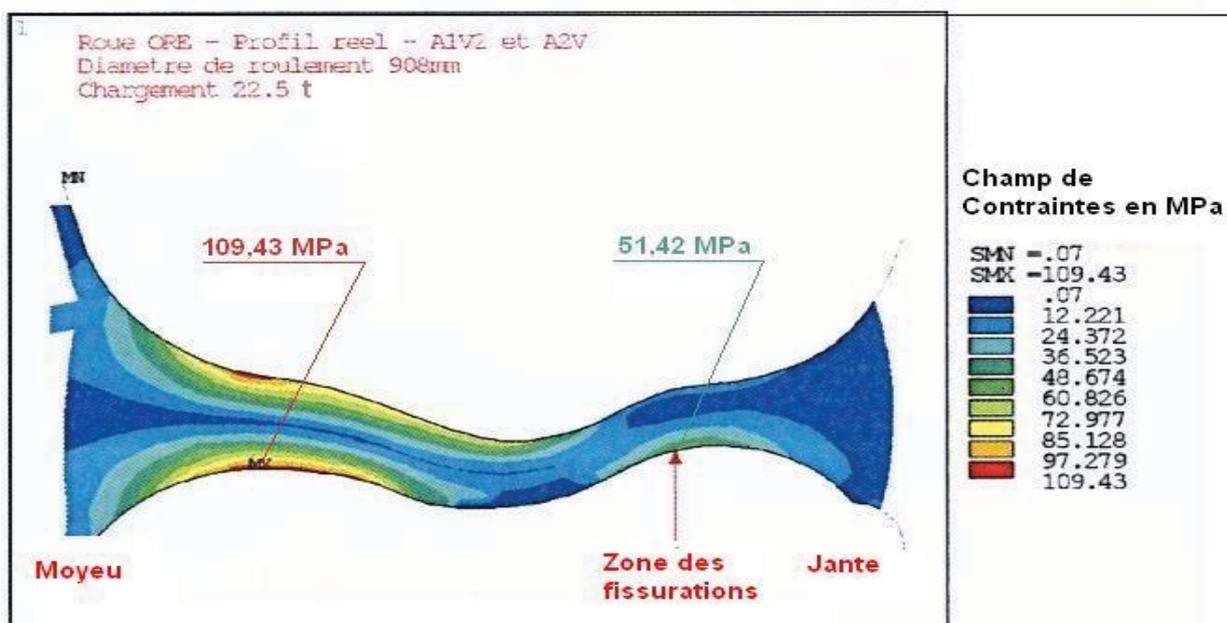


Figure 18 : Champ de contraintes dynamiques dans la roue de Thionville

On observe que, dans la roue réelle, le niveau des contraintes dynamiques dans la zone des fissures est supérieur de 19 % à celui de la roue conforme au profil théorique (51,42 MPa au lieu de 43,17 MPa). Toutefois, il est encore très loin de la limite de 145 MPa.

Par ailleurs, sur les roues de l'essieu détecté à Mannheim qui ont été expertisées par la DB, la forme des toiles de roues était conforme au dessin.

Au total, il ne semble pas que les défauts de forme aient joué un rôle déterminant dans les fissurations observées.

6.4.3 - Les caractéristiques de surface de la roue fabriquée

Les roues en cause étant à toile brute, elles présentent des caractéristiques de surface spécifiques, plus ou moins marquées, liées au processus de forgeage :

- une rugosité élevée ;
- des incrustations de calamine ;
- une décarburation superficielle de l'acier avec l'apparition de structures ferritiques dites « structures de Widmanstaetten ».

Ces défauts ont été constatés sur les roues expertisées, tant par l'AEF que par la DB.

Les effets défavorables de ces caractéristiques pour la tenue en fatigue des roues sont connus et documentés. Ils ont conduit les compagnies ferroviaires à adopter des roues à toile usinée pour tout ou partie de leur matériel roulant et, prioritairement, pour le matériel moteur et automoteur.

L'utilisation des roues à toile brute reste cependant autorisée et pratiquée. Les règles de calcul de la norme EN 13979-1 tiennent compte des particularités de ces roues en appliquant un coefficient de réduction de 1,25 à leur limite de fatigue. Ainsi, pour l'acier R7 avec lequel sont fabriquées les roues des wagons, la limite de fatigue, qui est de 180 MPa pour les roues à toile usinée, est réduite à 145 MPa pour les roues à toile brute.

Ce coefficient de réduction de 1,25 est issu de l'expérience des réseaux. Pour le confirmer de façon scientifique, une campagne d'essais au banc a été réalisée sous l'égide du groupe de travail B 169 de l'European Railway Research Institute (ERRI) et présentée en 1997. Malheureusement, cette campagne n'a pas permis de conclure, des résultats aberrants ayant été constatés.

Dans le cadre de la présente enquête, différents calculs et raisonnements ont été faits pour évaluer le coefficient de concentration de contraintes K_f correspondant à l'état de surface réel des roues dans la zone des fissurations, à savoir une rugosité R_a de 30 μm et des incrustations de calamine formant des alvéoles hémisphériques de 300 μm de profondeur. Selon les méthodes, on trouve que la limite de fatigue doit être divisée, dans cette zone, par un facteur compris entre 1,9 et 2,25.

Une expertise complémentaire faite par la DB montre que ces incrustations sont plus profondes et induisent donc un coefficient K_f qui est plus élevé dans la zone des fissurations que dans les zones plus proches du moyeu. Cette observation contribue à expliquer pourquoi les fissures se déclenchent prioritairement dans la zone incriminée.

En outre, les normes ne caractérisent pas de façon satisfaisante, pour les roues à toile brute, les défauts de surface qui sont acceptables et ceux qui ne le sont pas. La norme EN 13262¹³ précise simplement, et seulement depuis 2009, que la rugosité Ra des parties non-usinées doit être inférieure à 12,5 µm. Auparavant, l'état de surface n'était pas spécifié. De toute façon, l'exigence d'un Ra inférieur à 12,5 µm ne suffit pas, car elle ne permet pas d'exclure les roues présentant des incrustations de calamine profondes comme celles observées sur les roues fissurées.

6.4.4 - Les caractéristiques du métal des roues

Les analyses de l'AEF et de la DB aboutissent aux mêmes résultats, à savoir :

- la composition chimique du métal est conforme aux exigences des deux normes NF F 01-133¹⁴ (1992) et EN 13262 (2009) ;
- la résistance maximale à la traction (Rm) est conforme aux exigences de ces deux normes mais se trouve proche de la limite basse admise dans la jante ;
- la résilience est conforme aux exigences de ces normes.

6.5 - Synthèse sur les causes des fissurations

A ce stade, il apparaît que la série de fissurations de roues, objet de cette enquête pourrait être due à un ensemble de facteurs concourants.

Deux causes ayant un caractère prépondérant et systématique :

- un niveau de sollicitations mécaniques, pour certains types de wagons citernes associés à certains liquides transportés, nettement supérieur à celui pris en compte dans les normes de calcul des roues et notamment lors des passages dans les freins de voies des triages ;
- un abaissement de la limite de fatigue, induit par l'état de surface des roues à toile brute, plus fort que celui qui est prescrit dans les normes de calcul.

Des facteurs relevant de la variabilité de la fabrication industrielle :

- des caractéristiques géométriques parfois légèrement hors norme ;
- des défauts de surface plus accentués sur certaines roues ou sur certaines zones de la roue ;
- certaines caractéristiques mécaniques du métal parfois faibles, bien que conformes aux exigences des normes.

13 Norme européenne : spécifications des roues pour essieux ferroviaires.

14 Norme française : spécifications des roues monoblocs pour matériels ferroviaires.

7 - La maintenance des wagons et des essieux

7.1 - La maintenance en exploitation

Les premiers niveaux de maintenance des wagons, en exploitation, sont du ressort des exploitants ferroviaires. Ce sont des examens visuels rapides qui durent environ une minute par wagon, réalisés sans outillage ni équipement particulier.

Pour l'exploitant SNCF, ces opérations sont la reconnaissance à l'aptitude au transport et la visite technique auxquelles peuvent être ajoutés les examens après les petites réparations accidentelles ou d'entretien courant.

- La reconnaissance de l'aptitude au transport (RAT) vise à détecter les avaries les plus apparentes, et notamment celles occasionnées par les opérations de chargement et de manœuvre des wagons. Elle est réalisée systématiquement lors de l'acceptation des wagons et en cours d'acheminement, après les opérations de tri à la gravité. Elle est effectuée par un ou deux agents habilités cheminant dans l'entrevoie, le long du convoi. La recherche des fissures des toiles de roues n'est pas prévue explicitement dans le manuel de la RAT de la SNCF (FR 0187) ;
- La visite technique (VT) vise à détecter, outre les avaries relevant de la RAT, certains défauts moins apparents et notamment les usures anormales et les détériorations liées à l'utilisation du matériel. Elle est effectuée par cheminement d'un ou deux agents spécialement habilités. Elle est réalisée avant chaque voyage à destination de l'étranger et, pour les parcours nationaux, elle est programmée de façon à respecter, pour chaque wagon, un parcours maximum de 10 000 km entre visites. Le livret de visite (ITE 70 001) fait mention de fissures sur les corps des roues sans aucune précision ni illustration ;
- L'examen après réparation est réalisé après les réparations sur voie spécialisée ou en gare. Dans ce cadre, l'ensemble des organes de sécurité du wagon subit un examen rapide dont la consistance est proche de la VT. Si la réparation est faite sur une voie spécialisée, dotée de fosses et d'éclairage, les conditions de réalisation de cet examen facilitent la détection de certaines avaries peu visibles en VT.

Pour les autres exploitants et à l'étranger, les wagons subissent des opérations définies par les exploitants concernés.

La cohérence entre les opérations de maintenance pratiquées par les différents exploitants est assurée par le respect du Contrat Uniforme d'Utilisation (CUU)¹⁵. L'appendice 1 de l'annexe 9 de ce contrat donne la liste des anomalies qui doivent être détectées lors de la visite technique d'échange. Les fissures de toiles de roues n'y figurent pas explicitement. L'annexe 10 du CUU indique les modalités des réparations (maintenance curative) et précise les vérifications systématiques à effectuer avant remise en service du wagon. L'examen des axes d'essieux (EVIC¹⁶) y a été ajouté en 2010 mais l'examen des roues n'y figure pas.

15 Le CUU a été introduit par la convention de 1999 pour l'organisation du transport international ferroviaire (COTIF) et remplace le régime international des wagons (RIV) de 1922.

16 European Visual Inspection Catalog : protocole d'examen visuel des essieux mis au point sous l'égide de l'ERA à la suite de l'accident de Viareggio du 30 juin 2009.

7.2 - La maintenance en atelier

7.2.1 - L'organisation en vigueur jusqu'en 2006

Jusqu'en 2006, la maintenance de l'infrastructure des wagons immatriculés en France était pilotée par la SNCF.

A ce titre, les wagons et leurs essieux étaient soumis au schéma de maintenance SNCF tel que décrit dans sa directive interne SNCF MA 0075 « Entretien du matériel à marchandises ».

Dans ce schéma, la recherche des fissures dans les toiles de roues repose essentiellement sur deux opérations.

➤ La révision périodique du wagon (REV)

Les wagons citernes concernés par cette enquête sont soumis à une révision spéciale (REV-S) tous les 4 ans et à une révision générale (REV-B) tous les 12 ans¹⁷.

A cette occasion, les essieux subissent un examen visuel et dimensionnel sous véhicule sans dépose ; les fissures sur jante, toile et moyeu sont citées parmi les défauts à rechercher sur les roues. Dans le cadre de l'examen dimensionnel, les roues subissent une mesure de la déformation totale (DT) avec rotation des essieux sous véhicule.

➤ La révision périodique des essieux

Pour les essieux concernés, elle est effectuée tous les 600 000 km sans dépasser 19 ans.

Les essieux sont déposés et envoyés dans un centre spécialisé. Après dépose des boîtes et des roulements, ils sont nettoyés puis les axes sont décapés par brossage ou grenailage. Les essieux sont ensuite expertisés. Lors de cette expertise, les axes sont examinés visuellement puis subissent des contrôles par magnétoscopie et ultra-sons. Les toiles de roues sont examinées visuellement.

7.2.2 - L'organisation en vigueur depuis 2006

Depuis le 1^{er} juillet 2006, date d'entrée en vigueur de la convention de 1999 relative aux transports ferroviaires internationaux (COTIF), les détenteurs de wagons sont responsables de l'organisation et du contrôle de la maintenance de leurs véhicules et de leurs essieux.

La directive européenne 2008/110/CE a modifié la directive de 2004 sur la sécurité des chemins de fer afin de préciser les modalités d'exercice de cette nouvelle responsabilité au sein de l'Union Européenne. Elle conditionne la mise en service et l'utilisation de tout véhicule ferroviaire à son rattachement à une entité en charge de la maintenance (ECM) et elle impose que les entités de cette nature en charge de wagons soient certifiées par un organisme accrédité ou par une autorité nationale de sécurité.

Certaines ECM ont choisi de laisser à la SNCF la mission d'assurer l'ingénierie de cette maintenance ; d'autres assurent elles-mêmes cette mission ou l'ont confiée à des sociétés d'ingénierie.

¹⁷ Pour les wagons 70 m³ NACCO, la périodicité de la REV-B a été portée à 16 ans à partir de 2006 au regard du bon état et des parcours de ces wagons.

Un des schémas de maintenance les plus pratiqués par les ECM est celui défini par l'association allemande des détenteurs de wagons (VPI¹⁸) qui a repris le schéma de maintenance de la DB.

Pour ce qui concerne les roues, à la différence du schéma SNCF, le schéma VPI prévoit, pour certains types d'essieux particuliers, un examen magnétoscopique des toiles de roues lors des révisions d'essieux. Les essieux classiques et notamment ceux du type 9054 ne sont toutefois pas soumis à cet examen.

En pratique, pour les essieux et les roues concernés par la présente enquête, le schéma de maintenance n'a guère évolué après 2006. Cependant, après l'accident de Neufchâteau, certains détenteurs ont pris la décision de faire réaliser des magnétoscopies systématiques sur les roues lors des révisions de leurs essieux de type 9054.

7.3 - La visibilité des fissures lors des opérations de maintenance

Les fissures de toiles de roues, lorsqu'elles atteignent une taille d'une dizaine de centimètres, se manifestent par des coulures de rouille qui les rendent détectables visuellement.

Toutefois, lors des opérations d'examen sous véhicule, en exploitation ou en atelier, la détection est rendue difficile par l'architecture du bogie Y25 dont la suspension primaire cache une grande partie de la face externe de la roue.

De plus, les conditions d'éclairage des parties basses des wagons, inexistantes sur les sites de RAT et de VT et souvent médiocres dans les ateliers, ne facilitent pas la détection des fissures sur toiles.



Figure 19 : Fissure visible

¹⁸ Vereinigung der Privatgüterwagen Interessenten.



Figure 20 : Vue des roues du bogie Y25 sous véhicule

Lors des révisions de wagons, pour la mesure de la déformation totale (DT) des roues, les essieux subissent une rotation sous véhicule mais l'opérateur, qui se trouve dans une fosse entre les rails, n'est pas bien placé pour détecter les fissures de toiles de roues, celles-ci s'amorçant généralement sur la face externe.

Lors des révisions des essieux, ceux-ci sont nettoyés par lavage, brossage ou grenailage avant expertise. Ces opérations effacent les coulures de rouille et autres indices de fissuration, rendant difficile la détection visuelle des fissures.



Figure 21 : Roue nettoyée avec deux fissures, non détectables visuellement

7.4 - Les examens magnétoscopiques des roues à toile brute

Comme il est indiqué plus haut, avant l'accident de Neufchâteau, compte tenu de leur bonne tenue en service, il n'avait pas été jugé utile, ni par la SNCF ni par la DB, de soumettre périodiquement les roues ORE à un examen magnétoscopique de leur toile.

Par ailleurs, sur des roues à toile brute, un tel examen est susceptible de provoquer des détections non justifiées dues à des défauts superficiels, en l'absence de fissure.

A la suite de l'accident précité et de la série de fissures détectées dans les jours qui ont suivi, la SNCF a mis au point et diffusé aux détenteurs et aux centres réparateurs concernés une procédure d'examen magnétoscopique incluant l'élimination par meulage des défauts superficiels de moins de 1 mm de profondeur. C'est cette procédure qui a été utilisée lors des campagnes de vérifications décrites aux paragraphes 5.1 et 5.2 du présent rapport.



Figure 22 : Exemple de spectres de magnétoscopie sur défauts superficiels

Sur l'ensemble des essieux examinés lors de ces campagnes, 8 roues fissurées ont été détectées visuellement sous véhicule.

La procédure d'examen magnétoscopique a permis de révéler des défauts sur 40 autres roues. Parmi celles-ci, 21 étaient effectivement fissurées, les 19 autres ne présentant que des défauts superficiels de forgeage.

Au vu de ces chiffres, il apparaît que l'examen magnétoscopique apporte une réelle plus-value pour la détection des fissures dans les toiles de roues, mais que le nombre de détections dues à des défauts de surface sans fissure est proche de 50 %, entraînant, pour lever le doute, des opérations de meulage qui prennent du temps.

7.5 - Historique de la maintenance des wagons et des essieux concernés

En application du schéma de maintenance auquel ils étaient soumis, les 150 wagons concernés ont subi 2 REV-S et 1 REV-B et étaient encore très majoritairement équipés de leurs essieux d'origine. 25 essieux seulement sur 600 avaient été échangés suite à des avaries ou des défauts des tables de roulement.

L'examen des parcours des essieux fissurés fait ressortir une bonne corrélation entre les kilométrages et le taux d'apparition des fissures ainsi que le montre l'annexe 6. Ceci permet de penser qu'un entretien périodique approprié serait de nature à permettre la détection des fissures avant qu'elles ne deviennent dangereuses.

Toutefois, les parcours des essieux fissurés sont relativement dispersés, entre 300 000 et 550 000 km, et ils sont inférieurs au pas d'entretien normal (PEN) des essieux qui est de 600 000 km entre révisions. Ceci doit conduire à s'interroger sur la pertinence de ce pas d'entretien pour ce type d'essieux.

Indépendamment des révisions évoquées ci-dessus, les wagons concernés ont subi de nombreuses opérations de maintenance en exploitation (en moyenne, 50 RAT, 10 VT et 1 réparation par an) sans qu'aucune fissure ne soit détectée. Notamment, le wagon à l'origine du déraillement avait fait l'objet d'une RAT le matin du 22 mai 2010, d'une VT le 18 mai et d'une réparation le 12.

8 - Analyse des causes et orientations préventives

8.1 - Le déraillement

Le déraillement de Neufchâteau est dû à une cause directe unique : la rupture de la roue avant gauche du wagon citerne n° 33 87 792 9543-9.

Cette rupture, accompagnée de la perte d'environ un tiers de la jante de la roue, a occasionné la perte de guidage de l'essieu avant de ce wagon et son déraillement.

Elle est la conséquence d'une fissuration de fatigue qui s'est amorcée en plusieurs endroits de la face externe de la toile de roue, à proximité du raccordement entre la toile et la jante, et qui s'est propagée, sans être détectée, jusqu'à atteindre une taille suffisante pour provoquer la rupture de la roue. Des fissurations similaires, dont certaines avaient déjà atteint une taille critique, ont été mises en évidence après le déraillement de Neufchâteau sur 29 roues du même type.

Les constats et les investigations effectuées conduisent à rechercher les facteurs causaux de cette rupture et les orientations préventives dans les deux domaines suivants :

- les données de conception des roues de wagon ;
- la détection des fissures des roues des wagons en maintenance.

8.1.1 - *Les données de conception des roues de wagon*

Les roues, comme tous les éléments de structure ou organes mécaniques de sécurité du matériel ferroviaire, sont « dimensionnées en fatigue ». Elles doivent donc être conçues de telle sorte que l'amplitude des contraintes variables auxquelles elles seront soumises soit inférieure en tout point à la limite de fatigue de l'acier utilisé, avec une marge de sécurité suffisante.

Mais l'état actuel des connaissances sur les sollicitations réelles que les roues des wagons subissent en service ainsi que sur leurs combinaisons est incomplet. Les calculs du centre d'ingénierie du matériel de la SNCF montrent que, du fait des mouvements des liquides transportés, les wagons citernes peuvent être soumis, dans certaines circonstances, à des sollicitations nettement supérieures à celles qui sont prises en compte dans les normes de calcul des roues.

Par ailleurs, l'influence défavorable des caractéristiques de surface des roues à toile brute sur leur limite de fatigue est également mal connue et probablement sous-estimée dans les normes.

L'acquisition de ces connaissances nécessiterait des études et des essais en ligne et au banc qui dépassent le cadre de la présente enquête.

A ce stade, il apparaît néanmoins que la série de fissurations de roues détectées dans le cadre des campagnes de vérifications lancées par l'EPSF après le déraillement de Neufchâteau serait due à deux causes concourantes :

- un niveau de sollicitations mécaniques des roues, propre à certains wagons citernes et en lien avec les caractéristiques physiques de certains liquides transportés, qui apparaît nettement supérieur à celui qui est pris en compte dans les normes de calcul, notamment lorsque ces wagons passent dans les freins de voies des triages ;

- un abaissement de la limite de fatigue, lié aux caractéristiques de surface des roues à toile brute, qui pourrait être plus fort que celui qui est prescrit dans les normes de calcul.

Ces deux facteurs se traduisent, dans le matériau des roues, par une diminution de la marge de sécurité entre le niveau de contraintes et la limite de fatigue.

A cette situation, se superpose la variabilité des états de surface et des caractéristiques géométriques et métallurgiques des roues. Cette variabilité, qui est accentuée sur les roues à toile brute, peut se combiner sur certaines pièces et conduire à des dépassements localisés de la limite de fatigue par les contraintes et donc à l'apparition et à la propagation de fissures.

A la lumière de ces éléments, le BEA-TT formule les trois recommandations suivantes :

Recommandation R1 (EPSF, SNCF¹⁹, Valdunes)

Intervenir auprès de l'Agence Ferroviaire Européenne (directement pour l'EPSF, par l'intermédiaire du JSG²⁰ pour la SNCF et par l'intermédiaire de l'ERWA²¹ pour Valdunes) afin de promouvoir une campagne d'études et d'essais permettant d'évaluer les sollicitations réelles auxquelles sont soumis les organes de roulement des wagons citernes, en ligne et en triage, ainsi que les interactions de ces sollicitations, en vue de leur prise en compte dans les normes de conception des roues.

Recommandation R2 (Bureau de Normalisation Ferroviaire)

Intervenir auprès des instances européennes de normalisation pour faire retirer les roues à toile brute des normes européennes de conception et de fabrication des roues de wagon, dans l'attente d'un approfondissement suffisant des connaissances sur l'influence de leurs caractéristiques de surface sur leur tenue en fatigue.

Recommandation R3 (EPSF)

Dans l'attente d'une évolution satisfaisante des normes concernant la conception et la fabrication des roues à toile brute, recommander aux détenteurs de wagons immatriculés en France et aux entités en charge de la maintenance certifiées en France, de ne plus monter de roues neuves à toile brute sur leurs wagons.

En informer l'ensemble des autorités nationales de sécurité afin que des mesures semblables soient prises dans les autres Etats.

19 En tant qu'entreprise à laquelle appartient le représentant français au JSG.

20 Le JSG (Joint Sector Group) est un groupe de travail créé par le secteur ferroviaire afin de faire des propositions à l'agence ferroviaire européenne en matière de maintenance des essieux.

21 European Railway Wheels and Wheelsets Association.

8.1.2 - La détection des fissures de roues de wagon en maintenance

- **Concernant les examens en exploitation :**

Compte tenu de leur taille et des traces de rouille qui les mettent en évidence, les fissures les plus développées comme celles constatées sur le wagon de Neufchâteau ou sur les wagons de Thionville ou du Havre auraient pu être détectées lors de certaines opérations de reconnaissance de l'aptitude au transport (RAT), lors de visites techniques (VT), comme cela a été le cas à Mannheim, ou lors de vérifications après réparation. Cependant, la rapidité de ces opérations et les conditions de leur réalisation ne permettent de détecter de façon fiable que les avaries les plus évidentes et celles pour lesquelles la vigilance des agents est entretenue.

A cet égard, le BEA-TT émet les recommandations suivantes :

Recommandation R4 (EPSF)

Demander aux entreprises ferroviaires opérant sur le réseau ferré national de renforcer puis de maintenir la vigilance des agents chargés de l'inspection des wagons en exploitation et des vérifications après réparation en matière de recherche des fissures sur les toiles de roues. Leur demander également d'inclure explicitement, si nécessaire, cette recherche dans les manuels des métiers concernés.

Recommandation R5 (EPSF, SNCF¹⁹)

Intervenir auprès de l'Agence Ferroviaire Européenne pour inclure l'examen des toiles de roues dans le protocole d'inspection visuelle des essieux (EVIC).

Recommandation R6 (SNCF, NACCO, VTG)

Intervenir auprès du « Bureau CUU » pour faire figurer plus explicitement dans les annexes 9 et 10 du contrat uniforme d'utilisation la recherche des fissures de toiles de roues lors des visites techniques d'échange et lors des vérifications après réparation.

- **Concernant les révisions de wagons :**

Compte tenu du temps nécessaire à la propagation des fissures, la consultation des historiques de révision de certains des wagons concernés permet de conclure que certaines fissures étaient visibles lors des dernières révisions effectuées et auraient pu être détectées lors de l'examen des essieux sous véhicule.

Les modalités de ces examens mériteraient donc d'être revues afin d'en améliorer l'efficacité en matière de détection des fissures.

Ceci conduit le BEA-TT à formuler la recommandation suivante :

Recommandation R7 (EPSF)

Agir auprès des entités en charge de la maintenance établies en France et des autorités nationales de sécurité étrangères pour promouvoir l'amélioration des modalités de la recherche des fissures sur les toiles de roues lors des examens des essieux sous véhicule effectués dans le cadre des révisions de wagons.

- **Concernant les révisions d'essieux :**

L'examen des toiles de roues lors des révisions d'essieux ayant lieu après leur nettoyage, certains indices de la présence de fissures sont effacés et la détection visuelle en est rendue difficile. L'examen magnétoscopique de ces toiles de roues apporte un supplément d'efficacité par rapport à l'examen visuel actuellement en vigueur mais avec un coût plus élevé et un pourcentage non négligeable de détections injustifiées.

Par ailleurs, sur les wagons citernes en cause, les fissures constatées ont atteint une taille critique après un parcours de 300 000 à 550 000 km, inférieur au pas d'entretien normal des essieux qui est de 600 000 km.

Au vu de ces constats, le BEA-TT adresse à l'EPSF la recommandation ci-après :

Recommandation R8 (EPSF)

Agir auprès des entités en charge de la maintenance établies en France et des autorités nationales de sécurité étrangères afin que les essieux de wagons citernes avec roues à toile brute fassent l'objet :

- **d'une amélioration des modalités de recherche des fissures sur toiles de roues lors des révisions des essieux et des autres opérations sur essieux déposés ;**
- **d'une trame d'entretien spécifique, cohérente avec la vitesse d'amorçage et de propagation des fissures.**

8.2 - Les mesures prises après le déraillement

8.2.1 - *L'alerte et la protection ferroviaire*

Le manque de rigueur dans les échanges radio

L'enregistrement de la communication radio de 10h47 entre le conducteur et le régulateur révèle un manque de rigueur et de précision dans les échanges.

Notamment, le régulateur ne s'est pas présenté au début de la communication, de sorte que le conducteur a cru parler à l'agent circulation de Neufchâteau.

Le conducteur a évoqué clairement la présomption de déraillement mais les autres informations qu'il a données (localisation, indices...) ont manqué de précision.

En outre, les débuts de ses communications sont inaudibles, signe d'une mauvaise maîtrise de l'utilisation de l'alternat en radio.

Le retard dans la protection électrique

La coupure d'urgence du courant caténaire a été demandée à 12h15 soit environ une heure et demie après l'accident et près d'une heure après que le conducteur ait signalé que des citernes de matières dangereuses étaient couchées et qu'une fuite affectait l'une d'elles.

Des constats similaires avaient été faits lors des enquêtes réalisées par le BEA-TT sur les accidents de Boisseuil et d'Orthez. Ils avaient donné lieu, en décembre 2010 et janvier 2011, à des recommandations visant à accroître la clarté des communications entre les conducteurs et les agents sédentaires, à expliciter dans les textes métiers les mesures d'urgence à prendre en cas d'accident impliquant des matières dangereuses et à recourir plus systématiquement à la coupure d'urgence de la tension caténaire dans un tel cas.

Le BEA-TT confirme la pertinence de ces recommandations et invite la SNCF à veiller à la mise en œuvre rigoureuse des actions qu'elle a annoncées après la parution de ces rapports.

8.2.2 - Les mesures conservatoires

Alors que la première campagne de vérifications, lancée en juin 2010 par l'EPSF et qui concernait quatre détenteurs, a été effectuée relativement rapidement, la seconde, lancée en janvier 2011 et visant environ 150 détenteurs, n'a conduit, après neuf mois, qu'à la vérification de moins d'un quart de la population d'essieux visée. Cette situation interpelle sur l'aptitude de certains détenteurs à gérer en sécurité leurs wagons et leurs essieux. Le BEA-TT adresse donc à l'EPSF et à l'AFWP la recommandation suivante :

Recommandation R9 (EPSF, AFWP)

Agir au niveau national et auprès de l'Agence Ferroviaire Européenne pour que les détenteurs de wagons et les entités en charge de la maintenance se dotent des organisations et des outils leur permettant à la fois de connaître l'état et la situation de leur parc de wagons et d'essieux et de garantir la traçabilité des opérations de maintenance. Dans ce cadre, agir pour la mise en œuvre du guide européen de traçabilité des essieux EWT²².

22 EWT : European Wheelset Traceability.

9 - Conclusions et recommandations

9.1 - Causes de l'accident

Le déraillement est dû à une cause directe unique : la rupture de la roue avant gauche du wagon citerne n° 33 87 792 9543-9.

Cette rupture, accompagnée de la perte d'environ un tiers de la jante de la roue, a occasionné la perte de guidage de l'essieu avant de ce wagon et son déraillement.

Elle est la conséquence d'une fissuration de fatigue qui s'est amorcée en plusieurs endroits de la face externe de la toile de roue, à proximité du raccordement entre la toile et la jante, et qui s'est propagée, sans être détectée, jusqu'à atteindre une taille suffisante pour provoquer la rupture de la roue.

Des fissurations similaires, dont certaines avaient déjà atteint une taille critique, ont été mises en évidence après le déraillement de Neufchâteau sur 29 roues identiques.

9.2 - Recommandations

L'analyse des causes de l'accident conduit à formuler des recommandations dans les deux domaines suivants :

- les données utilisées pour la conception des roues de wagon ;
- la détection des fissures des roues des wagons en maintenance.

Les conditions de mise en œuvre des mesures conservatoires appellent, en outre, une recommandation supplémentaire portant sur le suivi des wagons et des essieux par les détenteur et les entités en charge de la maintenance.

Par ailleurs, l'examen de la mise en œuvre des mesures d'alerte et de protection ferroviaire est l'occasion de rappeler à la SNCF les recommandations émises sur ce thème à l'issue des enquêtes techniques réalisées sur les accidents de Boisseuil et d'Orthez et de l'inviter à veiller à la mise en œuvre des actions qu'elle avait annoncées.

9.2.1 - Les données de conception des roues

Recommandation R1 (EPSF, SNCF²³, Valdunes)

Intervenir auprès de l'Agence Ferroviaire Européenne (directement pour l'EPSF, par l'intermédiaire du JSG²⁴ pour la SNCF et par l'intermédiaire de l'ERWA²⁵ pour Valdunes) afin de promouvoir une campagne d'études et d'essais permettant d'évaluer les sollicitations réelles auxquelles sont soumis les organes de roulement des wagons citernes, en ligne et en triage, ainsi que les interactions de ces sollicitations, en vue de leur prise en compte dans les normes de conception des roues.

23 En tant qu'entreprise à laquelle appartient le représentant français au JSG.

24 Le JSG (Joint Sector Group) est un groupe de travail créé par le secteur ferroviaire afin de faire des propositions à l'agence ferroviaire européenne en matière de maintenance des essieux.

25 European Railway Wheels and Wheelsets Association.

Recommandation R2 (Bureau de Normalisation Ferroviaire)

Intervenir auprès des instances européennes de normalisation pour faire retirer les roues à toile brute des normes européennes de conception et de fabrication des roues de wagon, dans l'attente d'un approfondissement suffisant des connaissances sur l'influence de leurs caractéristiques de surface sur leur tenue en fatigue.

Recommandation R3 (EPSF)

Dans l'attente d'une évolution satisfaisante des normes concernant la conception et la fabrication des roues à toile brute, recommander aux détenteurs de wagons immatriculés en France et aux entités en charge de la maintenance certifiées en France, de ne plus monter de roues neuves à toile brute sur leurs wagons.

En informer l'ensemble des autorités nationales de sécurité afin que des mesures semblables soient prises dans les autres Etats.

9.2.2 - La détection des fissures de roues de wagon en maintenance.

Recommandation R4 (EPSF)

Demander aux entreprises ferroviaires opérant sur le réseau ferré national de renforcer puis de maintenir la vigilance des agents chargés de l'inspection des wagons en exploitation et des vérifications après réparation en matière de recherche des fissures sur les toiles de roues. Leur demander également d'inclure explicitement, si nécessaire, cette recherche dans les manuels des métiers concernés.

Recommandation R5 (EPSF, SNCF²³)

Intervenir auprès de l'Agence Ferroviaire Européenne pour inclure l'examen des toiles de roues dans le protocole d'inspection visuelle des essieux (EVIC).

Recommandation R6 (SNCF, NACCO, VTG)

Intervenir auprès du « Bureau CUU » pour faire figurer plus explicitement dans les annexes 9 et 10 du contrat uniforme d'utilisation la recherche des fissures de toiles de roues lors des visites techniques d'échange et lors des vérifications après réparation.

Recommandation R7 (EPSF)

Agir auprès des entités en charge de la maintenance établies en France et des autorités nationales de sécurité étrangères pour promouvoir l'amélioration des modalités de la recherche des fissures sur les toiles de roues lors des examens des essieux sous véhicule effectués dans le cadre des révisions de wagons.

Recommandation R8 (EPSF)

Agir auprès des entités en charge de la maintenance établies en France et des autorités nationales de sécurité étrangères afin que les essieux de wagons citernes avec roues à toile brute fassent l'objet :

- d'une amélioration des modalités de recherche des fissures sur toiles de roues lors des révisions des essieux et des autres opérations sur essieux déposés ;
- d'une trame d'entretien spécifique, cohérente avec la vitesse d'amorçage et de propagation des fissures.

9.2.3 - *Le suivi des wagons et des essieux*

Recommandation R9 (EPSF, AFWP)

Agir au niveau national et auprès de l'Agence Ferroviaire Européenne pour que les détenteurs de wagons et les entités en charge de la maintenance se dotent des organisations et des outils leur permettant à la fois de connaître l'état et la situation de leur parc de wagons et d'essieux et de garantir la traçabilité des opérations de maintenance. Dans ce cadre, agir pour la mise en œuvre du guide européen de traçabilité des essieux EWT²⁶.

²⁶ EWT : European Wheelset Traceability.

ANNEXES

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête

Annexe 2 : Liste des rapports d'études et d'expertises en lien avec l'enquête

Annexe 3 : Conclusions du rapport d'étape du 26 janvier 2011

Annexe 4 : Diagramme du wagon citerne AFR de 70 m³

Annexe 5 : Processus de fabrication des roues Valdunes

Annexe 6 : Analyse statistique

Annexe 7 : Historique de maintenance de certains wagons présentant des roues fissurées

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête



MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DE L'ÉNERGIE,
DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE LA MER
en charge des Technologies vertes et des Négociations sur le climat

*Bureau d'enquêtes sur les accidents
de transport terrestre*

Paris, le 26 mai 2010

Le Directeur

BEA-TT 2010 - 008

DECISION

Le directeur du bureau d'enquêtes sur les accidents de transport terrestre ;

Vu la loi n° 2002-3 du 3 janvier 2002 modifiée relative à la sécurité des infrastructures et systèmes de transport et notamment son titre III sur les enquêtes techniques ;

Vu le décret n° 2004-85 du 26 janvier 2004 modifié relatif aux enquêtes techniques après accident ou incident de transport terrestre ;

Vu les circonstances du déraillement de wagons transportant des matières dangereuses survenu le 22 mai 2010 à Neufchâteau (88).

DECIDE

Article 1 : Une enquête technique, effectuée dans le cadre du titre III de la loi n° 2002-3 du 3 janvier 2002 susvisée, est ouverte concernant le déraillement de wagons transportant des matières dangereuses survenu le 22 mai 2010 à Neufchâteau (88).

Jean Gérard KOENIG

Annexe 2 : Liste des rapports d'études et d'expertises en lien avec l'enquête

Ces documents sont consultables sur le site du BEA-TT à l'adresse :

<http://www.bea-tt.developpement-durable.gouv.fr>

- **Rapport d'expertise de deux roues de l'essieu type 9054 du wagon citerne n° 37 80 784 6371-8 détecté à Thionville**
- **Présentation des calculs réalisés conjointement par le CIM-SNCF et Valdunes portant sur :**
 - l'influence de la géométrie réelle sur le comportement en fatigue de la roue ORE ;
 - l'influence des chargements non-conventionnels sur le comportement en fatigue de la roue ORE ;
 - l'influence de la combinaison des chargements conventionnels et non conventionnels.
- **Rapport d'expertise sur l'influence de la fatigue oligocyclique sur le mode de fissuration des toiles de roues de wagon.**

Annexe 3 : Conclusions du rapport d'étape du 26 janvier 2011

6 - Conclusions et recommandations

La cause immédiate du déraillement du premier wagon accidenté est probablement la rupture de sa roue avant gauche, consécutive à une fissuration en service au niveau de la toile de roue.

Les causes de cette fissuration et de la recrudescence des fissurations de toiles de roues de wagons ne sont pas expliquées pour l'instant.

Compte tenu de cette incertitude et des cas détectés depuis le mois de juin 2010, le périmètre de la campagne de vérification, engagée par l'EPSF, doit être étendu.

Par ailleurs, la fiabilité de la détection des fissures de toiles de roues de wagons, lors des opérations de maintenance, doit être améliorée et la vigilance des agents chargés des inspections en exploitation doit être pérennisée.

Enfin, les anomalies constatées sur les installations ferroviaires du site de Roussillon sont à rectifier.

Sans attendre la conclusion de l'enquête, le BEA-TT formule les recommandations suivantes :

Recommandation R1 (EPSF) :

Étendre la campagne de vérification décidée en juin 2010 en tenant compte des détections effectuées ou remises en lumière depuis cette date.

Recommandation R2 (AFWP) :

Transmettre aux détenteurs la recommandation de renforcer et de fiabiliser les trames de détection des fissures de roues de leurs wagons, en lien avec leurs entités en charge de la maintenance ou leurs prestataires d'ingénierie de maintenance.

Recommandation R3 (SNCF, en tant que prestataire d'ingénierie de maintenance) :

Renforcer et fiabiliser la trame de détection des fissures de toiles de roues de wagons, sous véhicule et essieux déposés.

Notamment, pour examiner la totalité de la toile de roue sous véhicule, envisager la rotation des essieux, lors de certaines opérations de maintenance, de même que la traçabilité de cette opération.

Recommandation R4 (EPSF) :

Demander aux entreprises ferroviaires opérant sur le RFN de maintenir de façon pérenne la vigilance des agents chargés de l'inspection des wagons en exploitation (RAT, VT...), concernant la recherche des fissures sur les toiles de roues et, si nécessaire, d'inclure explicitement cette recherche dans les manuels des métiers concernés.

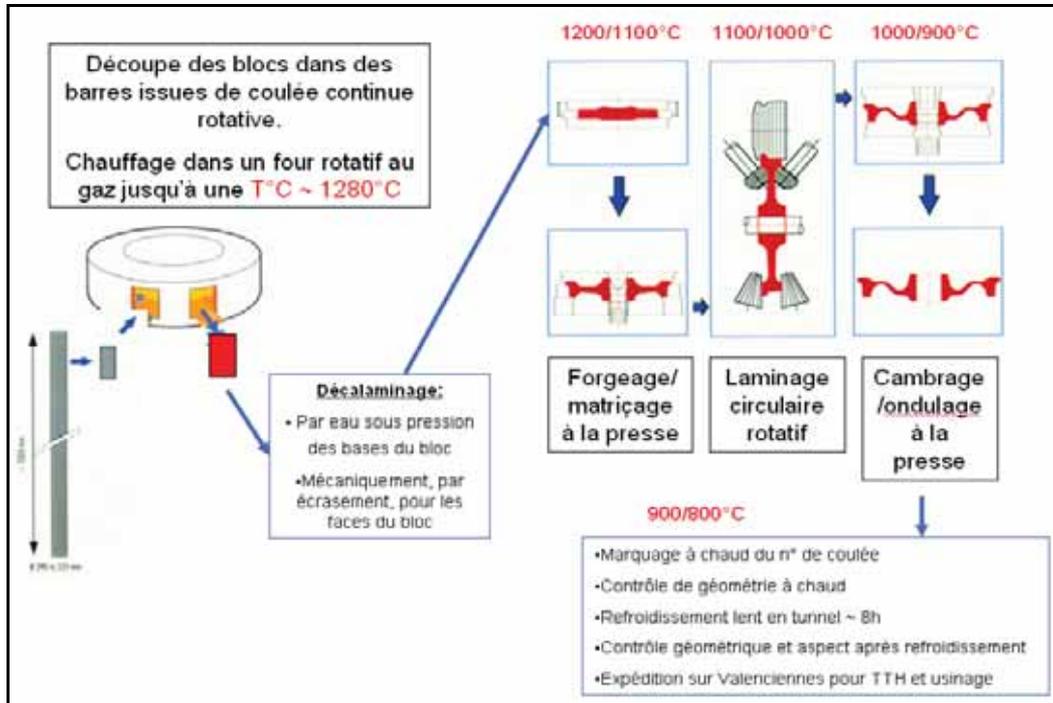
Recommandation R5 (OSIRIS) :

Mettre en conformité les installations ferroviaires du site de Roussillon avec les normes de voies en vigueur.

Annexe 5 : Processus de fabrication des roues Valdunes

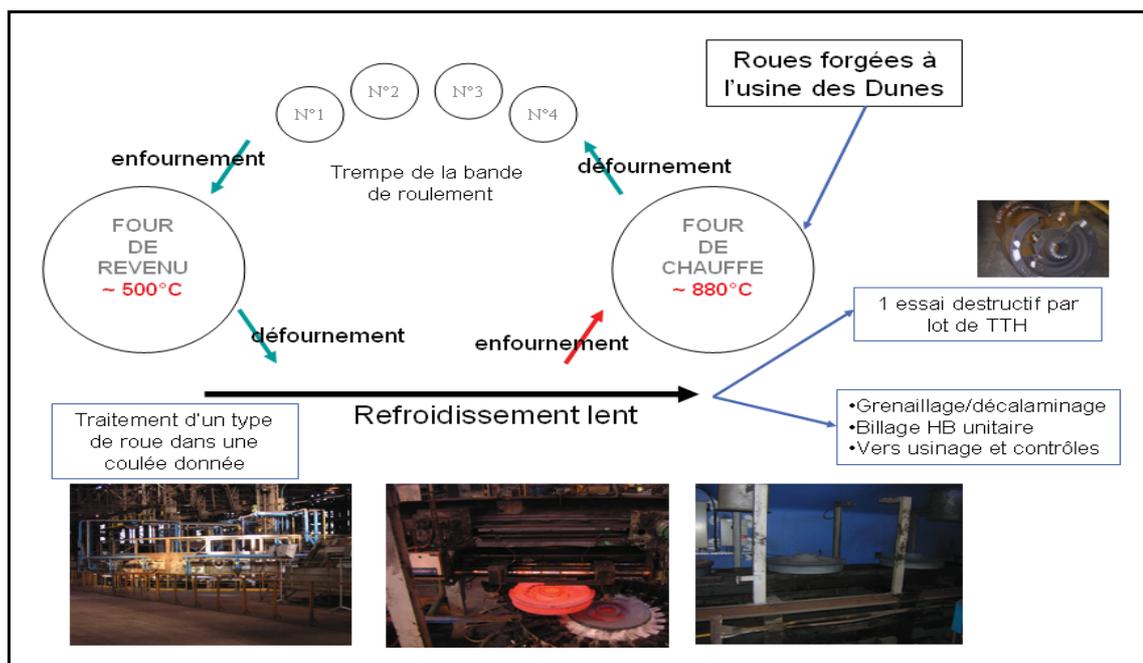
Les roues Valdunes sont fabriquées en deux étapes sur deux sites :

➤ le forgeage sur le site des Dunes



➤ les traitements thermiques et l'usinage sur le site de Valenciennes.

Les roues sont traitées thermiquement par coulée et par type. Le traitement consiste en une chauffe d'austénitisation de la totalité de la pièce suivi d'une aspersion d'eau sur la table de roulement, la roue étant en position horizontale, boudin en haut, puis d'un revenu permettant d'adapter le niveau de dureté et de contraintes résiduelles à la spécification du client.



Contrôles après traitement thermique

Après traitement thermique, les roues subissent :

- un refroidissement lent permettant le retour à la température ambiante ;
- un traitement de grenailage afin d'éliminer la calamine liée aux cycles thermiques ;
- un contrôle systématique de dureté Brinell pour vérifier l'homogénéité de dureté du lot. Une valeur de 30 HB est classiquement demandée pour l'étendue de dureté du lot traité ;
- un contrôle dimensionnel pour les roues livrées brutes chez le client.

Un essai destructif est réalisé sur une roue de chaque lot de traitement thermique.

Usinage et contrôle des roues

Les tables de roulement (profil de roulement), les faces des jantes et le moyeu sont usinés.

Sur les roues à toile brute, seul un usinage partiel (léchage) des raccordements et un débalourdage est effectué. Le léchage de raccordement peut conduire à des différences de position des zones laissées brutes, du fait que la tangence doit être assurée entre la zone usinée des rayons et les zones de toile brute.

Les roues à toile brute subissent un contrôle par ultrasons de la jante.

Depuis 2003, les roues à toile brute ne sont plus fabriquées pour les chemins de fer européens, les clients préférant les roues usinées, plus légères et autorisant, de ce fait, une charge utile plus élevée.

Depuis 2008, une magnétoscopie systématique des toiles de roues est réalisée.

Annexe 6 : Analyse statistique

Cabinet VILMART

45 bis rue Barrault 75013 Paris
Tel/Fax: 01 45 80 29 79

CHRISTIAN VILMART

Economiste
Ingénieur civil des mines

Directeur Général

E. mail : christian.vilmart@wanadoo.fr
Portable : 06 80 08 39 41

Analyse statistique des fissurations détectées sur des wagons

La présente note a pour objet de déterminer si le type de wagons et leur kilométrage annuel ont une influence significative sur les fissurations constatées de leurs roues. Elle s'appuie sur des tests statistiques classiques de comparaisons d'échantillons de wagons provenant des campagnes de vérification.

1 Influence du type de wagons (Comparaison de fréquences de fissurations)

Dans le parc de 150 wagons construit par AFR en 1995 et doté d'essieux Valdunes identiques, on constate que :

- les fissurations sont concentrées sur les 50 wagons de 70m3 (18 cas) et les 50 wagons de 50m3 (9 cas) ;
- les 50 wagons de 104m3 n'ont aucune fissuration.

La différence dans les concentrations est-elle statistiquement significative ?

Pour répondre à cette question, on compare les fréquences de fissurations des deux échantillons constitués d'une part des 100 wagons de 70m3 et 50m3 (27%) et d'autre part des 50 wagons de 104m3 (0%).

Le test statistique s'appuie sur les propriétés de la différence des fréquences de fissurations des deux échantillons de wagons qui suit une loi normale de moyenne nulle (dans l'hypothèse d'égalité des populations des deux types de wagons) et dont on peut calculer l'écart type¹.

Aux seuils de confiance de 5% et de 1%, la fréquence de fissures pour les wagons 70/50 m3 est significativement différente de celle de l'autre groupe (104 m3). Cette différence constatée de 27% ne peut être attribuée aux seules fluctuations d'échantillonnage.

INFLUENCE DU TYPE DE WAGON			
On teste l'hypothèse nulle H0			
Fréquence wgs 70/50 m3 - fréquence wgs 104 m3 = 0			
	Wagons 70/50 m3	Wagons 104 m3	
Fissurations	27	0	
Non fissuration	73	50	
Total	100	50	
Fréquence Fis	0,27	0,00	
La différence des fréquences suit une loi normale de moyenne nulle			
et d'écart type	0,067		
Intervalle d'acceptation de H0 au seuil de 5%		-0,13	0,13
Intervalle d'acceptation de H0 au seuil de 1%		-0,17	0,17
Différence observée	0,27		
Elle est située à l'extérieur de l'intervalle et donc significative.			

La différence dans les concentrations est statistiquement significative

¹ Racine $(p(1-p)/(1/n1+1/n2))$ avec p la fréquence des wagons avec fissures sur le total des deux échantillons et n1 et n2 leurs effectifs

2 Influence des kilomètres parcourus (Comparaison de moyennes)

Pour déterminer si les fissures apparaissent sur les essieux des wagons ayant le parcours annuel le plus important, le test statistique compare les parcours moyens annuels des wagons avec fissures et des wagons sans fissures.

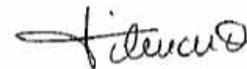
INFLUENCE DES KM PARCOURUS			
On teste l'hypothèse nulle H0			
Moyenne parcours Fis - moyenne parcours Non Fis=0			
	Effectif	Moy parcours	Ecart type parcours
Fissuration	9	28746	4035
Non fissuration	21	21755	6278
La différence des moyennes suit une loi normale de moyenne nulle et d'écart type 1920			
Intervalle d'acceptation de H0 au seuil de 5%			-3763 3763
Intervalle d'acceptation de H0 au seuil de 1%			-4953 4953
Différence observée		6991	
Elle est située à l'extérieur de l'intervalle et donc significative.			

Le test statistique s'appuie sur les propriétés de la différence des parcours annuels moyens des deux échantillons constitués d'une part des wagons avec fissures et d'autre part des wagons sans fissures, qui suit une loi normale de moyenne nulle (dans l'hypothèse d'égalité des kilométrages des populations des wagons avec et sans fissures) et dont on peut calculer l'écart type².

Aux seuils de confiance de 5% et de 1%³, le parcours annuel moyen des wagons avec fissures est significativement différent de celui des wagons sans fissures. Cette différence constatée de 6991km ne peut être attribuée aux seules fluctuations d'échantillonnage ;

La différence dans les kilométrages annuels est statistiquement significative.

Le 31 mars 2011



² Racine (écart type échantillon 1 **2 /n1 + écart type échantillon 2 **2/n2)

³ En toute rigueur, les effectifs des deux échantillons comparés devraient être supérieurs à 30.

Nota : L'étude ci-dessus a été réalisée à partir des chiffres disponibles en mars 2011. Les écarts avec les chiffres définitifs sont faibles et ne remettent pas en cause les conclusions de l'étude.

Annexe 7 : Historiques de maintenance de certains wagons présentant des roues fissurées

- Wagon 33 87 792 9543-9 déraillé à Neufchâteau avec roue brisée sur essieu 543205
 - 1995 : Construction AFR avec essieux n° 543205, 543208, 543203, 543204 ;
 - 2000 : Rev S aux ateliers de Badan ; pas d'échange d'essieux ;
 - 2002 : Rev S aux ateliers de Badan ; pas d'échange d'essieux ;
 - 2006 : Rev Générale chez Lormafer ; pas d'échange d'essieux.

- Wagon 37 80 784 6365-0 réformé au Havre avec essieu 543025 fissuré
 - 1995 : Construction AFR avec les essieux n° 543097, 543102, 543123, 543124 ;
 - 1999 : Rev S aux ateliers de Badan ; pas d'échange d'essieux ;
 - 2003 : Rev S aux ateliers de Salindres ; pas d'échange d'essieux ;
 - 2007 : Rev Générale aux ateliers de Badan ; remplacement des essieux par les essieux n° 514967, 514965, 514994, 543025 révisés le 1^{er} juillet 2007 par ULC (Lormafer).

- Wagon 37 80 784 6371-8 réformé à Thionville avec essieu 543075 fissuré
 - 1995 : Construction AFR avec les essieux n° 543075, 543076, 543125, 543072 ;
 - 1999 : Rev S aux ateliers de Badan ; pas d'échange d'essieux ;
 - 2003 : Rev S aux ateliers de Salindres ; pas d'échange d'essieux ;
 - 2008 : Rev Générale aux ateliers de Badan ; pas d'échange d'essieux.

- Wagon 37 80 784 6370-0 réformé à Mannheim avec essieu 543052 fissuré
 - 1995 : Construction AFR avec les essieux n° 543055, 543052, 543081, 543080 ;
 - 1999 : Rev S aux ateliers de Badan ; pas d'échange d'essieux ;
 - 2003 : Rev S aux ateliers de Salindres ; pas d'échange d'essieux ;
 - 2007 : Rev Générale aux ateliers de Badan ; essieux 543055 et 543080 déposés pour déformation totale supérieure à 0,3 mm ; remplacés par les essieux 515000 et 515041.

Ressources, territoires, habitats et logement
Énergies et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

**Présent
pour
l'avenir**

BEA-TT - Bureau d'enquêtes sur les accidents de transport terrestre

Tour Voltaire 92055 - La Défense cedex
Tél. : 33 (0)1 40 81 21 83 - Fax : 33 (0)1 40 81 21 50
cgpc.beatt@developpement-durable.gouv.fr
www.bea-tt.developpement-durable.gouv.fr