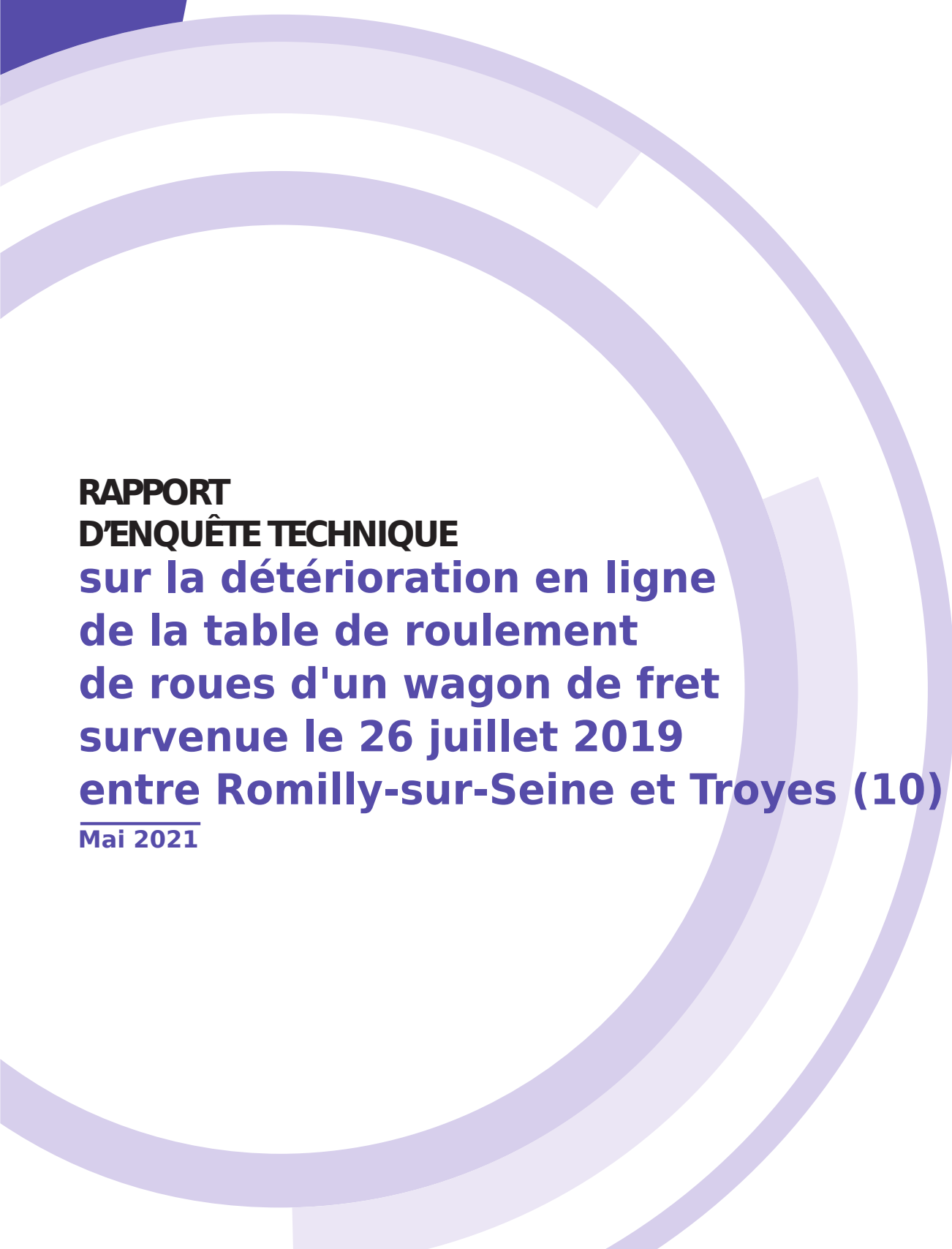


A large, decorative graphic consisting of several concentric, overlapping circles in shades of light purple and lavender, centered on the page. The circles are of varying thicknesses and are partially cut off by the edges of the page.

RAPPORT D'ENQUÊTE TECHNIQUE sur la détérioration en ligne de la table de roulement de roues d'un wagon de fret survenue le 26 juillet 2019 entre Romilly-sur-Seine et Troyes (10)

Mai 2021

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

Affaire n° BEATT-2019-08

**Rapport d'enquête technique
sur la détérioration en ligne
de la table de roulement de roues d'un wagon de fret,
survenue le 26 juillet 2019,
entre Romilly-sur-Seine et Troyes (10)**

Bordereau documentaire

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

Titre du document : Rapport d'enquête technique sur la détérioration en ligne de la table de roulement de roues d'un wagon de fret, survenue le 26 juillet 2019, entre Romilly-sur-Seine et Troyes (10)

N° ISRN : EQ-BEAT--21-4--FR

Proposition de mots-clés : incident de frein, semelles composites

Avertissement

L'enquête technique faisant l'objet du présent rapport est réalisée dans le cadre des articles L. 1621-2 à 1622-2 et R. 1621-1 à 1621-26 du Code des transports relatifs, notamment, aux enquêtes techniques après accident ou incident de transport terrestre.

Cette enquête a pour seul objet de prévenir de futurs accidents. Sans préjudice, le cas échéant, de l'enquête judiciaire qui peut être ouverte, elle consiste à collecter et analyser les informations utiles, à déterminer les circonstances et les causes certaines ou possibles de l'évènement, de l'accident ou de l'incident et, s'il y a lieu, à établir des recommandations de sécurité. 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.....	9
RÉSUMÉ.....	11
1 - CONSTATS IMMÉDIATS ET ENGAGEMENT DE L'ENQUÊTE.....	13
1.1 - Les circonstances de l'accident.....	13
1.2 - Le bilan matériel.....	14
1.3 - L'engagement et l'organisation de l'enquête.....	15
2 - CONTEXTE DE L'ACCIDENT.....	17
2.1 - La ligne ferroviaire emprunté par le train accidenté.....	17
2.2 - Le train accidenté.....	18
2.3 - Le wagon accidenté.....	19
2.4 - Les entreprises ayant concouru à la mission de transport.....	20
2.4.1 - Le commanditaire du transport Saipol.....	20
2.4.2 - L'entreprise ferroviaire Europorte.....	20
2.4.3 - Le loueur du wagon Forwardis.....	20
2.4.4 - Le détenteur du wagon VTG.....	20
2.4.5 - Synthèse des intervenants.....	21
2.5 - Notions sur le système de freinage des wagons.....	22
2.6 - Les incidents de frein.....	24
2.7 - Les conditions météorologiques.....	27
3 - COMPTE RENDU DES INVESTIGATIONS EFFECTUÉES.....	29
3.1 - Le résumé des témoignages.....	29
3.1.1 - Le conducteur du train 60815.....	29
3.1.2 - L'agent-circulation de Troyes.....	30
3.1.3 - L'agent au sol de Nogent-sur-Seine.....	31
3.1.4 - L'agent-circulation de Romilly-sur-Seine.....	31
3.1.5 - Commentaire sur les opérations au départ des agents d'Europorte.....	32
3.1.6 - Commentaire sur l'opération de surveillance des trains en marche.....	32
3.2 - L'analyse de l'enregistrement des paramètres de conduite.....	33
3.3 - L'analyse de l'enregistrement du détecteur de « boîte chaude ».....	34
3.4 - Les dommages à l'infrastructure.....	35
3.5 - Les dommages au convoi.....	37
3.5.1 - Les dommages au bogie 2 du wagon avarié.....	38
3.5.2 - Les autres constats sur le wagon avarié.....	41
3.6 - L'expertise du système de freinage.....	42
3.6.1 - Le test du distributeur.....	42
3.6.2 - L'expertise des autres équipements de freinage.....	43
3.6.3 - Conclusions sur l'anomalie de serrage des freins.....	44

3.7 - L'historique d'utilisation et de maintenance du wagon.....	46
3.8 - Conclusion intermédiaire sur la cause de l'accident.....	48
3.9 - La tenue des semelles de frein de type « LL » au frein serré.....	50
3.10 - Les incidents de frein aux conséquences comparables.....	52
3.11 - Les ruptures de roue en lien avec l'emploi de semelles LL.....	54
4 - ANALYSE DU DÉROULEMENT DE L'ACCIDENT.....	55
5 - ANALYSE DES CAUSES ET FACTEURS ASSOCIÉS, ORIENTATIONS PRÉVENTIVES.....	57
5.1 - L'arbre des causes.....	57
5.2 - Les causes de l'accident.....	58
5.3 - Le management de la sécurité par l'entité en charge de la maintenance.....	58
5.4 - Le retour d'expérience versus l'homologation des semelles LL.....	59
6 - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	63
ANNEXES.....	65
Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête.....	67

Glossaire

- **AC** : Agent-Circulation
- **ANOT** : Avis d'ANOMalie Train
- **ATESS** : Acquisition et Traitement des Evénements de Sécurité en Statique
- **BNF** : Bureau de Normalisation Ferroviaire
- **CG** : Conduite Générale
- **COGC** : Centre Opérationnel de Gestion des Circulations
- **CUU** : Contrat Uniforme d'Utilisation des wagons
- **DBC** : Détecteur de Boite Chaude
- **DFS** : Détecteur de Frein Serré
- **ECE / ECM** : Entité en Charge de l'Entretien que l'on désigne aussi Entité en Charge de la Maintenance
- **EF** : Entreprise Ferroviaire
- **EPSF** : Etablissement Public de Sécurité Ferroviaire
- **ERA** : European union Agency for Railways, en français Agence de l'Union européenne pour les chemins de fer
- **GI** : Gestionnaire d'Infrastructure
- **GSM-R** : Global System for Mobile communication – Railway, en français système global de communication sans fil pour le ferroviaire
- **JNS** : Joint Network Secretariat, en français groupe de travail en commun du réseau
- **PN** : Passage à Niveau
- **PK** : Point Kilométrique
- **RAS** : Rien À Signaler, signifiant « pas d'anomalie constatée »
- **RAT** : Reconnaissance à l'Aptitude au Transport
- **SDIS** : Service Départemental d'Incendie et de Secours
- **STI** : Spécification Technique d'Interopérabilité
- **UIC** : Union Internationale des Chemins de fer

Résumé

Vendredi 26 juillet 2019 à 16 h 35, le train fret 60815 de l'entreprise ferroviaire Europorte, constitué de 20 wagons-citernes chargés d'huile végétale et circulant à l'approche de Troyes dans le département de l'Aube, déclenche une alarme danger « boîte chaude » et « frein serré » qui conduit à son arrêt par l'agent en charge des circulations.

Le conducteur, lors de la visite du train, constate que deux roues d'un même essieu du 4^e wagon sont fortement détériorées. Les tables de roulement ont été creusées de profonds sillons et semblent avoir partiellement fondu. Plusieurs pièces de timonerie du système de freinage sont absentes. Le gestionnaire d'infrastructure est parallèlement avisé de la non-ouverture de plusieurs passages à niveau et du départ de cinq feux qui se sont produits sur le parcours du train, l'un d'eux se propageant à une habitation riveraine de la voie. Par la suite, la majorité des pièces manquantes du wagon sont retrouvées en voie et de nombreuses dégradations de voie sont observées sur le parcours du train.

Les dommages de cet accident présentent un caractère inhabituel et non aisément explicable. Parmi maintes défaillances envisagées, l'enquête technique a identifié que la cause origine de la détérioration des tables de roulement des roues serait un incident de non-desserrage des freins affectant le 4^e wagon. Le maintien en serrage a très plausiblement pour origine un dysfonctionnement intempestif du distributeur de frein du wagon. Celui-ci aurait continué à délivrer la pression de serrage aux freins du wagon à la suite de l'essai de fonctionnement du freinage mené par le conducteur en ligne. Il n'est pas exclu qu'un autre scénario se soit produit mais celui-ci n'a pu être mis à jour en cohérence avec les dommages observés.

La détection de frein serré opérée sur la ligne a permis d'arrêter le train à temps et d'éviter un accident plus grave comme un déraillement. En revanche, la surveillance des trains en marche effectuée sur le parcours du train n'a pas détecté l'avarie.

Un incident de frein est un type d'incident fréquent sur le réseau. Dans le cas présent, l'enquête identifie que les conséquences ont été potentiellement aggravées par une interaction défavorable entre les semelles de frein et les roues du wagon. Les semelles sont en matériau composite à faible coefficient de frottement (type LL) et, à haute température, leur interaction avec les roues n'aurait pas eu le comportement escompté tel que vérifié lors de leur homologation. Cette interaction défavorable a été observée dans d'autres incidents.

Deux facteurs ont été identifiés comme ayant contribué à l'accident :

- le wagon accidenté avait connu des incidents répétitifs de non-desserrage intempestif par le passé, annonciateurs du dysfonctionnement du distributeur, sans que l'entité en charge de l'entretien ait instruit cette série d'incidents comme précurseur d'un évènement plus grave ;
- l'interaction défavorable sous frein bloqué entre des semelles composites LL et les roues, observée dans d'autres incidents, a été évoquée en groupe de travail au niveau européen, sans que les travaux ne permettent de conduire à des résultats et mesures préventives concrètes.

Le BEA-TT émet quatre recommandations et deux invitations portant sur l'amélioration du système de gestion des avaries de l'entité en charge de l'entretien, sur l'exploitation du retour d'expérience des événements comparables et sur la vérification des critères d'homologation des semelles.

1 - Constats immédiats et engagement de l'enquête

1.1 - Les circonstances de l'accident

Vendredi 26 juillet 2019, l'entreprise ferroviaire Europorte réalise un transport de diester à base d'huile végétale au départ des établissements Saipol embranchés à Nogent-sur-Seine, et à destination de Gand en Belgique.

À 16 h 02, en première étape de ce transport, le train 60815 quitte la gare de Nogent-sur-Seine, situé au point kilométrique (PK) 110,349 de la ligne reliant Paris-Est à Mulhouse-Ville. Il prend la voie 1 en direction du triage de Troyes situé à Barberey-Saint-Sulpice au PK 160,775, 50 kilomètres plus loin.



Figure 1 : vue d'ensemble du parcours

À 16 h 35, le détecteur de « boîte chaude » et de « frein serré » (DBC/DFS), situé sur la voie à Payns au PK 154,423, déclenche une alarme danger au passage du train. L'agent-circulation au poste d'aiguillage de Troyes, qui reçoit cette alarme, provoque l'arrêt du train par le conducteur en « fermant » le signal C3 situé avant le triage de Barberey-Saint-Sulpice. Il interrompt également toutes les autres circulations sur la ligne entre Romilly-sur-Seine et Troyes.

Une fois à l'arrêt, le conducteur du train 60815 visite son train et constate que le bogie avant du 4^e wagon est très incliné vers l'arrière.



Figure 2 : le bogie avarié à l'avant du 4^e wagon

Les deux roues de l'essieu arrière du bogie sont fortement détériorées. Elles ont été creusées et semblent avoir partiellement fondu, s'enfonçant sur le rail.

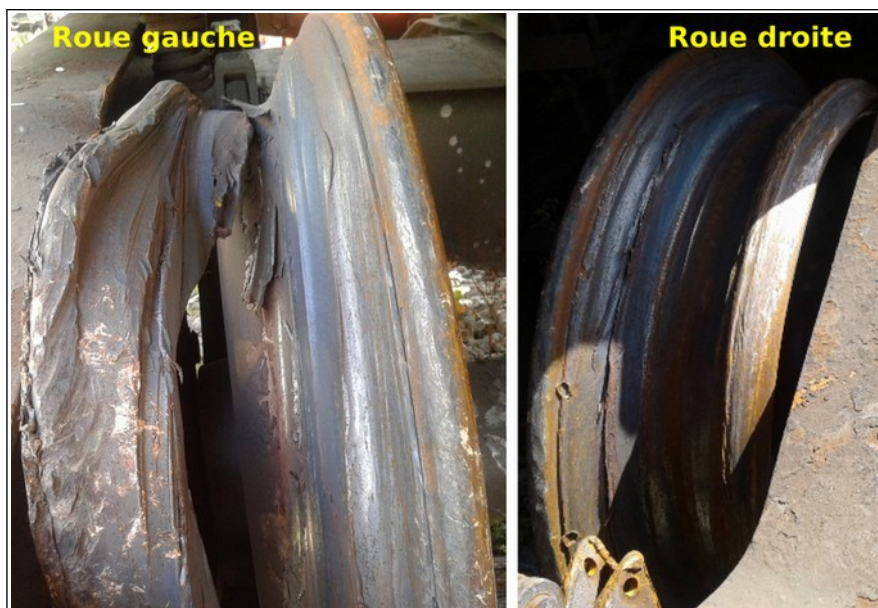


Figure 3 : état des roues endommagées

1.2 - Le bilan matériel

Les dégâts de cet accident sont uniquement matériels.

Cinq départs de feu ont été activés lors du passage du train entre les PK 136 et 154, sur les communes de Châtres, Vallant-Saint-Georges, Saint-Mesmin, Savières et Payns. Une habitation située à Savières en bord de voie, inoccupée lors du passage du train, est partiellement incendiée.

De nombreuses dégradations de l'infrastructure ferroviaire sont constatées. Celles-ci portent sur le poinçonnement des rails de la voie 1 (vers Troyes), la détérioration de platelages de plusieurs passages à niveau, ainsi que la destruction d'installations de signalisation en voie et de chemins de câbles latéraux pour partie brûlés.

Les organes de freinage du wagon et les bogies sont partiellement détruits. Plusieurs pièces du wagon sont tombées sur la voie. Le wagon, bien que présentant une dégradation avancée, est malgré tout resté guidé par les rails et n'a pas déraillé.



Figure 4 : incendies le long de la voie

Le wagon a été évacué sur lorry au faisceau de voies de Barberey-Saint-Sulpice le lendemain, 27 juillet 2019. Les réparations des installations des passages à niveau, détériorées par le passage du train, ont été faites cette même journée. La circulation sur la voie 1 empruntée par le train a repris à partir du 28 juillet avec une limitation de la vitesse sur cinq kilomètres jusqu'à réparation complète de la voie.

1.3 - L'engagement et l'organisation de l'enquête

Au vu des circonstances de cet accident, le directeur du bureau d'enquêtes sur les accidents de transport terrestre a ouvert, le 2 août 2019, une enquête technique en application des articles L. 1621-2 à L. 1622-2 du Code des transports.

Les enquêteurs du BEA-TT se sont rendus sur le site d'entreposage du wagon accidenté les 11 septembre et 28 novembre 2019. Ils ont rencontré les représentants des différentes entreprises en charge du transport. Ils ont participé à des tournées de surveillance de la voie afin de collecter les pièces perdues par le wagon. Ils ont visité, le 14 novembre 2019, le dernier atelier de l'entité en charge de l'entretien (ECE) ayant entretenu le wagon. Ils ont eu accès au dossier de l'enquête préliminaire diligentée par le parquet de Troyes. Ils ont participé aux investigations conduites par l'expert judiciaire désigné dans le cadre d'une procédure instruite par le tribunal de commerce de Paris, investigations qui se sont poursuivies jusqu'en 2021. Ils se sont également entretenus avec l'Établissement public de sécurité ferroviaire (EPSF) en charge des autorisations et du contrôle des opérateurs ferroviaires.

À la suite de cet événement, d'autres incidents présentant des circonstances similaires se sont produits sur le réseau. Les enquêteurs du BEA-TT ont interrogé les entreprises ferroviaires en charge de ces transports et se sont rendus à deux reprises sur les sites d'entreposage des wagons présentant des détériorations similaires, à Sibelin (Rhône) et à Port-la-Nouvelle (Aude).

Les enquêteurs ont eu accès à toutes les pièces et documents demandés pour leurs analyses.

2 - Contexte de l'accident

2.1 - La ligne ferroviaire emprunté par le train accidenté

La ligne ferroviaire empruntée par le train 60815 est la ligne reliant Paris-Est à Mulhouse-Ville, numérotée 001 000. Cette ligne a été ouverte en 1858. Elle est à double voie et, hormis quelques tronçons électrifiés, elle est dans l'ensemble à traction thermique.

Sur le tronçon emprunté par le train, la signalisation est à block automatique lumineux. Les liaisons radio entre les opérateurs au sol et les conducteurs de train s'effectuent par GSM-R (global system for mobile communication – railway).

La ligne est régulée entre Paris-Est et Romilly-sur-Seine par le centre opérationnel de gestion des circulations (COGC) de Paris-Est, et, entre Romilly-sur-Seine et Troyes par le celui de Lorraine-Champagne-Ardenne.

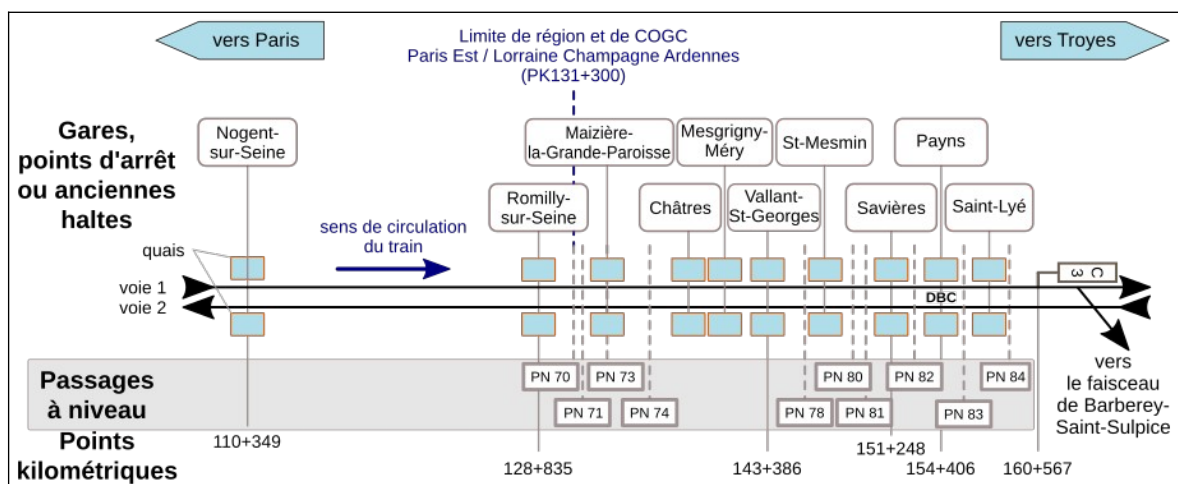
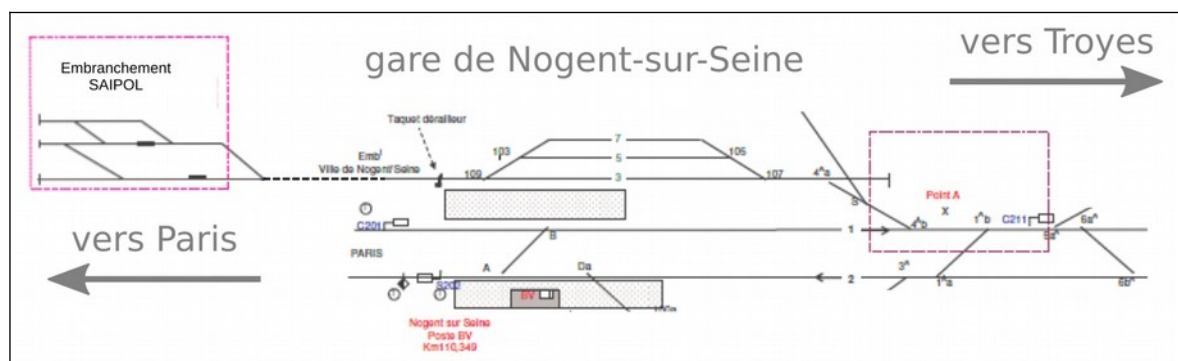


Figure 5 : schéma simplifié de la ligne entre Nogent-sur-Seine et Troyes

Les installations en gare de Nogent-sur-Seine permettent de desservir plusieurs embranchements dont une centrale EDF, les établissements Soufflet et l'entreprise Saipol d'où provenait le chargement du train 60815 accidenté. L'installation terminale de l'embranché Saipol est située sur la commune du Mériot. Une voie de deux kilomètres relie la gare de Nogent-sur-Seine au site de Saipol.



2.2 - Le train accidenté

Le train fret 60815 était tracté par une locomotive diesel-électrique G 4006, de modèle Euro 4000 et de fabrication Vossloh. Cette locomotive est de forte puissance et comprend six essieux.

Le convoi tracté comprenait 20 wagons-citernes, avec une longueur totale de 357 m et une masse de 1 905 tonnes. La masse totale de la marchandise convoyée était de 1 294 tonnes représentant un volume d'huile d'environ 1 465 m³.

Le train avait pour origine Mériot dans l'Aube, près de Nogent-sur-Seine et pour destination Gand en Belgique.



Figure 7 : modèle de locomotive VOSSLOH Euro 4000

Le wagon accidenté était le 4^e du convoi. Son immatriculation est **33 81 7837 835-6**.

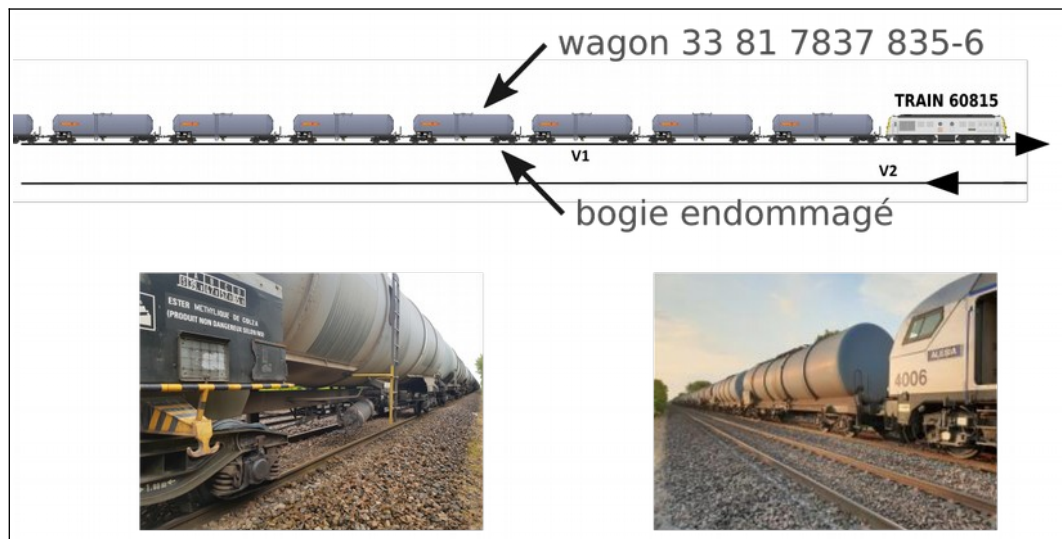


Figure 8 : schéma du convoi

2.3 - Le wagon accidenté

Le wagon 33 81 7837 835-6 est de type Zans – modèle 1993, à deux bogies de deux essieux. Il est la propriété de l'entreprise VTG que nous présenterons plus loin.

Ce wagon-citerne a une contenance de 95 m³. Son poids à vide est de 24,2 tonnes et son poids maximal chargé est de 90 tonnes. Le wagon repose sur deux bogies à deux essieux. La longueur hors tout est 16,7 m. La pleine charge par essieu est de 22,5 tonnes, soit la valeur maximale autorisée sur le réseau ferroviaire national, appelée « charge D ».

Lors de l'accident, la citerne était chargée de 74,518 m³ de biodiesel à base d'huile végétale, représentant un poids de 65,8 tonnes, soit un poids total du wagon chargé de 90 tonnes égal à la charge maximale admissible du wagon. Ce wagon était le plus chargé du convoi.

Le wagon a été mis en service le 20 décembre 2004. Il roulait peu ayant parcouru environ 25 000 km depuis le début de l'année 2016 selon les déclarations du détenteur, dont 10 000 km depuis sa dernière réparation réalisée en atelier en novembre 2018.



Figure 9 : le wagon-citerne accidenté 33 81 7837 835-6

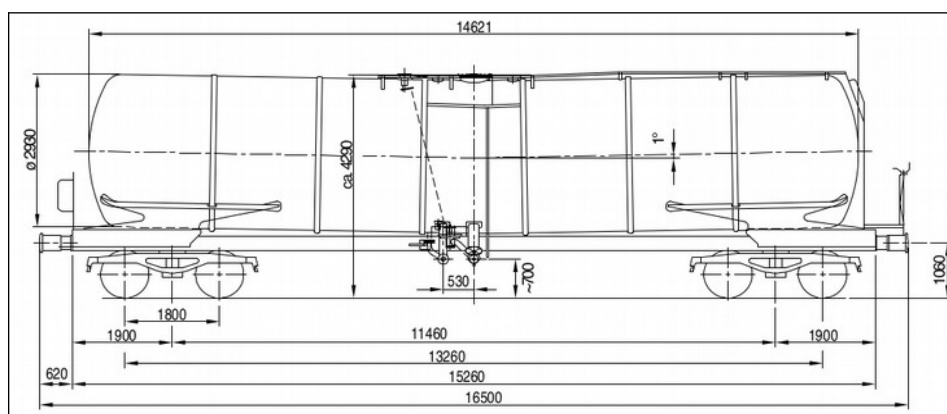


Figure 10 : élévation du wagon-citerne (les cotes sont indicatives)

Le produit transporté était de l'ester méthylique d'huile végétale de marque « diester ». Il s'agit d'un biocarburant à base de colza. Ce produit n'est pas considéré comme une matière dangereuse par le règlement concernant le transport international ferroviaire de marchandises dangereuses (RID). Son point d'éclair ou point d'inflammabilité est de 150 °C, il n'est ainsi pas inflammable au contact de l'air ambiant.

2.4 - Les entreprises ayant concouru à la mission de transport

L'organisation de la mission de transport met en jeu plusieurs acteurs qui sont présentés ci-après.

2.4.1 - *Le commanditaire du transport Saipol*

La société **Saipol** (Société Agro-Industrielle de Patrimoine Oléagineux) est une entreprise agroalimentaire française spécialisée dans la transformation de graines oléagineuses. Elle est le client du transport et l'a contractualisé avec l'entreprise ferroviaire Europorte par un contrat du 25 juillet 2016. Saipol a également loué les wagons-citernes de transport auprès de la société Forwardis. Le contrat de location était en cours de signature à la date de l'accident et les conditions de mise à disposition du wagon étaient à cette date tacitement reconnues par les parties.

Le chargement d'huile était au départ du site de production de Saipol situé à Mériot dans l'Aube. Saipol y fabrique du biodiesel de marque « diester » (ester méthylique à base de colza). Le chargement était à destination du terminal « Sea-Tank » à Gand en Belgique.

2.4.2 - *L'entreprise ferroviaire Europorte*

La société **Europorte** est une entreprise ferroviaire française, filiale du groupe Getlink autrefois Eurotunnel. Elle est titulaire d'une licence d'entreprise ferroviaire (EF) pour le transport de marchandises et d'un certificat de sécurité délivré par l'Établissement public de sécurité ferroviaire (EPSF) le 7 octobre 2016 pour une durée de 5 ans.

Pour effectuer le transport, Europorte a mobilisé, le 26 juillet 2019, un engin de traction, un conducteur certifié et un agent de manœuvre. Une antenne locale d'Europorte est située à La Chapelle-Saint-Luc près de Troyes. Europorte a aussi pris en charge la commande des sillons permettant de faire circuler le train sur les réseaux français et belge.

2.4.3 - *Le loueur du wagon Forwardis*

La société **Forwardis** est une filiale du groupe SNCF dont l'activité principale est d'être commissionnaire de transport, c'est-à-dire qu'elle organise le transport de marchandises de bout-en-bout, incluant les prestations de prêt de wagons, de commande d'entreprise ferroviaire et de commande des sillons. Dans le cas présent, Forwardis n'est intervenu que pour la simple location des wagons à Saipol.

Forwardis loue un parc dédié de 66 wagons-citernes à Saipol. Forwardis n'est pas propriétaire des wagons, elle les a loué pour partie à la société Ermewa (filiale du groupe SNCF), et pour partie à VTG Rail Europe France. Le wagon-citerne accidenté était loué à VTG qui en était le propriétaire.

2.4.4 - *Le détenteur du wagon VTG*

VTG est un groupe allemand de logistique ferroviaire et de location de wagons. Avec 94 000 wagons de fret, le groupe possède la plus grande flotte de wagons privés d'Europe. Le nom VTG provient de l'allemand « Vereinigte Tanklager und Transportmittel Gesellschaft », qui signifie en français « entreprise de stockage et de transport réunis ».

Le « **détenteur** » est défini dans le droit européen du transport ferroviaire comme étant l'entité propriétaire du wagon qui exploite le wagon comme moyen de transport et qui est inscrite en tant que tel au registre officiel des véhicules. Le détenteur déclaré du wagon

est VTG Schweiz GmbH, la filiale suisse du groupe allemand. Le wagon était loué par Forwardis à VTG Rail Europe France, établissement français de VTG Rail Europe GmbH. L'« **entité en charge de l'entretien** » (ECE) est VTG Rail Europe GmbH, société de droit allemand. L'ECE encadre la maintenance du wagon, et celle-ci peut être externalisée pour partie sur d'autres sociétés.

Le contrat de location entre VTG Rail Europe France et Forwardis a été signé le 30 septembre 2016. Il est d'une durée de un an, renouvelable par tacite reconduction ce qui a été le cas. La location porte sur 30 wagons-citernes, dont celui en cause dans l'accident, et sur 18 wagons additionnels pour dépannage.

Les sociétés du même groupe VTG sont regroupées dans le présent rapport sous l'unique dénomination VTG.

2.4.5 - Synthèse des intervenants

Le schéma ci-après résume les différents intervenants ayant contribué à la réalisation du transport par le train 60815, ainsi que les liens contractuels qui les relient.

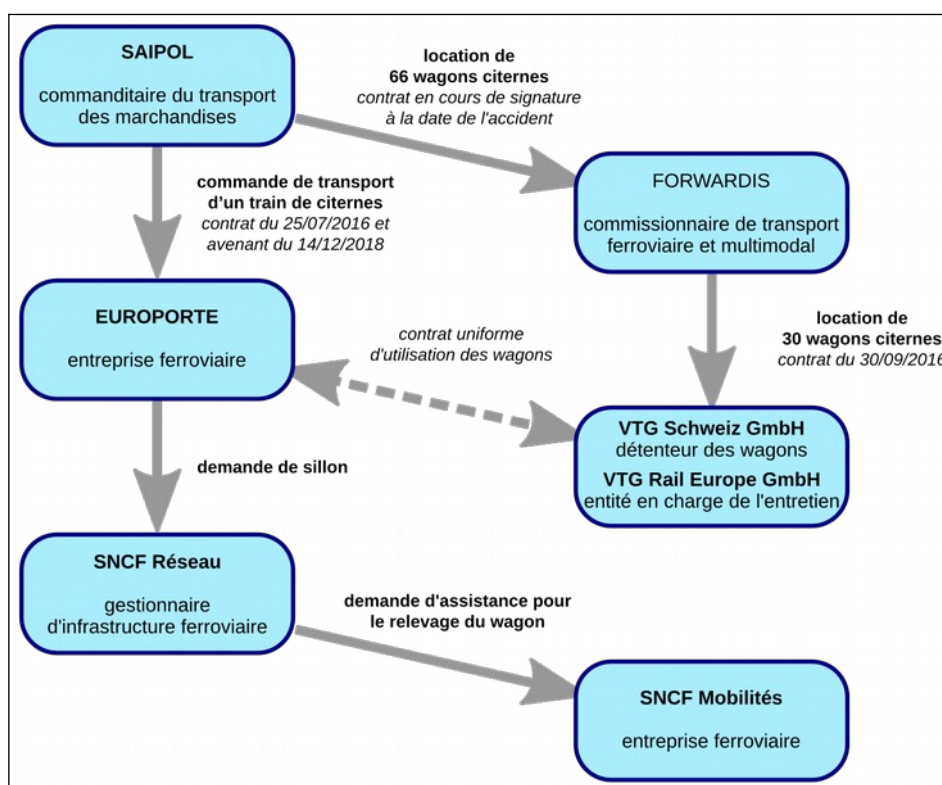


Figure 11 : les intervenants du transport

Le détenteur de wagons et l'entreprise ferroviaire de transport sont liés par le **contrat uniforme d'utilisation des wagons (CUU)**. Le CUU est une convention internationale, de droit privé, qui énonce les droits et obligations mutuels des détenteurs de wagons et des entreprises ferroviaires lors de l'utilisation de wagons comme moyen de transport en Europe et dans certains pays au-delà. Établi depuis 2006 sous l'égide de l'Organisation intergouvernementale pour les transports internationaux ferroviaires (OTIF) dont le siège est à Berne en Suisse, le CUU regroupe aujourd'hui 600 signataires dans 20 pays, dont l'entreprise ferroviaire Europorte et le détenteur VTG.

2.5 - Notions sur le système de freinage des wagons

Le freinage d'un train de fret s'effectue globalement sur l'ensemble des wagons. Nous donnons ci-après quelques rudiments sur le principe de fonctionnement pour la bonne compréhension du rapport.

Une **conduite générale** pour le freinage parcourt l'intégralité du train. Elle est alimentée en air comprimé par la locomotive et permet, selon son niveau de pression, de commander graduellement le freinage ou le desserrage¹ de chaque wagon. Une mise en pression commande un desserrage, une baisse de pression commande un serrage. En cas de coupure du train en deux, la dépression générée dans la conduite freine ainsi l'ensemble des parties du train. A contrario, ce système en « commande inversée » peut déclencher des freinages intempestifs de wagon en cas d'anomalie de fonctionnement.

Chaque wagon est équipé d'un **réservoir auxiliaire** d'air comprimé, alimenté par la conduite générale et d'un **cylindre de frein**, qui est le vérin pneumatique délivrant la force de freinage au wagon.

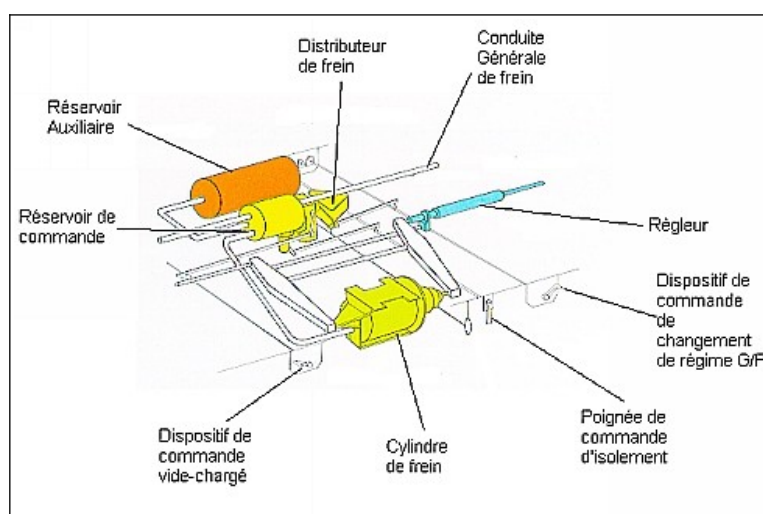


Figure 12 : les équipements du frein de wagon (document Faiveley Transport)

Le **distributeur** traduit la pression de la conduite générale en commande pneumatique de freinage au cylindre de frein, selon la commande inversée : lorsque la conduite générale est en pression, le distributeur alimente en air le réservoir auxiliaire et actionne la vidange du cylindre de frein ce qui produit un desserrage ; lorsque la pression de la conduite baisse, le distributeur transmet la pression du réservoir auxiliaire au cylindre de frein et provoque le serrage (voir figure suivante).

Le réglage de la force de freinage s'effectue en fonction de la charge du wagon par le biais d'une « **valve de pesée** » qui est montée dans la suspension primaire du wagon et qui modifie la pression délivrée au cylindre de frein (le freinage est léger pour les wagons vides et fort pour les wagons chargés). La pression au cylindre de frein s'établit aussi selon une durée qui dépend du régime de freinage du wagon, réglé par le **levier de changement de régime**, soit en « voyageurs » (délai de mise en pression court), soit « marchandises » (délai long, de manière à éviter un brusque freinage des véhicules de tête avant les véhicules de queue). Un robinet, installé entre la conduite générale et le distributeur, permet aussi l'**isolement** du frein du wagon en cas d'avarie, tout en maintenant la continuité de la conduite générale sur les autres véhicules.

1 La pression normale pour un desserrage est de 5 bars.

Lorsque le train roule, la conduite générale est alimentée en air, ce qui met en pression, par l'intermédiaire des distributeurs, les réservoirs auxiliaires des wagons. Les semelles de frein sont alors desserrées (haut de la figure). Lorsque la conduite générale est vidée, la diminution de la pression entraîne, par l'action du distributeur, l'alimentation du cylindre de frein par le réservoir auxiliaire et ainsi le serrage des semelles sur les essieux (bas de la figure).

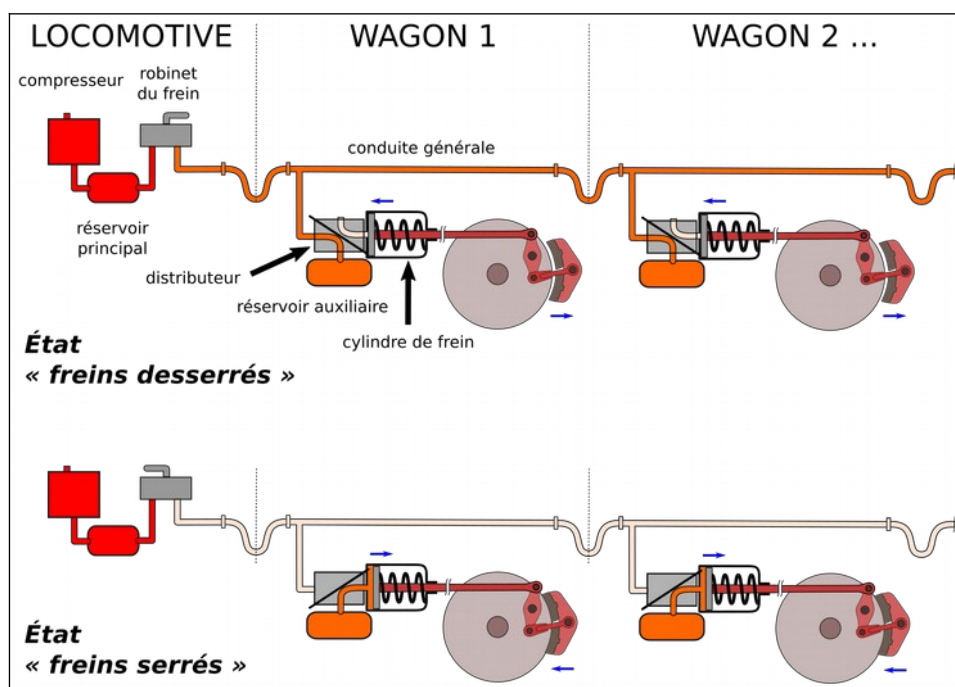


Figure 13 : les différents états du système de freinage

La force de freinage du cylindre de frein est transmise par un système de leviers et de bielles de **timonerie** aux **semelles de frein** sur les roues. Le **régleur**, incorporé à la timonerie, permet un rattrapage automatique du jeu produit par l'usure des semelles, au moyen d'un ingénieux système de double vis qui s'ajustent. Un **frein à main** permet de mettre manuellement en tension sans avoir d'action du cylindre de frein.

Les semelles s'appliquent sur les roues et exercent par frottement le couple nécessaire au freinage. Par un système de leviers équilibrés, la timonerie distribue à chaque semelle un effort de freinage quasi-identique pour une bonne répartition du freinage sur le wagon. Le wagon comporte deux bogies, chacun constitué de deux essieux avec deux roues freinées symétriquement. Il y a donc seize porte-semelles comprenant chacun deux semelles placées l'une au-dessus de l'autre dans la hauteur du porte-semelle, c'est-à-dire un total de **32 semelles** recevant chacune la même force de serrage.

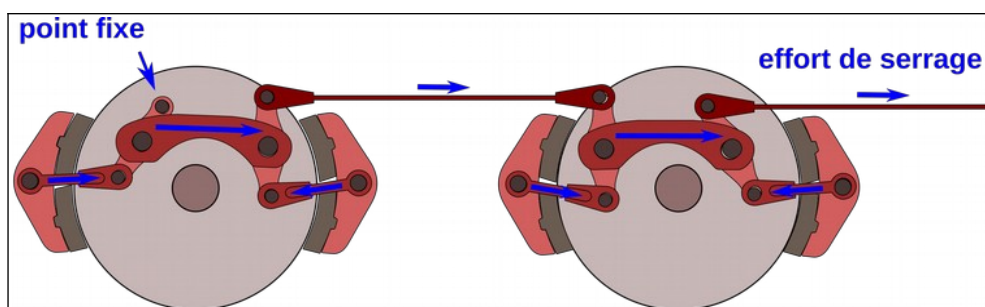


Figure 14 : schéma latéral de la timonerie sur un bogie

Historiquement le freinage des wagons s'est effectué au moyen de semelles de frein en fonte. Depuis les années 2000, des semelles en matériau composite, qui présentent de meilleures caractéristiques pour le freinage, remplacent progressivement la fonte. Les semelles composites « LL » ont un faible coefficient de frottement et une faible émission de bruit (LL signifie « Low friction – Low noise »). Ces semelles peuvent remplacer des semelles en fonte sur un wagon sans nécessité d'intervention sur le reste du système de freinage.

C'était le cas sur le wagon accidenté 33 81 7837 835-6 qui était équipé de semelles LL de marque Becorit et de modèle IB116 * UIC, installées en juin 2015.

2.6 - Les incidents de frein

Les incidents de frein ne sont pas des événements en sécurité ferroviaire rares, notamment pour les wagons de marchandises. Selon les données fournies par l'EPSF qui centralise une base des événements de sécurité sur le réseau, on dénombre en 2018 **320 incidents** de frein. Ces incidents ne sont toutefois pas d'une très grande criticité, leurs conséquences se limitant le plus souvent à des dommages superficiels aux roues et aux semelles de frein.

Les causes principales des incidents avec maintien du freinage sur un ou plusieurs wagons sont :

- l'erreur de conduite qui est possible avec les anciens robinets de mécanicien ;
- le dysfonctionnement du robinet de mécanicien qui est rare et se traduit par des incidents affectant plusieurs véhicules ;
- le défaut d'un robinet ou d'un raccord sur la conduite générale qui conduit à la mise à l'atmosphère partielle de la conduite et à une dépression de celle-ci ;
- l'actionnement du frein à main d'un véhicule qui provoque le serrage des freins sur ce seul véhicule ;
- le dysfonctionnement du distributeur de frein d'un véhicule.

Le distributeur est un équipement complexe comportant des pistons, des membranes, des joints, des clapets et des conduits pneumatiques dont certains sont de très petit diamètre. Cet équipement est susceptible d'avoir des pannes durables et reproductibles (membranes percées, joints fuyants...) ou des pannes fugitives. Les pannes fugitives peuvent être à l'origine d'incidents répétitifs à plusieurs semaines d'intervalle. La panne fugitive peut par exemple être due à la présence d'un corps étranger dans le distributeur².

L'incident de frein est néanmoins un événement redouté du système ferroviaire. Les conséquences peuvent être importantes, comme des déraillements qui peuvent aussi entraîner des risques pour les autres circulations et l'environnement. Ainsi, plusieurs mesures sont mises en place pour prévenir le risque. Elles sont sommairement récapitulées dans le tableau ci-après.

² Voir le rapport du BEA-TT concernant le déraillement d'un train de charbon le 29 juillet 2010 à Bully-Grenay consultable sur le site www.bea-tt.developpement-durable.gouv.fr

Événement redouté	Mesures de prévention (et procédures particulières)	
Incident de frein (maintien du serrage intempestif)	intégration des organes du frein dans la liste des équipements dits critiques	
	maintenance adaptée de ces organes	
	réalisation d'inspection et de tests au départ des trains	- reconnaissance à l'aptitude au transport - essai de frein statique - essai de roulage - essai de frein dynamique
	surveillance en marche	- surveillance au défilé - surveillance en ligne - surveillance des trains en marche - détection « boîte chaude » et « frein serré »

Les procédures particulières citées dans le tableau ci-dessus, et mises en œuvre en préparation et lors du transport, sont décrites succinctement ci-après :

Avant le départ

La reconnaissance à l'aptitude au transport (RAT)

Cette opération de sécurité consiste à examiner visuellement l'ensemble des wagons, châssis, chargement, à vérifier la conformité du train avec la lettre de voiture remise par le client (nombre de wagons, numéros, étiquetage) et à vérifier la charge brute et nette des wagons. Après la formation d'un train, l'agent visiteur au sol parcourt le train, wagon par wagon, et effectue les vérifications.

L'essai de frein statique

Cette opération a pour but de s'assurer avant le départ du bon fonctionnement du système de freinage du convoi. Le conducteur serre les freins. Un agent au sol parcourt la longueur du train et vérifie que toutes les semelles des freins sont appliquées. En queue, il vidange la conduite générale puis referme le robinet. Ensuite, il demande au conducteur de remettre en pression la conduite générale (ce qui a pour effet de desserrer les freins). Il revient alors vers la tête du train en s'assurant, à la vue ou par pression du pied, que toutes les semelles de frein sont bien décollées.

Lors du départ

L'essai de roulage

Cette opération est réalisée immédiatement après le départ. Le conducteur coupe la traction, il laisse rouler le train et vérifie qu'il n'y a pas de diminution anormale de la vitesse pour s'assurer du desserrage des freins.

La surveillance au défilé

Lors du départ, l'agent visiteur au sol assiste chaque fois que possible, au défilé du train dans le but de déceler les anomalies éventuelles en mouvement.

En ligne

L'essai de frein dynamique

Après le départ, le conducteur effectue un freinage de service à vitesse maximale puis il tractionne à nouveau. L'objectif est de vérifier la bonne réaction du train au freinage et à la ré-accélération.

La surveillance en ligne

Effectuée par le conducteur, l'opération consiste à observer l'ensemble du train, quand la visibilité est suffisante, régulièrement et particulièrement en courbe.

La surveillance des trains en marche (STEM)

L'opération incombe aux agents de certains postes d'aiguillage désignés pour cela. L'agent-circulation doit observer les trains en marche afin de détecter les défauts dangereux pour la sécurité ou ceux susceptibles de provoquer des avaries aux installations.

La détection « boîte chaude » (et « frein serré »)

La détection est effectuée par des détecteurs installés sur le parcours des trains. Ceux-ci contrôlent au passage des trains l'état thermique des boîtes d'essieux³ et aussi, pour les détecteurs de dernière génération, celui des jantes de roues pour repérer les freins maintenus anormalement serrés. Le détecteur transmet à un poste de surveillance, en général le poste d'aiguillage, les éléments permettant d'apprécier le degré de gravité lorsqu'une anomalie est détectée.

Un tel détecteur était situé sur le parcours du train accidenté, en gare de Payns (voir figure ci-dessous), et s'est mis en alarme au passage du train.

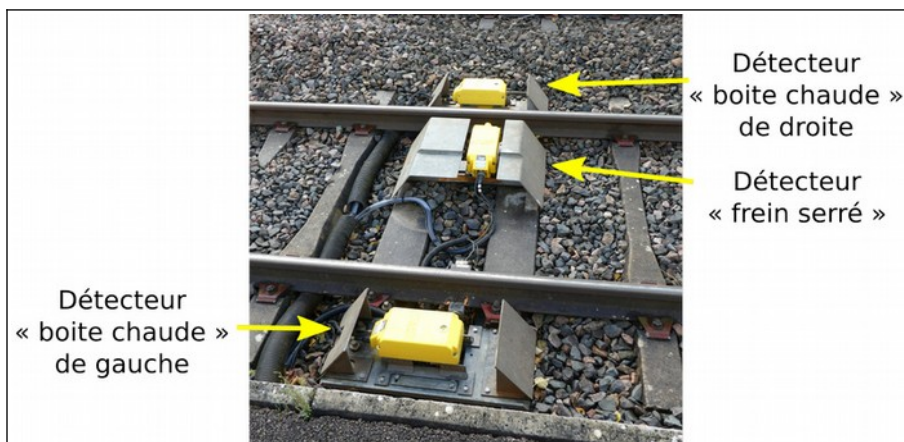


Figure 15 : détecteur de boîte chaude et de frein serré en gare de Payns

³ Les **boîtes d'essieux** contiennent les roulements qui assurent, sur un wagon, la liaison entre essieu et châssis.

2.7 - Les conditions météorologiques

Le 26 juillet 2019, le temps était chaud et sec sur le département de l'Aube.

La température était comprise entre 22 °C et 30 °C. Le taux de précipitation a oscillé entre 0 et 1 mm durant toute la semaine précédant le 26 juillet 2019. Ce taux est monté à 7 mm le 26 juillet, du fait d'un orage qui s'est déclenché dans la nuit du 26 au 27, soit après l'accident. Lors de l'accident, le sol était donc particulièrement sec et propice aux incendies.

La vitesse du vent a été faible, en moyenne de 5 km/h orientée Nord-Est.

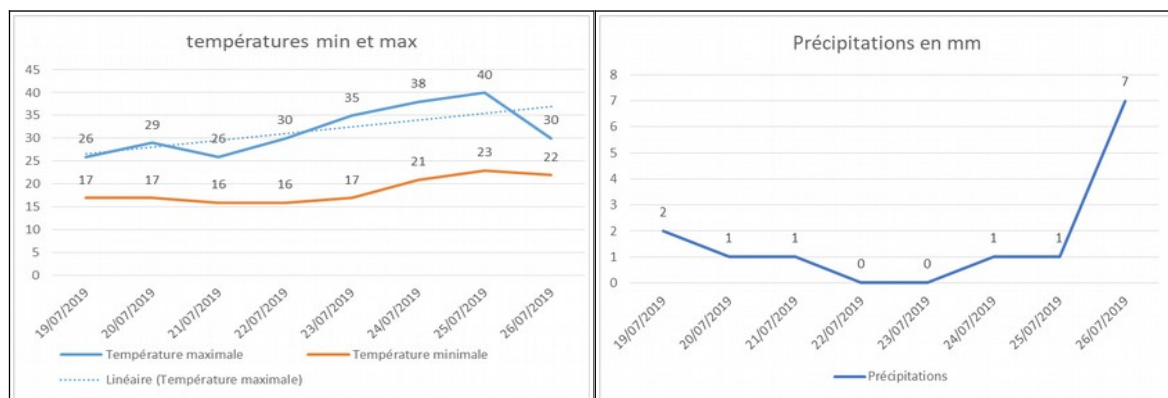


Figure 16 : courbe des températures et des précipitations à Romilly-sur-Seine entre le 19 et le 26 juillet 2019

3 - Compte rendu des investigations effectuées

3.1 - Le résumé des témoignages

Les résumés des témoignages présentés ci-dessous sont établis par les enquêteurs techniques sur la base des déclarations, orales ou écrites, dont ils ont eu connaissance. Ils ne retiennent que les éléments qui paraissent utiles pour éclairer la compréhension et l'analyse des événements et pour formuler des recommandations. Il peut exister des divergences entre les différents témoignages recueillis ou entre ceux-ci et des constats ou analyses présentés par ailleurs.

3.1.1 - *Le conducteur du train 60815*

Le conducteur travaille chez Europorte depuis 2010. Il a une expérience de conduite au sein de plusieurs entreprises ferroviaires depuis 1981.

Le 26 juillet 2019, il a pris son service à 12 h à Troyes et a conduit un premier train de citernes vides de Troyes à Nogent-sur-Seine. Il est arrivé vers 14 h en gare de Nogent-sur-Seine. Là, il a déplacé son engin moteur en queue du train puis il a refoulé les wagons vers l'embranchement de l'entreprise Saipol avec l'aide d'un agent au sol.

Après livraison des wagons, il a décroché l'engin moteur et il l'a replacé en tête du convoi de wagons-citernes chargés situé sur la voie adjacente, pour former le train 60815. Il a procédé à l'essai statique de frein avec l'agent au sol avant le départ. Il a été satisfaisant.

À la sortie de l'embranchement de Saipol, le profil de la voie est en montée. La masse du train étant importante (1 905 tonnes), il a effectué une accélération franche et le train a bien « décollé ». Ensuite, il a procédé à l'essai de roulage à savoir qu'il a coupé la traction et laissé rouler sans constater de diminution anormale de la vitesse.

En arrivant à Nogent-sur-Seine, il a arrêté le train avant l'aiguille d'accès à la voie de service 3. Puis il a avancé le train sur cette voie. Le démarrage comme l'arrêt ont été normaux. L'agent au sol lui a ensuite donné le départ en direction de la voie principale 1, vers Troyes. Le conducteur a alors réalisé l'essai de roulage réglementaire, consistant en une coupure de traction d'au moins 6 secondes à 10 km/h maximum au départ en ligne. Il n'a rien noté d'anormal. Puis, il a poursuivi sa montée en vitesse pour sortir de la gare sans dépasser 30 km/h, conformément à la procédure. L'agent au sol lui a confirmé par radio : « RAS au défilé, les lanternes de queue sont présentes, bonne route ».

Sorti de la gare, le conducteur est monté en vitesse pour atteindre les 100 km/h. Sur le début du parcours à l'occasion d'une courbe à gauche, il a regardé par la fenêtre du côté gauche pour observer le train qu'il voyait en totalité. Il n'a rien constaté d'anormal. À une vitesse proche de la vitesse maximale autorisée du train et avant la gare de Romilly-sur-Seine, il a procédé à l'essai de frein dynamique réglementaire. La décélération et l'accélération ont été normales. Il n'a par la suite rien constaté de particulier lors de la conduite, en particulier sur le manomètre du frein.

En arrivant à Troyes-Barberey, le signal lumineux présentait un « avertissement », signifiant que le signal suivant était fermé. Dès le franchissement de cet avertissement, l'agent-circulation de Troyes l'a appelé via la radio GSM-R et lui a dit que son train avait été détecté « boîte chaude ». Il devait dès lors s'arrêter tranquillement au signal d'entrée du triage de Barberey. Il a donc effectué un freinage de service qui s'est passé normalement. Arrêté au signal C3, dans l'attente de la réception d'une fiche ANOT (ANomalie Train) par l'agent-circulation selon la procédure, il a décidé d'effectuer la visite de son train. Avant de quitter la cabine de conduite, et conformément à la procédure, il a

commandé une surcharge de la pression dans la conduite générale (CG) à 5,4 bars. L'engin moteur n'est pas parvenu à équilibrer la pression, l'aiguille oscillant entre 5 et 5,4 bars, ce qui semblait signifier que le compresseur essayait de compenser une fuite.

Le conducteur a serré le frein direct de la locomotive puis il a longé le train, côté piste. Il a constaté sur le 4^e wagon de tête que les roues étaient complètement détruites, comme creusées. « Ce n'était ni chaud, ni rouge, et n'imposait pas de s'écarter ». Il entendait aussi une « petite » fuite sur un tuyau du réservoir auxiliaire du wagon. « Une fuite de la conduite générale aurait fait beaucoup plus de bruit ».

Le conducteur a rappelé l'agent-circulation de Troyes depuis le téléphone de voie et lui a signalé un déraillement, son train n'étant plus en capacité de rouler. Il a précisé qu'il n'y avait ni engagement de la voie contiguë, ni marchandise dangereuse à bord. Sont ensuite arrivés des agents de la SNCF, et les gendarmes qui ont procédé aux constatations et à un dépistage d'alcoolémie sur lui, négatif.

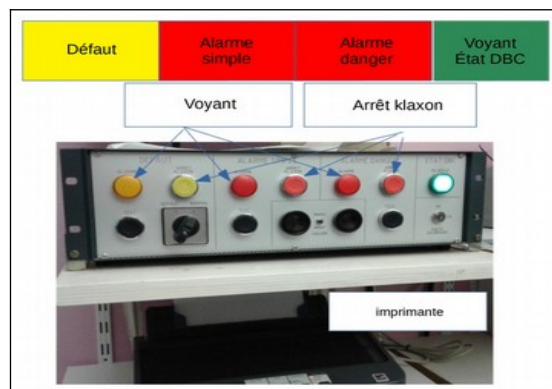
3.1.2 - L'agent-circulation de Troyes

L'agent-circulation du poste 1 de Troyes assurait le service de 13 h à 21 h. Durant tout cet été, en raison des travaux d'électrification de la ligne entre Paris et Troyes, le nombre de trains est réduit.

Vers 16 h 40, le train 60815 s'est d'abord annoncé par le retentissement d'un gong et l'allumage d'un voyant au tableau de contrôle optique du poste. Juste après le point d'annonce, le train passe sur le détecteur de boîte chaude et de frein serré situé à Payns. L'alarme du détecteur s'est déclenchée, provoquant un bruit strident. L'agent-circulation a consulté alors l'imprimante. Il s'agissait bien d'une alarme « danger ». Il savait qu'il devait alors fermer le signal C3 d'entrée au faisceau de Barberey avant que le train ne soit en approche du signal. Le train s'arrêterait ainsi en freinage de service, car il ne doit pas dans ce cas subir un freinage d'urgence. L'agent devait en outre arrêter et retenir tous les trains croiseurs.

L'agent-circulation a effectué ces opérations et a notamment informé par radio le conducteur du train 60815 qu'il serait arrêté au signal C3 suite à une alarme danger sur le train. L'agent-circulation a sorti la procédure afin de s'assurer de n'avoir rien oublié.

**Figure 17 : boîtier d'alarme
du détecteur de boîte chaude
et de frein serré à Troyes**



Dans le même temps, le cadre d'astreinte, hiérarchique de l'agent-circulation de Troyes, a été avisé par le Service départemental d'incendie et de secours (SDIS) qu'il y avait plusieurs incendies et qu'il fallait assurer une protection pour l'intervention des pompiers. L'agent-circulation a aussi reçu de nombreux appels téléphoniques pour des dysfonctionnements de passages à niveau.

Dans cette intense activité de gestion de crise, l'agent a rédigé la fiche ANOT (anomalie train) pour le conducteur.

Par la suite, après information du déraillement par le conducteur, les opérations de relevage du train accidenté ont été organisées.

3.1.3 - L'agent au sol de Nogent-sur-Seine

L'agent au sol travaille à Europorte depuis 2010. Son lieu d'embauche est à Troyes. Il est également habilité agent de conduite.

Le 26 juillet 2019 à Troyes, vers 13 h 20, il a délivré le « bon au départ » au conducteur du train 60466 de citernes vides à destination de Nogent-sur-Seine. Puis, il s'est rendu, en véhicule de service, en gare de Nogent-sur-Seine pour la manœuvre de ce train jusqu'à l'embranchement de Saipol et le repositionnement de la locomotive sur le train 60815 de wagons-citernes pleins.

Ces manœuvres accomplies, l'agent au sol a effectué la reconnaissance de l'aptitude au transport du train (RAT) et a procédé simultanément à l'essai de frein avec le conducteur. Il a remonté le train frein serré, en marchant sur la piste, en vérifiant que toutes les semelles de frein étaient correctement appliquées. Il est revenu de l'autre côté, frein desserré, en observant que toutes les semelles de frein étaient bien décollées et qu'aucune pièce ne manquait. Il a intégré, dans l'outil informatique portatif « SFW », les observations de la RAT et les masses notifiées dans la lettre de voiture pour déterminer la capacité de freinage minimale. Monté ensuite en cabine de conduite, l'agent au sol a établi le « bulletin de freinage » sur support papier et l'a remis au conducteur.

L'agent au sol a avisé le client Saipol que le train quittait le site et il est redescendu du train deux kilomètres plus loin à l'arrivée à Nogent-sur-Seine afin d'effectuer les manœuvres en liaison avec l'agent-circulation de cette gare. Il a observé le train sur toute sa longueur à trois reprises. Il l'a observé une première fois au défilé à l'entrée du train sur la voie 3. Le train roulait à 6 km/h et l'agent au sol l'observait du côté gauche. Il l'a observé une seconde fois en remontant le train à pied par le côté gauche. Il en a profité pour compter les freins à main et a fait compléter au conducteur le bulletin de freinage avec cette donnée. Il a observé le train une troisième fois au défilé, du côté gauche, lorsque le train est parti de Nogent-sur-Seine en s'étant assuré que les lanternes de queue étaient bien en place. Il a contacté le conducteur par la radio pour lui signifier que tout était normal.

L'agent au sol est reparti pour Troyes avec son véhicule afin d'aller y réceptionner le train.

3.1.4 - L'agent-circulation de Romilly-sur-Seine

L'agent-circulation a pris ses fonctions, pour la première fois à Romilly-sur-Seine ce 26 juillet 2019, sur l'horaire de 12 h 50 à 20 h 50. Le poste de Romilly-sur-Seine était en effet doté d'une nouvelle installation mise en service le 21 juillet 2019. Ce poste est situé sur l'itinéraire du train 60815 et il s'agit d'un poste qui assure la surveillance des trains en marche. Préalablement à sa nouvelle prise de fonction, l'agent disposait d'une expérience de dix années d'agent-circulation en gare de Nogent-sur-Seine. Cet après-midi-là un autre agent « en découverte » était présent à ses côtés.

La journée était calme, il y avait peu de train du fait des travaux. Depuis sa prise de service, aucun train n'est passé sur la voie 2 qui aurait pu croiser le train 60815.

Lors de l'annonce sonore du train 60815 par le gong, lui et l'agent en découverte se sont levés en même temps et se sont dirigés vers la fenêtre du poste qu'ils ont ouverte. Il y a un fort éblouissement du soleil, renforcé par le rebord sous la fenêtre qui est peint en blanc. Au passage du train, l'un et l'autre des deux agents n'ont vu ni étincelle, ni fumée. Ils n'ont entendu aucun bruit suspect, ni senti d'odeur particulière.

Environ 20 minutes après le passage du train, un agent SNCF en repos a téléphoné depuis le téléphone du passage à niveau n° 81 de Savières, pour prévenir qu'il y avait un incendie sur ce passage à niveau. L'agent-circulation de Romilly-sur-Seine a aussitôt appelé son homologue de Troyes qui l'a informé de l'alarme danger sur le train. L'agent de Romilly-sur-Seine a alors appelé les pompiers et pris les dispositions pour retenir tous les trains se dirigeant sur la zone en passant les dépêches correspondantes.

3.1.5 - Commentaire sur les opérations au départ des agents d'Europorte

Concernant les opérations préalables au départ d'un train 60815 en ligne, celles qui sont décrites dans les témoignages de l'agent au sol et du conducteur ont été réalisées, sur les dires de ces agents, conformément aux procédures. Notamment, lors de l'essai de frein, l'agent au sol s'est assuré que toutes les semelles étaient appliquées en situation où les freins étaient « serrés », et qu'elles étaient bien décollées en situation où les freins étaient « non serrés ».

Les enquêteurs ont eu accès à la lettre de voiture ainsi qu'au bulletin de freinage et n'y ont relevé aucune anomalie.

Certaines opérations ont été menées en parallèle par les agents, dans une volonté de gain de temps, mais cela ne conduit pas à y déceler de conséquence pour la sécurité du train.

3.1.6 - Commentaire sur l'opération de surveillance des trains en marche

La surveillance du train en marche a été effectuée par l'agent-circulation et un autre agent qui était avec lui au poste de Romilly-sur-Seine. Ces deux agents connaissaient la mission et avaient déjà une expérience dans ce domaine. Le BEA-TT rappelle l'importance que revêt la bonne exécution de cette mission pour assurer la sécurité des circulations (voir le rapport du BEA-TT paru en 2017 sur les ruptures multiples de rail entre Pons et Jonzac).

Selon leurs dires, aucun des deux agents n'a vu, ni entendu, ni perçu d'odeur ou d'élément suspect sur le train 60815 lors de son passage devant le poste.

La position du soleil, le 26 juillet 2019 à 16 h 16 à Romilly-sur-Seine, heure de passage du train, était à 48,9° de l'horizontal. Son azimuth était à 238°, soit une direction sud-ouest – ouest. Le poste d'aiguillage de la gare étant orienté sud-ouest, le soleil était quasiment en face des deux agents comme le montre la représentation graphique de la figure ci-après.



Figure 18 : orientation du soleil et vue du poste de Romilly-sur-Seine

Le soleil était donc juste au-dessus du train, ce qui a pu gêner la visibilité des essieux, tout comme le reflet du soleil sur la vitre et le rebord de la fenêtre du poste peint en blanc.

Il est à noter également que les caractéristiques des semelles de frein LL qui équipaient le wagon, à faible frottement et à faible bruit, ont peut-être atténué les émissions sonores perceptibles par les agents.

3.2 - L'analyse de l'enregistrement des paramètres de conduite

L'enregistreur des paramètres de conduite du train possède une résolution en distance de dix mètres et en temps de deux secondes. Les données de vitesse issues de l'enregistreur du train 60815 sont reproduites ci-dessous.

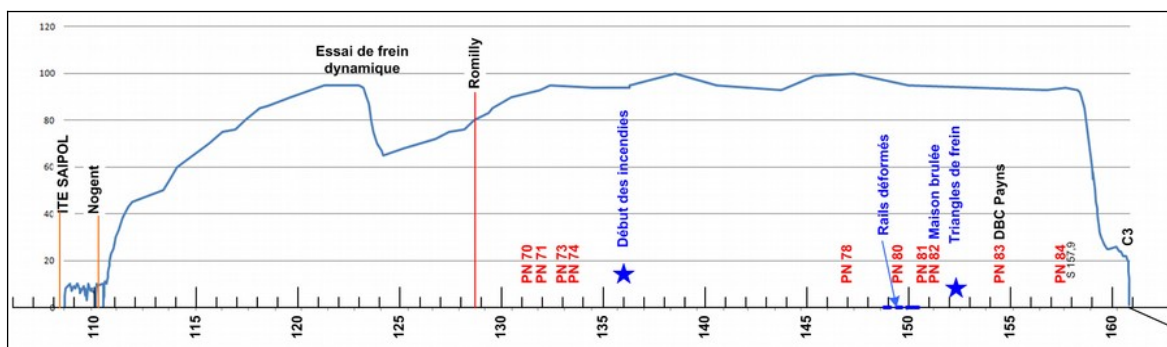


Figure 19 : graphique de vitesse
(les annotations en bleu seront détaillées plus loin)

L'analyse de l'enregistrement permet d'identifier les séquences particulières suivantes sur la marche du train :

- Sur la partie extrême gauche du graphique, il y a plusieurs marches à 10 km/h et un arrêt. Ceci correspond aux opérations de transfert du train entre les établissements Saipol et la gare de Nogent-sur-Seine.
- Après le départ de Nogent-sur-Seine, le conducteur effectue une montée en vitesse jusqu'à 95 km/h.
- 12,5 km après Nogent-sur-Seine (soit au PK 122,85 et 6 km avant Romilly-sur-Seine), le conducteur met le manipulateur de traction à 0, puis commande un freinage. L'action du frein est maintenue 10 secondes. L'effet du freinage a conduit à une baisse de la vitesse à 87 km/h. La décélération résultant du freinage peut être estimée avoir atteint environ 0,25 m/s². Le conducteur a alors supprimé la commande de freinage. Les temps de réaction et de propagation de la dépression le long du train ont fait que la décélération s'est poursuivie sur 1,8 km, la vitesse du train descendant alors à 65 km/h. Puis le conducteur a remis la traction. Il a passé la gare de Romilly-sur-Seine à 78 km/h en accélération, avant de ré-atteindre la vitesse de 100 km/h.
- 46,3 km après Nogent-sur-Seine (soit au PK 156,65), le conducteur coupe la traction. La vitesse redescend puis, après avoir parcouru 700 mètres, à 16 h 37 min 28 s, le conducteur commande un freinage et laisse la vitesse tomber. Il est en approche du signal C3.
- 49,3 km après Nogent-sur-Seine, à 16 h 41 min 42 s, le conducteur effectue un nouveau freinage et arrête son train une centaine de mètres plus loin.

Ces données confirment le témoignage fait par le conducteur et montrent que les actions de celui-ci sont conformes aux procédures.

3.3 - L'analyse de l'enregistrement du détecteur de « boîte chaude »

Un détecteur de boîte chaude (DBC) de dernière génération, c'est-à-dire ayant la fonctionnalité de détection de frein serré (DFS), est installé au PK 154,423 de la ligne en gare de Payns. Les alarmes sont transmises au poste d'aiguillage n° 1 de Troyes.

Ce détecteur envoie deux niveaux d'alarme distincts selon la température détectée :

- l'**alarme simple**, correspondant à un risque de défaillance à brève échéance du train et pour lequel il convient de diagnostiquer l'état de la boîte ou du frein alarmés afin de décider des conditions de poursuite de la mission ;
- l'**alarme danger** lorsqu'il y a un risque imminent de déraillement.

Le 26 juillet 2019, c'est l'alarme danger « boîte » et « frein » qui s'est déclenchée.

Les seuils d'alarme du détecteur sont récapitulés dans le tableau ci-dessous.

	Alarme danger	Alarme simple
Boîte chaude	T > 90 °C	T > 87 °C <i>72 + 0,80 x (temp. ext. – 20) avec temp. ext. mesurée = 39 °C</i>
Frein serré	T > 400 °C	T > 300 °C

L'alarme est transcrite sur un listing d'imprimante dans le poste d'aiguillage, ainsi que de façon plus détaillée sur un listing à destination des agents de maintenance. Les données du listing détaillé sont reproduites ci-dessous avec des annotations explicatives.

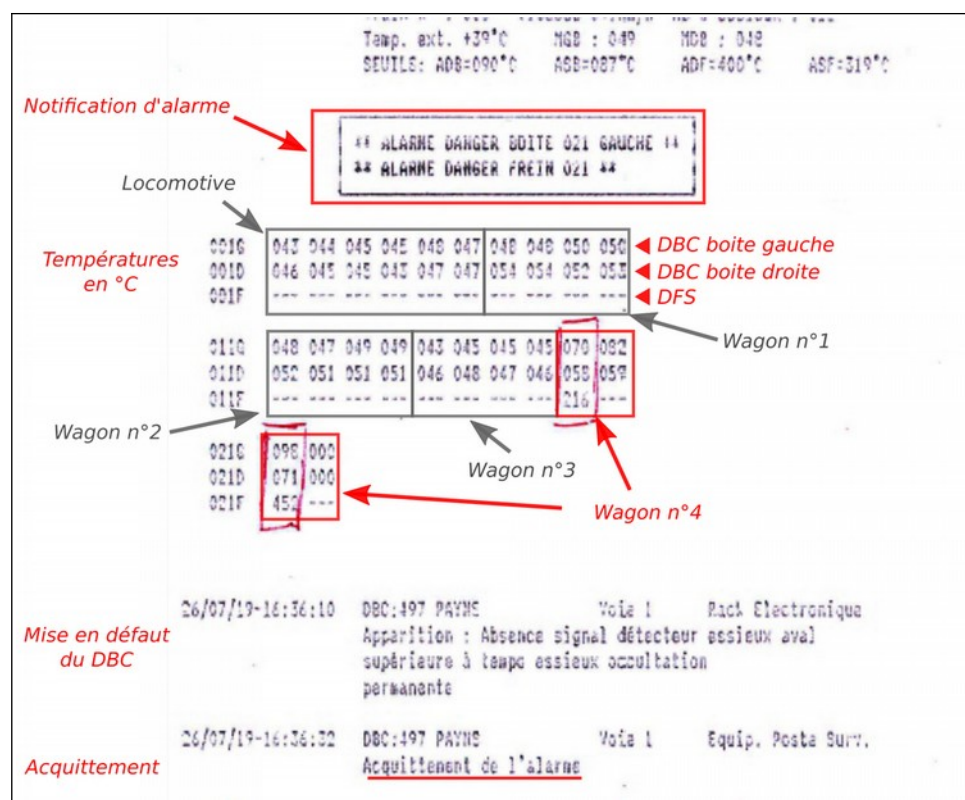


Figure 20 : listing du détecteur de « boîte chaude » et de « frein serré »

Le listing fournit pour chaque essieu la température de la boîte d'essieu de gauche (1^{ère} ligne), la température de la boîte de droite (2^e ligne) et la température détectée élevée des roues (3^e ligne).

Pour la locomotive (6 essieux) et les trois premiers wagons (4 essieux chacun), les températures des boîtes détectées sont comprises entre 43 et 54 °C, avec absence de défaut de frein serré, ce qui est une situation normale. Pour le quatrième wagon, les températures sont anormalement élevées, jusqu'à 98 °C pour une boîte de gauche et 452 °C pour la jante d'une roue, températures au-dessus des seuils de danger. Cela a provoqué l'alarme.

Le détecteur s'est mis en défaut après le passage du quatrième wagon, en raison de son endommagement par les roues du wagon avarié. Il est possible que les derniers résultats délivrés aient été affectés par les dommages produits par le wagon.

3.4 - Les dommages à l'infrastructure

Aucune dégradation n'a été constatée sur la première partie du parcours du train, entre la gare de Nogent-sur-Seine et le PK 136,150, 4,5 km avant l'ancienne halte de Châtres.

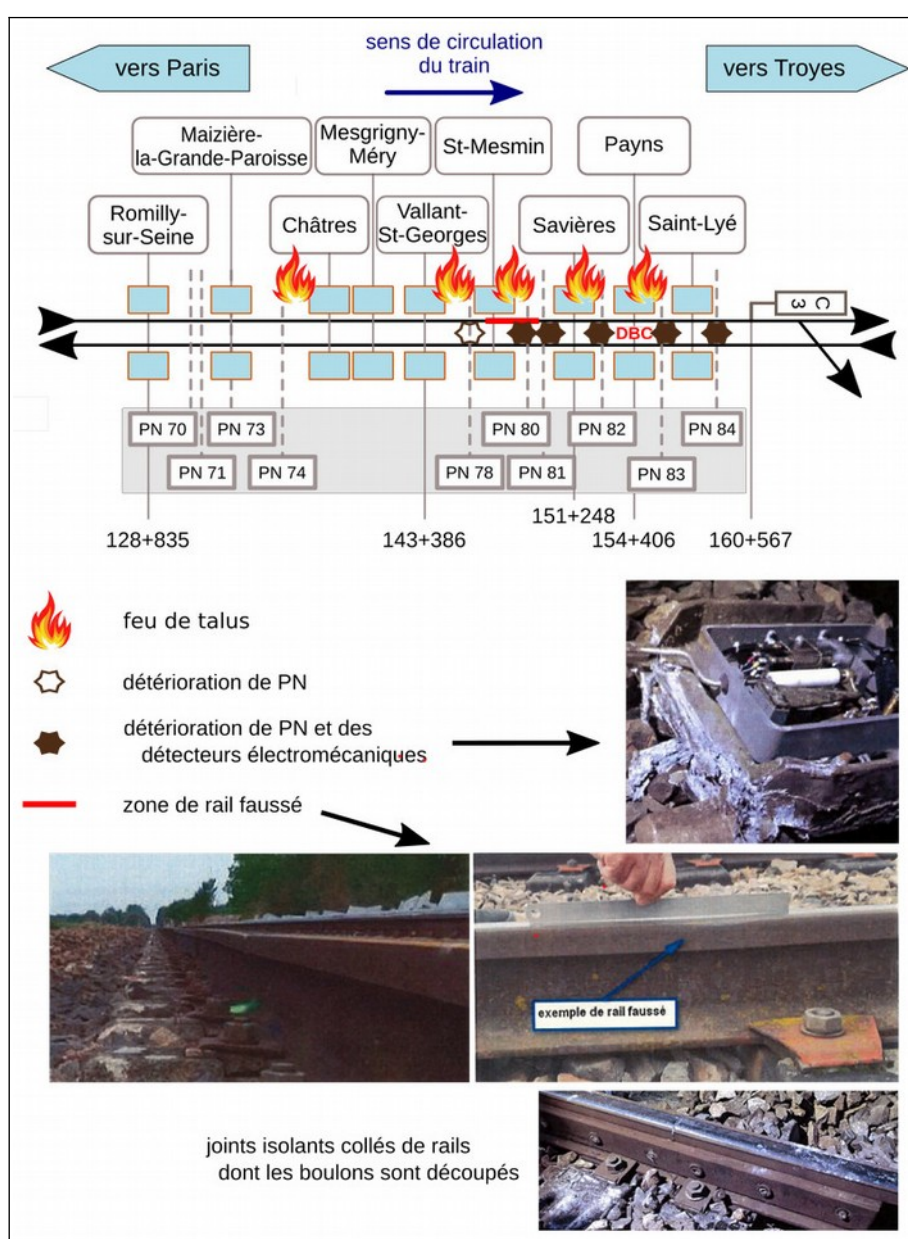


Figure 21 : les dommages à l'infrastructure

Plusieurs feux de talus ont été constatés respectivement au PK 136,150 (en approche de l'ancienne halte de Châtres), au PK 143,700 (juste après l'ancienne halte de Vallant-Saint-Georges), au PK 147,100 (près de l'ancienne halte de Saint-Mesmin), au PK 151,200 (près de l'ancienne halte de Savières) où la maison d'un riverain a été incendiée, et au PK 154,600 (après l'ancienne halte de Payns). Sur cette zone sont situés six passages à niveau. Ils ont tous vu leur dallage de béton dégradé ou de caoutchouc déchiré. Pour les cinq derniers, 22 détecteurs électromécaniques de commande ont été endommagés entre les PK 150,821 et 160,724, provoquant la fermeture prolongée de ces passages à niveau. Des capteurs du système de détection de boîte chaude et de frein serré (DBC/DFS) de Payns au PK 154,423 ont été détruits.

Les rails entre les PK 148,800 et 150,450, de part et d'autre du PN 80, sont poinçonnés sur trois zones de longueurs respectives de 300 m, 350 m et 750 m. Le poinçonnement d'un pas de 2 500 mm a une flèche atteignant 1,6 mm. À noter que ce pas correspond à la circonférence d'un cercle de diamètre 800 mm, légèrement inférieur à ceux des roues (à l'état non dégradé) dont le diamètre est compris entre 850 et 870 mm, indiquant qu'il a été produit par une roue usée voire creusée. Les boulons de quatre joints isolants collés de rails ont également été découpés libérant ainsi le maintien des rails entre-eux.

Plusieurs pièces du train (semelles, triangles de freins, tuyauterie) ont été retrouvées sur la plateforme. La figure ci-après récapitule leurs positionnements.

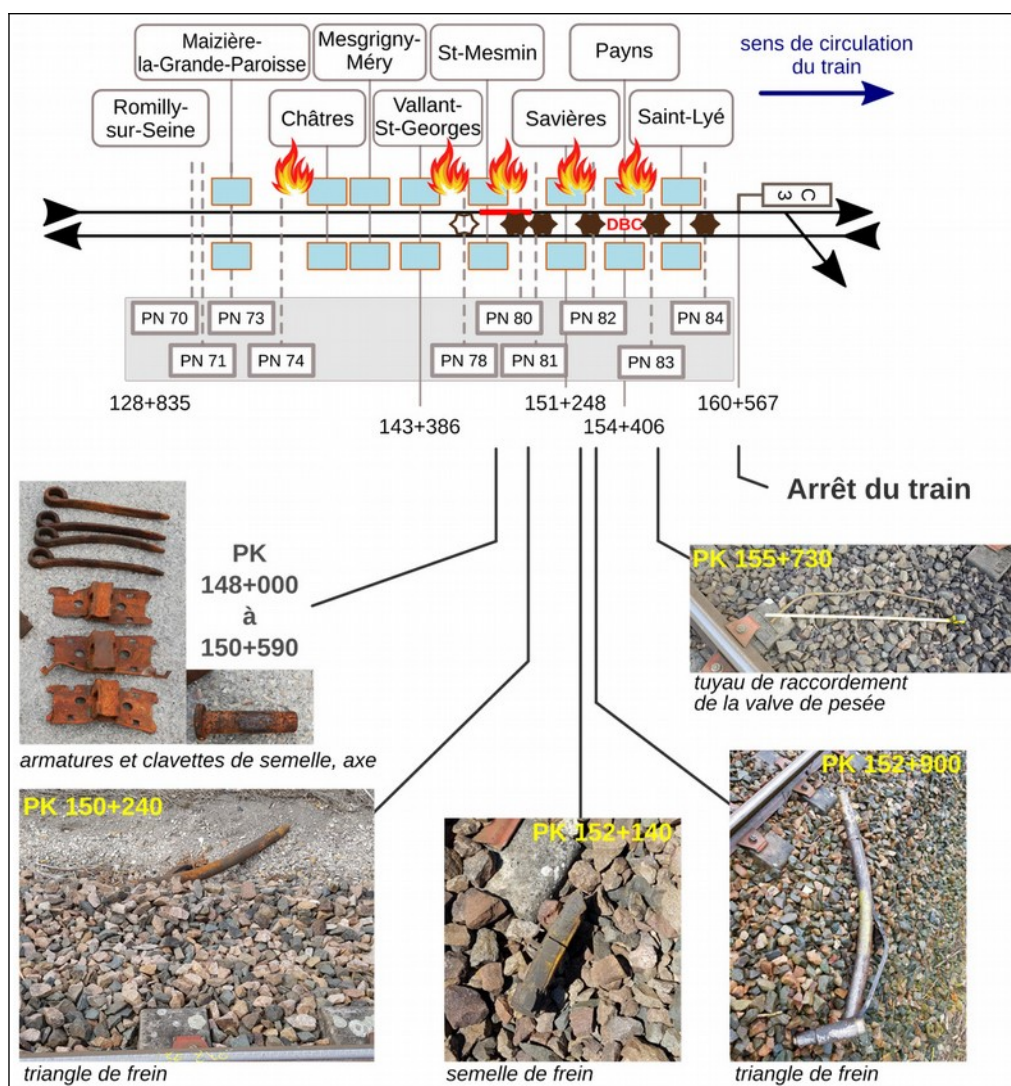


Figure 22 : les pièces du matériel roulant retrouvées en voie

En synthèse, il apparaît que les dégâts à l'infrastructure proviennent d'éléments du matériel roulant ayant soit engagé le gabarit des constituants de l'infrastructure, soit été projetés du train (plusieurs ont été retrouvés), pour certains incendiaires.

3.5 - Les dommages au convoi

Les dommages concernent principalement le wagon 33 81 7837 835-6, quatrième du convoi. Ils touchent essentiellement les parties basses de ce wagon. Pour la description de ces dommages nous utiliserons le repérage selon la numérotation des bogies, roues et essieux, représentée sur la figure ci-dessous.

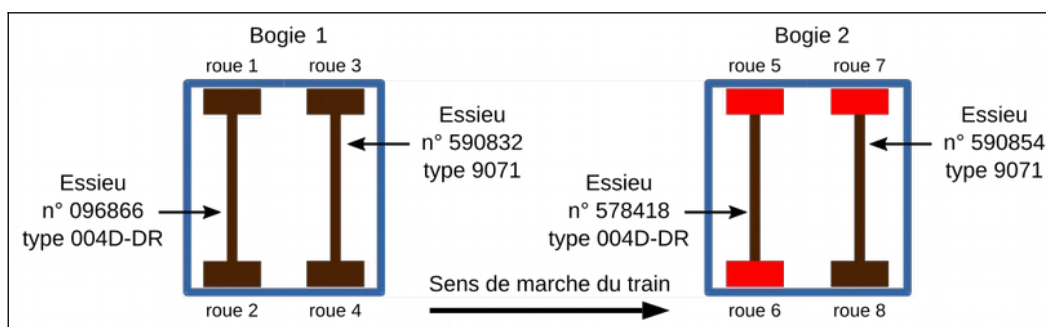


Figure 23 : schéma de repérage des roues et essieux du wagon 33 81 7837 835-6

Le tableau ci-dessous récapitule les caractéristiques techniques et dimensionnelles des roues, telles qu'elles ont pu être extraites des données du détenteur du wagon, ou relevées sur le wagon après l'accident dans le cadre de l'expertise judiciaire.

Essieu	Type	Date de montage	Roue	Date de fabrication	Diamètre en mm		Masse estimée de la jante en kg (expertise judiciaire)
					Mesure sept. 2018 (donnée détenteur)	Mesure post-accident (expertise judiciaire)	
8519-096866	004D-DR (roues BA004)	nc	1	2007	869,8	870	140
			2	2007	870	870	
8702-590832	9071	nc	3	2000	864,3	861	150
			4	2000	864,5	863	
8519-578418	004D-DR	2008	5	2007	861,3	-	118
			6	2007	861,5	-	
8702-590854	9071	2000	7	2000	864,7	857	150
			8	2000	864,8	863	

Les roues 5 et 6 ont subi des détériorations après l'accident rendant impossible la mesure d'un diamètre. Les roues 7 et 8 ont subi des déformations rendant la mesure après accident non véritablement significative.

Les dommages sur le wagon ont été constatés soit directement sur le train une fois arrêté, soit sur le site de garage du wagon après son relevage, soit en atelier lors des expertises techniques et judiciaires qui ont suivi.

3.5.1 - Les dommages au bogie 2 du wagon avarié



Figure 24 : le bogie 2 en atelier après dépose

Ce bogie est le plus avarié.

Les roues 5 et 6, montées sur le deuxième essieu dans le sens de la marche (n° 578418), sont hors d'usage. La jante des deux roues est creusée en profondeur. Pour la roue 5, la partie extérieure de la jante est séparée de la toile de roue sur plus des trois quarts du pourtour (voir figure suivante). Pour la roue 6, elle est creusée d'un profond sillon. La déformation des roues indique que l'acier a été porté à une température supérieure à celle de malléabilité de 800 °C.

La peinture des deux roues est recuite et brûlée uniquement sur leur pourtour, indiquant que l'échauffement thermique s'est concentré sur la circonférence.

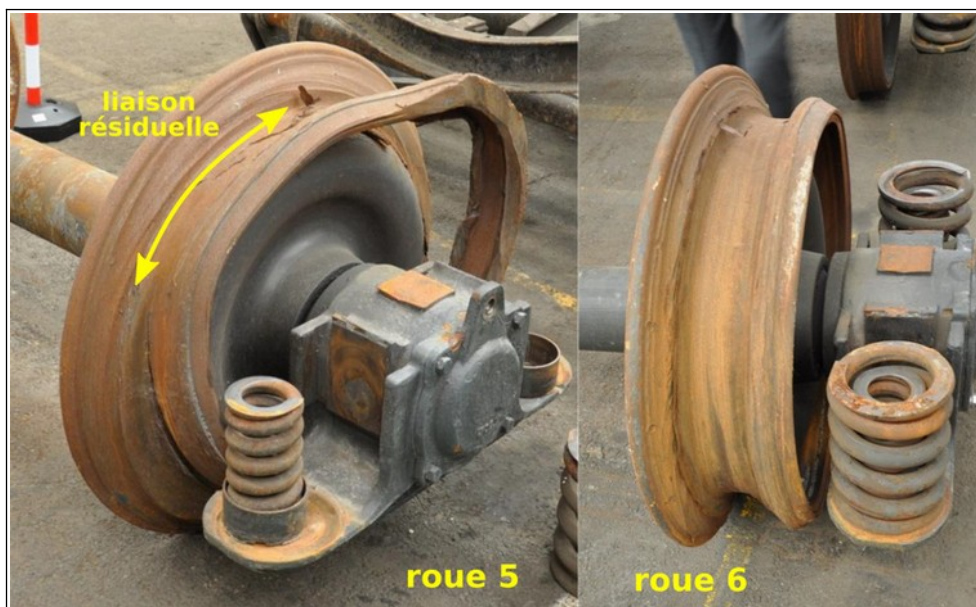


Figure 25 : vue de l'essieu 5-6 en atelier

Les boîtes d'essieux sont mobiles. À leur ouverture, la graisse des roulements est encore crémeuse, confirmant que la température élevée des roues s'est peu transmise aux boîtes et que celles-ci ont continué à fonctionner. Rappelons que le détecteur de boîte chaude a mesuré une température des boîtes au maximum de 98 °C.

L'observation des deux roues par le dessous montre une marque importante d'usure des deux jantes par glissement sur le rail (méplats), ainsi qu'un usinage du boudin de la roue 5 par les attaches de rail. Ces défauts traduisent la survenance d'un enrayage à un moment du parcours du train.

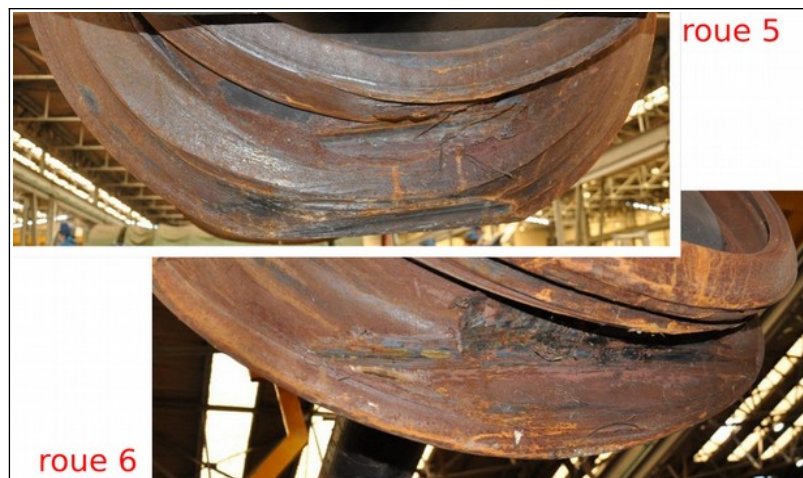


Figure 26 : vue de dessous des roues 5 et 6

À l'analyse des dommages aux jantes, il apparaît que dans un premier temps les deux roues se sont dégradées tout en continuant à rouler. L'échauffement thermique s'est produit sur tout le pourtour des roues. Nous avons aussi vu que l'échauffement ne résulte pas d'un empêchement des roues à tourner par blocage de la boîte d'essieu. **Ces constats conduisent à ce stade à statuer que le dysfonctionnement initial ne provient pas d'un blocage de roulement des essieux mais d'un serrage intempestif des freins.** L'enrayage des roues est intervenu dans un deuxième temps, après dégradation des jantes, en fin de parcours.

Les roues 7 et 8, montées sur le premier essieu dans le sens de la marche (n° 590854), ont subi aussi des dommages quoique moins importants.

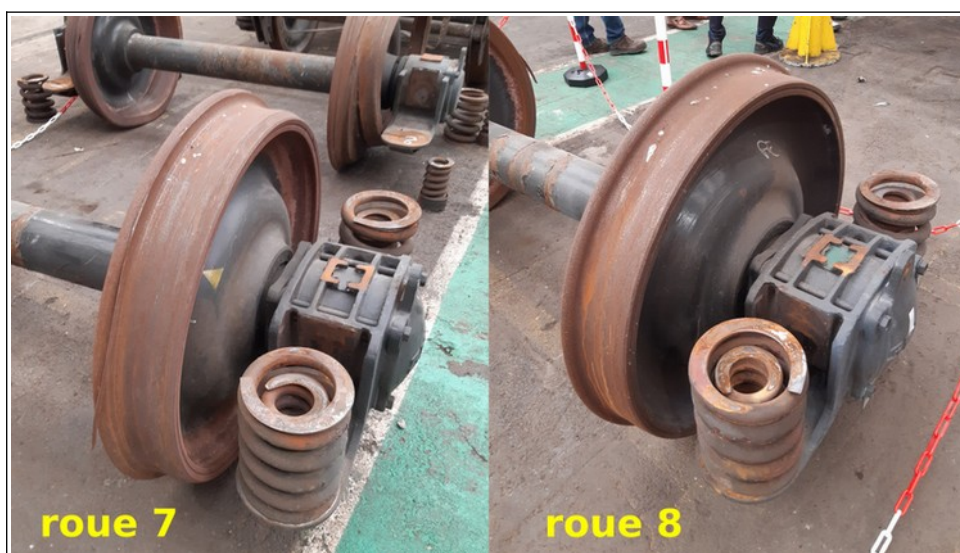


Figure 27 : vue de l'essieu 7-8 en atelier

La roue 7 présente l'amorce d'un usinage comme les roues 5 et 6, mais moins prononcé (profondeur 5 mm). Les boîtes d'essieu sont bien mobiles. La peinture des roues est brûlée sur leur pourtour, confirmant que l'échauffement s'est concentré sur la bande de roulement et qu'il provient d'un serrage des freins.

Enfin, il est à noter sur le bogie 2 que l'ensemble des semelles de frein (qui sont de type LL) sont absentes, ôtées des portes-semelles qui sont présents. Seule une armature de semelle sur la roue 8 est restée fixée, sans la semelle. La timonerie et le cadre du bogie ont subi des dégradations importantes. Plusieurs pièces sont rompues, certaines étant tombées sur la voie.

La disparition des semelles peut correspondre à un comportement normal de celles-ci : en cas de serrage intempestif prolongé des freins, ce sont en effet les semelles qui sont censées s'user et disparaître, afin de réduire le temps de contact de la semelle sur la roue, et ainsi de réduire les effets du frein sur la roue.



Figure 28 : vue de la timonerie et du cadre du bogie 2 vu de l'arrière

La figure ci-dessous montre la mise à plat complète de la timonerie du bogie 2 effectuée en atelier. Les deux triangles de frein cerclés en jaune ont été retrouvés en voie et replacés avec les pièces démontées. Six axes de support de la timonerie sur la longrine du bogie sont manquants. Un seul a été retrouvé en voie.

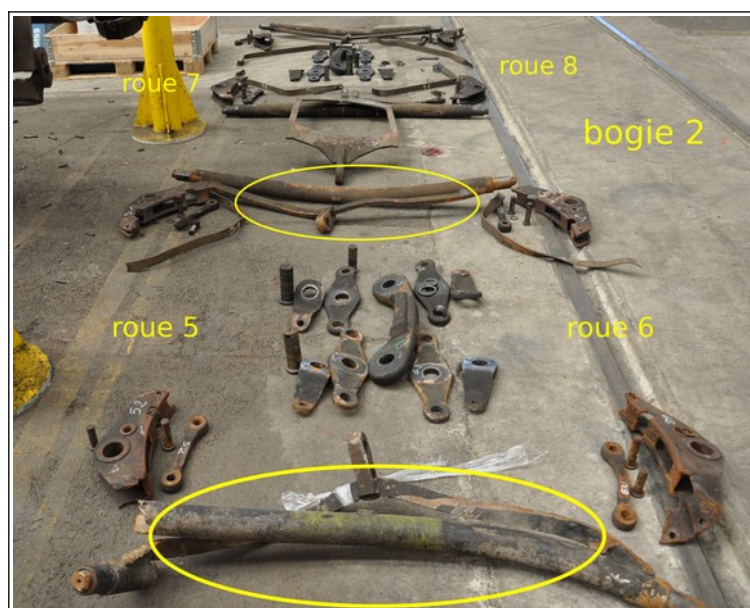


Figure 29 : mise à plat de la timonerie en atelier

Ces dégradations témoignent de la sollicitation intense du système de freinage sur l'essieu des roues 5 et 6, jusqu'à la rupture.

3.5.2 - Les autres constats sur le wagon avarié

Le **bogie 1** à l'arrière présente des dégradations moindres que le bogie 2. L'état initial des roues était proche de la fin de vie : il ne reste qu'environ un centimètre d'usure de jante disponible sur les quatre roues. Le pourtour des roues, quelques semaines après l'accident, est corrodé, signe que les roues ont subi un fort échauffement. La peinture des toiles ne présente pas de trace d'échauffement, mais plusieurs marques d'impact de ballast.

L'observation des semelles de frein montre que certaines sont partiellement cassées, ou fissurées ou complètement absentes. Le matériau composite des semelles s'est effrité en se détachant irrégulièrement, plus ou moins abondamment.

Si certaines jantes des roues ont subi des dégradations notables sous l'effet d'un serrage intempestif des semelles, il apparaît que simultanément, de leur côté, les semelles ont subi des dégradations qui ne présentent pas un aspect classique d'usure uniforme mais plutôt des irrégularités singulières.

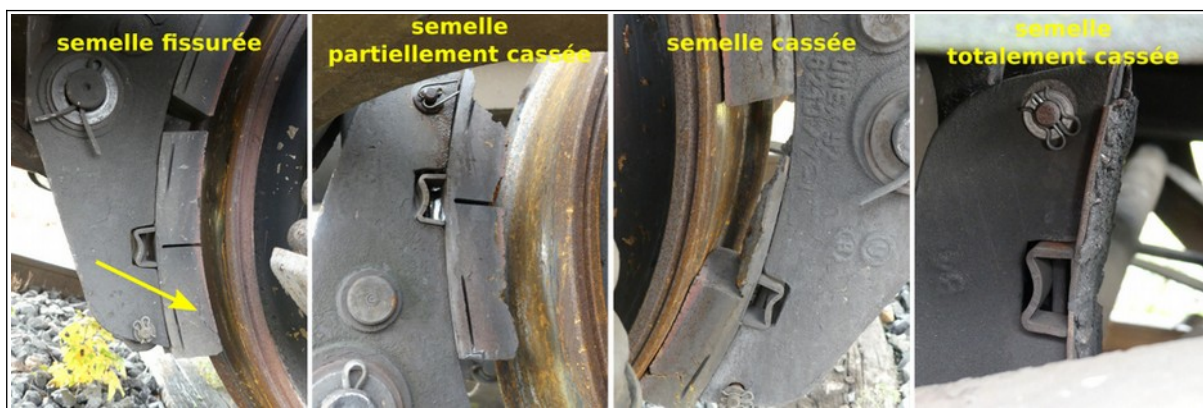


Figure 30 : variété des dégradations des semelles de type LL

D'une manière générale, des traces de chocs affectent toutes les parties situées sous le wagon (axes d'essieu, traverses des bogies...) Ces chocs apparaissent comme le résultat d'impacts de morceaux de ballast projetés par les pièces traînantes de timonerie, ou par ces pièces de timonerie elles-mêmes lorsqu'elles sont tombées.



Figure 31 : exemple d'impacts en sous-face du wagon

3.6 - L'expertise du système de freinage

Les dommages au matériel roulant sont concentrés sur le 4^e wagon. Il peut en être déduit que l'anomalie de serrage du frein ne concernait que ce wagon.

À l'arrêt du train et sur ce 4^e wagon, le robinet d'isolement du frein était en position ouverte, le régime était sur « marchandise » et le frein à main était desserré. Ce sont les états normaux pour la circulation normale du wagon.

Plusieurs chocs ont touché les **équipements de freinage** et concernent le régleur, la valve de pesée (dont la tuyauterie est déboîtée), et le réservoir auxiliaire (qui est à moitié sorti de ses supports et dont le tuyau d'alimentation est déboîté). Le distributeur paraît ne pas avoir subi de dégradations. Pour identifier l'origine du freinage intempestif, l'ensemble de ces équipements de frein ont été expertisés.

3.6.1 - Le test du distributeur

Le distributeur est de marque Knorr. La marque de révision indique 11 03 FFU. Il a été révisé en novembre 2003 à l'atelier de Fulda en Allemagne. Après l'accident, il a été démonté et soumis, à deux reprises, à un test au banc de fonctionnement.



Figure 32 : le distributeur de marque Knorr

Le premier test a eu lieu sur le banc d'essai de la filiale du groupe des Chemins de Fer Luxembourgeois, CFL Technics. Le second test a eu lieu sur le banc de contrôle de la production de Knorr Bremse France, le fabricant, à Tinquieux dans la Marne.

Les deux tests ont révélé plusieurs anomalies du distributeur conduisant à le déclarer inapte à sa fonction. La principale anomalie, reproduite lors des deux tests, est le non-réarmement du distributeur lors d'une remise en pression de la conduite générale après un freinage. Ce défaut traduit qu'un clapet interne ne bascule pas dans la position qui met en communication le cylindre de frein avec l'atmosphère (état « freins desserrés » de la figure 13). Lors d'une remise en pression de la conduite générale qui fait suite à un serrage, le distributeur reste en position « freins serrés ». Compte tenu de la mécanique interne au distributeur, la pression délivrée au cylindre de frein est toutefois au niveau dit de « 1^{er} palier », inférieure à 1 bar, qui correspond à l'application d'un freinage faible. Le défaut identifié ne conduit pas a priori à un serrage intense du frein du wagon, seulement à son serrage non contrôlé et faible.

Ce défaut témoigne cependant de la présence d'impuretés au sein du distributeur, impuretés qui sont aussi un facteur de risque vis-à-vis d'un autre défaut plus important et fuyitif qui est le maintien intempestif du serrage après un freinage.

3.6.2 - L'expertise des autres équipements de freinage

Le **régleur** présentait des traces de choc sur son carter. À l'examen approfondi, il est apparu que des enfoncements touchaient les systèmes mécaniques de rotation et translation à l'intérieur, bloquant les mouvements du régleur. Après les chocs, le régleur n'était plus opérant et il n'a donc pas pu être testé.

Le démontage du régleur a toutefois révélé que les pièces constitutives étaient saines, non corrodées. Elles ne présentaient pas d'anomalie qui aurait pu entraîner un mauvais fonctionnement de freinage.



Figure 33 : vu des chocs sur le régleur et schéma en coupe

Les tuyaux de liaison du système de pesée ont été cassés et déboîtés par des chocs. La **valve de pesée** a été démontée. Ses constituants étaient en bon état. Le **cylindre de frein** a été démonté également. La cuve était en bon état sans présence d'eau, ni de point de rouille. La garniture du cylindre était aussi normale. Le **réservoir auxiliaire**, intègre, était à moitié sorti de ses supports. Son tuyau d'alimentation était déboîté, mais cela ne peut être que le résultat des chocs consécutifs à la perte des éléments de timonerie, la rupture de l'alimentation conduisant notamment à annuler l'effort de freinage.



Figure 34 : le réservoir auxiliaire et la valve de pesée

3.6.3 - Conclusions sur l'anomalie de serrage des freins

Trois observations intermédiaires peuvent être faites concernant l'anomalie de freinage :

1. *Le serrage du frein ne pouvait résulter que d'une mise en action de la timonerie*, car les dommages sont présents simultanément sur plusieurs roues, et la timonerie est le seul élément les reliant.
2. *Aucun des éléments de la timonerie ne peut être identifié comme étant la cause de la délivrance d'un effort de serrage, hormis l'action par le cylindre de frein*. En effet :
 - le frein à main était desserré ;
 - si un blocage du régleur avait eu lieu, la longueur du régleur serait devenue fixe, sans qu'il ne se soit produit un raccourcissement supplémentaire de celui-ci qui seul pourrait justifier la mise en action de la timonerie ;
 - en cas de mauvais rendement des éléments de timonerie (par manque de graissage ou grippage ou choc avec un corps étranger), cela aurait éventuellement appliqué les semelles sur les roues mais sans que cela ne délivre un effort de serrage ;
 - le coincement prolongé d'un éventuel objet traîné, actif sur la timonerie, aurait produit des impacts aux traverses, non observés, et un tel objet n'a pas été retrouvé ;
 - l'insertion d'un éventuel objet entre une semelle et une roue aurait conduit, pour produire un serrage, à envisager un objet ayant la dimension de la course du cylindre de frein, et donc beaucoup trop gros pour qu'il puisse s'immiscer à cet emplacement ;
 - un affaissement partiel de la timonerie du bogie 2 tel qu'il peut être observé, s'il s'était produit, ne conduirait pas à la délivrance d'un effort de serrage des semelles.
3. *La seule hypothèse envisageable justifiant la mise en action du cylindre de frein, est une commande intempestive de serrage par le distributeur du wagon qui lui est directement relié.*

Il apparaît ainsi que, au vu des constats, les équipements de freinage hormis le distributeur ont été fonctionnels jusqu'à subir des chocs, et que les chocs ne sont pas à l'origine du serrage. Ils sont bien plus la conséquence de la rupture du système de timonerie et des projections des pièces perdues et de ballast qui ont accompagné.

La seule hypothèse envisageable justifiant le serrage du frein est une commande intempestive de serrage par le distributeur du wagon.

Il est bien difficile de recenser toutes les anomalies pouvant conduire à une telle commande tant le distributeur a un fonctionnement complexe. Plusieurs origines peuvent être identifiées parmi lesquelles :

- Le défaut du distributeur identifié post-accident (voir § 3.6.1). Il peut expliquer un serrage au « 1^{er} palier » de pression au début ou au cours du parcours.
- La présence d'impuretés dans le corps du distributeur (que laisse supposer le défaut précédent). Elle peut expliquer un maintien à l'état de « frein serré » à la suite de l'essai dynamique de frein en ligne.
- La mauvaise élimination par le conducteur de la surcharge de la conduite générale au départ. Elle pourrait expliquer un maintien du distributeur en état « frein serré » au

départ. Ce risque est bien connu. Pour l'éviter, le conducteur doit, après le raccordement de la rame préalablement préparée et gonflée avec un engin rail-route, opérer à une surcharge de la conduite générale afin d'éliminer toute éventuelle surpression. Si cette opération est mal conduite, un ou plusieurs distributeurs de wagon peuvent ne pas passer à l'état « frein desserré ». Dans notre cas, les vérifications qui ont été faites par l'agent au sol avant le départ (et dont il a témoigné) peuvent permettre d'écarter le risque (vérification du desserrage des sabots lors de l'essai statique de frein, triple surveillance au défilé). Ces vérifications sont toutefois sujettes au facteur humain et pourraient ne pas avoir détecté la présence d'une anomalie.

Une analyse énergétique sommaire, conduite dans le cadre de l'expertise judiciaire et dont nous décrivons le principe de manière simplifiée en nota⁴, permet d'estimer que la force de freinage a été modérée, et que l'anomalie la plus probable qui a affecté le distributeur est un défaut fugitif de fonctionnement à l'occasion de l'essai de frein dynamique avec maintien du serrage en ligne.

4 Le principe de l'analyse énergétique est explicité ci-après :

- L'énergie d'échauffement de la roue peut être évaluée au moyen de la formule $\Delta E_{\text{Échauffement}} = m \cdot c \cdot \Delta T$, où m est la masse de la jante (de 150 à 118 kg, voire moins compte tenu de la survenue d'un usinage), c la capacité thermique massique de l'acier de 480 J/kg.°C et ΔT l'élévation de température. La température ayant atteint la température de malléabilité de l'acier d'environ 800 °C, on a :

$$\Delta E_{\text{Échauffement}} \approx 118 \times 480 \times (800 - 30) = \mathbf{43 \text{ mégajoules.}}$$

- L'énergie de freinage d'une roue est elle reliée à l'effort de retenue par la formule $\Delta E_{\text{freinage}} = F_{\text{Retenue}} \cdot d$, où d est la distance d'application.
- Il y a aussi une énergie dissipée, du fait de la capacité propre de dissipation d'énergie de la roue. Elle est donnée en ligne lors du freinage par la formule $\Delta E_{\text{Dissipée}} / km = P / v$, où v est la vitesse du train (ici 100 km/h soit 27,8 m/s), et P la puissance de dissipation (La spécification technique d'interopérabilité (STI) applicable aux wagons, approuvée par le règlement 321/2013 de la Commission européenne du 13 mars 2013, indique dans son article 4.2.4.3.3 que le système de freinage doit dissiper une puissance $P = 45$ kW par roue en situation stabilisée). Soit :

$$\Delta E_{\text{dissipée}} \approx 45 / 27,8 = \mathbf{1,62 \text{ mégajoules par km.}}$$

- La conservation de l'énergie donne $\Delta E_{\text{Freinage}} = \Delta E_{\text{Échauffement}} + \Delta E_{\text{Dissipée}}$, d'où l'on déduit la relation entre l'effort de retenue par roue et la distance d'atteinte de la malléabilité de la roue : $F_{\text{Retenue}} \cdot d \simeq 43 + 1,62 \cdot d$, soit $d \simeq 43 / (F_{\text{Retenue}} - 1,62)$.

Tout calcul fait, l'hypothèse d'une distance de 26 km pour la survenue des dommages (cas d'un incident de serrage lors de l'essai de frein dynamique) correspond à une force de retenue par roue de 3 kN, qui serait cohérente avec la force moyenne par roue de 2,8 kN évaluable à partir de la décélération obtenue lors de l'essai dynamique (0,25 m/s²).

L'hypothèse d'une distance de survenue des dommages de 40 km (cas d'un incident au départ) correspond à une force de retenue par roue de 2,7 kN, qui est supérieure à la force de retenue de 2,1 kN pour une anomalie de maintien de la pression au premier palier (≤ 1 bar).

Ceci conduit à privilégier la première des deux hypothèses, celle d'une anomalie de maintien du serrage lors de l'essai de frein dynamique.

3.7 - L'historique d'utilisation et de maintenance du wagon

Les investigations ont exploré l'historique d'utilisation et de maintenance du wagon afin de connaître l'état d'entretien du système de frein du wagon et les éventuels défauts antérieurs constatés.

Le wagon a été fabriqué en 1993. Il a été immatriculé pour le compte de VTG Suisse en Autriche, le 20 décembre 2004. L'entité en charge de l'entretien (ECE) déclarée est VTG Allemagne.

Le détenteur est titulaire d'un certificat n° EIN/UK/31/0217/0006 d'entité en charge de la maintenance attestant de sa conformité avec le règlement UE 445/2011 concernant le système de certification des entités chargées de l'entretien des wagons de fret. Ce certificat a été délivré par l'organisme notifié TÜV Rheinland UK Limited dont le siège est à Cologne. Comme l'exige le règlement européen précité, le détenteur met en œuvre un processus d'analyse des données des incidents et des dysfonctionnements. Concernant les anomalies de surcharges thermiques dues au freinage, sur l'ensemble du parc VTG, leur taux d'incidence est faible et stable dans le temps.

L'historique d'utilisation du wagon a pu être reconstitué depuis 2016 à partir d'informations fournies par VTG et Europorte. Le wagon a parcouru les kilométrages donnés dans le tableau ci-après.

Année	Kilométrage		
	EF Europorte	EF Fret SNCF (transport en atelier)	Total
2016	4 934	1 500	6 434
2017	2 155	994	3 149
2018	4 430	702	5 132
2019	10 680		10 680
Total	22 199	3 196	25 395

Ce kilométrage est peu important. L'utilisation en transport a été assez faible (au plus deux allers-retours par mois). Il apparaît que le wagon a fait de nombreux transports en atelier.

La maintenance fait l'objet d'une planification par VTG avec un outil de gestion de la flotte de wagons nommé WAMOS (pour Wagon Management and Opération System). À des interventions cycliques relativement espacées (4 ans) s'ajoutent des interventions curatives suite à anomalie.

Les dernières interventions connues sur le wagon sont récapitulées sur le tableau ci-après, depuis 2015. Y est ajoutée l'intervention de remplacement du distributeur en 2004. La précision sur la nature des interventions et des avaries le cas échéant n'est pas toujours connue.

Dates	Atelier ou prestataire intervenu	Motif et nature de l'intervention
4/10/2004 au 30/12/2004	SWS	Révision du frein et remplacement du distributeur.
16/1/2015 au 23/1/2015	Joseph Meyer, Rheinfelden	Intervention suite à incident de frein le 12/1/2015 . Réparation d'essieu et du frein.

Dates	Atelier ou prestataire intervenu	Motif et nature de l'intervention
10/6/2015 au 30/6/2015	Waggonwerk Breehl	Intervention pour remplacement et modification des semelles en composite LL.
21/6/2016 au 18/7/2016	LORMAFER	Intervention suite à incident de frein le 2/5/2016 avec maintien d'un serrage en ligne et indice de surcharge thermique. Remplacement d'un axe de timonerie et d'une paire de semelles. Contrôle et jaugeage des essieux. Peinture des voiles de roue. Essai de frein simplifié.
29/9/2016 au 04/10/2016	SNCF Gevrey	Intervention suite à incident de frein le 31/8/2016 . Le frein ne serre pas lors de l'essai de frein qui a suivi.
21/1/2017 au 21/4/2017	Ateliers de Joigny	Révision intermédiaire de périodicité 4 ans (G4.8)
22/08/17	SNCF Langres	Intervention suite à incident de frein avec colorations thermiques des roues le 4/8/2017 . Contrôle et jaugeage des essieux. Peinture des voiles de roue.
du 15/10/18 au 08/11/18	AT Joigny	Nouvelle intervention suite à l'incident précédent. Remplacement des quatre essieux. Contrôle visuel du système de frein (timonerie, tuyauterie) et réparation du réservoir d'air. Essai de frein simplifié.
26/07/19	-	Détérioration des roues avec alarme « boîte chaude » et « frein serré ». Accident objet du présent rapport.

Le wagon a ainsi connu cinq incidents de frein au total en cinq ans (le dernier lors de l'accident), plusieurs conduisant à des indices de surcharge thermique. Des interventions curatives lourdes en atelier ont été nécessaires avec des immobilisations parfois longues, allant jusqu'au remplacement de l'ensemble des essieux.

La fréquence des incidents, avec récurrence du défaut de serrage intempestif, est très élevée pour un unique wagon. Ces incidents sont des précurseurs qui confirment à notre sens l'hypothèse d'un dysfonctionnement fugitif affectant la commande de freinage et donc le distributeur.

Les essais simplifiés de frein se sont avérés pour autant concluants en sortie d'atelier, chaque fois qu'un tel essai a été effectué. Seul l'essai au banc du distributeur, réalisé par deux fois à la suite de l'accident du 26 juillet 2019, a décelé une non-conformité du distributeur au réarmement.

Concernant le distributeur, celui-ci a été posé sur le wagon en décembre 2004. Sa marque de révision indique 11 03 FFU. Il a donc été révisé en novembre 2003 à l'atelier de Fulda en Allemagne.

Le guide de maintenance des wagons, dit « guide VPI » qui constitue une référence pour la profession, indique que le distributeur et les organes pneumatiques doivent être déposés si le cycle de révision de 15 ans a été dépassé lors d'une révision cyclique du wagon. Le détenteur a appliqué cette règle. Ici, le distributeur avait 13 ans et 5 mois lors de la dernière révision du wagon de périodicité 4 ans (G4.8) en avril 2017 à l'atelier de Joigny.

3.8 - Conclusion intermédiaire sur la cause de l'accident

L'état d'altération des quatre roues du bogie 2, situé à l'avant du wagon avarié, témoignent d'un échauffement des roues dépassant les 800 °C à leur pourtour. Les roues du bogie 1 ont subi également une élévation thermique quoique moindre. Les boîtes de roulement des essieux sont indemnes. Il peut être affirmé que le wagon a été soumis à un serrage intempestif de ses freins.

Les expertises des équipements de freinage font apparaître que la seule hypothèse identifiable de serrage intempestif est imputable à un défaut de fonctionnement du distributeur, très vraisemblablement lors du desserrage qui a suivi l'essai dynamique de frein, aux environs du PK 124. L'analyse de l'historique d'utilisation et de maintenance du wagon a confirmé que le wagon était équipé d'un distributeur ancien et que de fréquents signalements pour incident de frein avaient été répertoriés par le passé.

Les constats réunis à ce stade permettent d'esquisser le scénario plausible suivant des événements conduisant à l'accident :

1. À la suite de l'essai dynamique de freinage en ligne qui a eu lieu aux environs du **PK 123**, un incident de frein affecte le 4^e wagon du convoi. Le non-réarmement du distributeur de frein du wagon maintient le serrage des freins du wagon.
2. Pendant ce serrage prolongé et, alors que le train reprend sa vitesse, le frottement des semelles sur les roues chauffe le pourtour des roues.
3. Sous l'effet conjugué des sollicitations thermiques et mécaniques, une désagrégation des semelles en matériau composite se produit ainsi que des pertes significatives de matière sur la jante des roues.
4. Les projections de matière chaude en provenance des semelles et des roues provoquent des incendies le long du parcours, le premier survenant au **PK 136**.
5. Sur le 2^e essieu du wagon, la perte de matière des jantes se conjugue avec une élévation de température produisant un effet de forgeage des jantes sur le rail, qui conduisent à un abaissement de la hauteur de l'essieu et aux heurts des détecteurs de signalisation en voie ainsi que des platelages de passage à niveau. Les premiers heurts se produisent au **PK 147**.
La dégradation significative de la table de roulement des roues, et la déformation du plan de roulement en résultant, conduisent aussi à un martèlement répétitif du rail après le **PK 148,8**, suivi un peu plus tard d'un blocage de la roue avec enrayage.
6. Sur le bogie avant (n° 2), le maintien de l'effort de serrage conjugué aux vibrations engendrées par les trépidations des roues déformées sur le rail, le tout sous haute température, disloque la timonerie.
En effet, en présence d'un frein bloqué et au moment où les roues se déforment et commencent à vibrer, la timonerie encaisse un maximum de chocs. Elle constitue une sorte de point dur entre les roues et le châssis du bogie (et sa lourde charge) qui ne sont par ailleurs reliés que par la suspension. Les conséquences de la reprise des chocs sont en ligne avec les dommages observés (rupture des axes sur le support de timonerie, du cadre, des triangles).
Des semelles sont perdues à partir du **PK 148**. Plusieurs pièces massives (triangles de frein, axes) se dispersent à partir du **PK 150**. L'effort de serrage ne s'exerce alors plus.
7. Les pièces perdues heurtent et avarient en tombant les parties basses du wagon (axes d'essieu, régleur, tuyauterie), coupant notamment l'alimentation du cylindre de frein. Son action n'était toutefois déjà plus efficace avec la dislocation de la timonerie.
8. Le train est alarmé « danger », pour boîte chaude et frein serré à Payns au **PK 154,4**. Il est arrêté au premier signal.

9. À l'arrêt, au **PK 160,5**, le conducteur constate les dommages et la persistance d'une fuite sur le 4^e wagon. La fuite provient de la rupture de la conduite raccordée au réservoir auxiliaire qui continue malgré tout d'être alimentée en air. Il y a en effet, à l'intérieur du distributeur, un circuit qui raccorde directement la conduite générale au réservoir auxiliaire par l'intermédiaire d'un clapet anti-retour, maintenant durablement en pression le réservoir.

Il est légitime de s'interroger dans ce scénario sur la raison de l'hétérogénéité de la dégradation des quatre essieux alors qu'ils ont tous été soumis au même effort de serrage intempestif. Ainsi, le 2^e essieu du bogie avant présente des roues très dégradées, hors d'usage, alors que le 1^{er} essieu a une roue avec amorce d'un usinage. Pour le bogie arrière, les dégradations ne concernent que les semelles.

Les dommages proviennent d'une interaction défavorable, sous frein bloqué, entre les semelles et les roues. À l'observation de l'état des semelles et des roues, nous pouvons faire les observations suivantes :

- La désagrégation des semelles est irrégulière. Entre un état nominal et une désagrégation complète, la semelle semble passer par plusieurs états : fissurées, partiellement cassée, cassée et totalement cassée (voir figure 30). Lorsque ce processus de désagrégation s'amorce, la (ou les) semelle(s) dégradées appuient sur la roue avec une surface moindre qu'à l'origine. L'effort de serrage restant constant, la pression de contact augmente en proportion. Sous le double effet d'augmentation de la pression et de la température, il s'initierait un emballement divergent, avec dégradation à la fois des semelles et des roues. Le processus de dégradation connaîtrait ainsi un point de bifurcation à partir du moment où une ou plusieurs semelles commencent à perdre de leur matière.

L'initiation de ce processus dépend beaucoup de la manière dont les semelles vont commencer à se désagréger, avec plus ou moins de temps et avec plus ou moins de perte de matière. Il existe un certain aléa sur la survenue de l'emballement et donc sur les roues qui sont les plus concernées.

- Le wagon comprenait deux types d'essieu : BA004 (essieux 1/2 et 5/6) et 9071 (essieux 3/4 et 7/8). Les dégradations la plus importante concerne les deux roues d'un même essieu, le 5/6, de type BA004. Ses roues sont de jantes moins massives que celles des essieux 9071 et sont connues pour leur thermo-sensibilité (ce point sera abordé en § 3.11). L'essieu 5/6 était aussi à l'origine plus usé que son semblable l'essieu 1/2, avec une épaisseur de jante de 4,2 mm inférieure. L'échauffement des roues aurait ainsi pu être plus rapide sur cette jante plus fine, la capacité thermique y étant plus faible. Le début d'usinage amoindrit encore plus l'épaisseur de la jante et accentue cette sensibilité à l'échauffement.

Nous remarquons cependant que la troisième roue usinée, quoiqu'avec des dégradations moindres, n'est pas de type BA004 mais de type 9071.

Ainsi, deux composantes (aléa sur la désagrégation des semelles et sensibilité de la roue) pourraient entrer en jeu en se combinant pour justifier des dégradations aussi différenciées.

Au-delà de ces explications sur les circonstances de l'accident, il reste que les incidents de frein n'ont, de tout temps, pas été des événements de sécurité rares. Comme vu au § 2.6, la base d'incidents de l'EPSF recense sur l'année 2018, 320 événements de freins qui ne sont généralement pas critiques. Les conséquences se limitent à des dommages superficiels aux roues et aux semelles de frein, voire aux porte-semelles. Le niveau des dégradations observées sur le train 60815 est, dans un passé récent, très singulier.

Afin de mieux comprendre, à la fois la particularité des conséquences du blocage des freins et les facteurs ayant pu influencer l'ampleur des dégradations, nous avons prolongé les investigations en procédant à des compléments sur les deux sujets suivants :

- la vérification des exigences prescrites par les règles d'homologation des semelles LL, notamment vis-à-vis du risque de frein serré ;
- l'exploitation du retour d'expérience d'évènements apparentés.

3.9 - La tenue des semelles de frein de type « LL » au frein serré

Le premier processus d'autorisation de l'emploi de semelles LL sur des wagons de fret a été initié au niveau européen en 2005. Ce processus n'a toutefois pas abouti en raison de résultats d'essais insatisfaisants.

Un second processus a débuté en 2009, avec la mise en place d'un train expérimental, « l'Europe train », dans l'objectif d'accélérer les essais sur les semelles LL. Ce processus a permis de conclure et de définir les conditions d'autorisation de ces semelles. Ces conditions ont été formalisées et intégrées dans la révision de la spécification technique d'interopérabilité (STI) applicable aux wagons, approuvée par le règlement 321/2013 de la Commission européenne du 13 mars 2013.

La STI 321/2013, dans son annexe G fournit la liste des semelles de frein composites pleinement approuvées pour le transport international, liste publiée sur le site internet de l'Agence de l'Union européenne pour les chemins de fer (European Union Agency for Railways – **ERA**)⁵. Cette liste reprend l'annexe M de la fiche UIC⁶ 541-4 relative aux conditions générales d'évaluation de conformité des semelles composites. La liste comprend les modèles de semelles qui ont fait l'objet d'un processus de validation lui-même explicité dans cette fiche UIC 541-4.

Les semelles équipant le wagon accidenté 33 81 7837 835-6 sont toutes de modèle IB 116* UIC, de marque Becorit (fabrication en semaine 46 de l'année 2014 pour celle donnée en figure ci-dessous). Elles ont reçu le certificat UIC n° B-008/2013-05 en date du 21 mai 2013. Elles bénéficient d'une autorisation d'emploi complète, valable pour une configuration de sabot donnée et pour des roues dont le diamètre d'usure est supérieur à 840 mm. Ces conditions étaient respectées d'après les données recueillies sur le wagon.



Figure 35 : le modèle de semelles équipant le wagon accidenté

La conformité donnée par l'UIC signifie que le modèle de semelle répond aux critères d'acceptation de la fiche UIC 541-4 et qu'il a subi un programme d'essais comprenant des essais au banc, un essai au « lancer » sur wagon et un essai en service, essais définis dans ladite fiche.

5 L'Agence de l'Union européenne pour les chemins de fer dont le siège est à Valenciennes a la double mission de garantir un niveau élevé de sécurité et d'interopérabilité ferroviaires en Europe.

6 Union internationale des chemins de fer

Les essais au banc comprennent une vérification particulière de simulation de « frein bloqué » (essai numéroté A6). L'essai doit simuler un incident de freinage à 100 km/h avec maintien d'une force d'application constante pendant 60 minutes sur une roue de 870 mm. L'usure de chaque semelle est limitée à 16 mm, la température à 60°. Les semelles IB 116* UIC ont subi avec succès le programme d'essais A6.

A.6.1 - Programme d'essais A6				
Semelles	organiques ou frittées			
Disposition semelles	2 x Bg (2 semelles x $320 \times 80 \begin{pmatrix} +1 \\ -2 \end{pmatrix}$ mm) ou 2 x Bgu (4 semelles x $250 \times 80 \begin{pmatrix} +1 \\ -2 \end{pmatrix}$ mm)			
Type de roue	Conforme à la fiche UIC n° 510-5 (diamètre intérieur de la jante 820 mm)			
Diamètre de la roue	$870 \begin{pmatrix} +5 \\ -0 \end{pmatrix}$ mm . Le diamètre exact doit être indiqué dans le rapport d'essais			
Freinage N°	V	F _B	θ ₀	Remarques
	[km/h]	[kN]	[°C]	
Rodage	70	-	20-80	Freinage de maintien dissipant 25 kW en vue du rodage de la semelle pour obtenir une portée de 80 % minimum (n cycles de 45 minutes chacun)
Incident de freinage	100	9 kN (K) 24 kN (LL)	20-60	Freinage de maintien avec une force d'application constante pendant 60 minutes

Figure 36 : extrait du programme d'essai A6 selon la fiche UIC 541-4

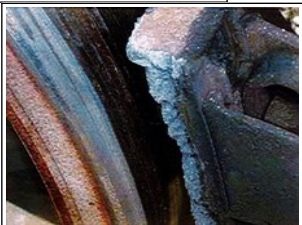
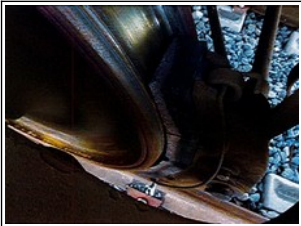
Nous avons toutefois été surpris de constater, lors de l'enquête, l'existence d'une différence entre le comportement attendu des semelles (vérifié lors de l'essai de l'homologation) et leur comportement réel, différence qui, nous allons le voir, est avérée dans plusieurs incidents de frein impliquant des wagons équipés de semelles LL. Nous présenterons ces incidents au chapitre suivant.

Nous nous demandons légitimement si l'essai de la fiche UIC est suffisamment représentatif de certaines situations accidentelles de freinage avec des semelles LL. Le choix de plusieurs paramètres, qui influencent le résultat, semblent dans l'essai en première approche discutable comme le type de roue (non précisé dans l'essai) et le diamètre des roues (870 mm dans l'essai pour 840 mm autorisés). Il semble aussi, selon l'analyse de l'accident présentée dans ce rapport, qu'une perte partielle de matière d'une semelle puisse initier une interaction divergente entre semelle et roue, or la possibilité d'une perte initiale de matière n'est pas considérée dans l'essai. Enfin nous nous demandons si l'effort de serrage des semelles (24 kN dans l'essai) ne devrait pas envisager une certaine plage de variabilité, certaines valeurs de serrage pouvant peut-être présenter plus de sensibilité que d'autres.

Il semblerait souhaitable de vérifier la robustesse des critères techniques retenus pour l'essai de comportement au frein bloqué valable pour l'homologation.

3.10 - Les incidents de frein aux conséquences comparables

Le tableau ci-après récapitule les incidents que l'on peut rapprocher de celui du train 60815, identifiés en France par le BEA-TT depuis l'ouverture de l'enquête technique sur l'accident du train 60815.

12 juin 2020 à Leucate-La Franqui (Aude) Le train fret SNCF 30004 parti du Boulou, constitué de 28 wagons porte-containers, est arrêté avant Leucate – La Franqui suite à cinq départs de feu sur son parcours entre Perpignan et Salses-le-Château. Les jantes des roues d'un essieu du 3^e wagon de queue (n° 37 80 455 6594-2) ont chauffé et présentent un creusement des tables de roulement. De nombreuses semelles sont manquantes, cassées ou désagrégées. Le train avait parcouru 60 km depuis son départ.	 
21 juillet 2020 à Forbach (Moselle) Un wagon-citerne de marchandise dangereuse en provenance de Worms en Allemagne est arrêté après son passage à Forbach où il a été détecté un dégagement de fumée et des étincelles. Les roues du wagon (n° 33 80 7819 083-6) présentent un début de creusement associé à une dégradation des semelles. Le train avait parcouru 130 km depuis son départ. Les freins du wagon étaient serrés.	 
9 août 2020 à Montauban (Tarn-et-Garonne) Le train parti du triage de Saint-Jory à Toulouse, et en direction du triage d'Hourcade à Bordeaux, déclenche des départs de feu avant et après Montauban. 25 ha de terrain sont incendiés. Le wagon-citerne (n° 33 87 7813 928-1) chargé de gaz de pétrole liquéfié (GPL) présente un creusement des tables de roulement associé à une dégradation des semelles.	 

Les circonstances de ces incidents de frein présentent des constantes proches de celle de l'accident de Troyes :

- l'élévation rapide en quelques kilomètres de la température des jantes et des semelles de frein suite à la survenue d'un incident de frein avec serrage intempestif prolongé en ligne ;
- la désintégration progressive des semelles avec rupture, désagrégation / fusion du matériau, accompagnée de l'amorce d'un processus de creusement par abrasion des roues ;
- la survenue de ces effets sur des wagons en charge de tout type mais équipés de semelles de frein en matériau composite LL « à faible coefficient de frottement ».

Au-delà de la conséquence de déclenchement d'incendies multiples aux abords de la voie en raison du rejet de matière chaude (incendies qui sont relativement courants pour un incident de frein en période de sécheresse), ces événements présentent une caractéristique nouvelle et particulièrement dangereuse pour la sécurité ferroviaire qui est le creusement par usinage des tables de roulement des roues avec formation d'une gorge. Cette nature de détérioration peut créer des dommages à la voie comme ce fut le cas à Troyes, et pourrait conduire à des déraillements graves au passage des appareils de voie.

Il peut être ajouté à cette liste d'incidents sur le réseau français que l'EPSF a constaté dans ses contrôles opérationnels des fissurations de semelles de type LL (fissuration dans le sens de la circonférence de la roue – défaut répertorié au § 3.2.2 de l'annexe 9 du CUU). L'EPSF relève également la récurrence d'importantes déformations sur les tables de roulement de roues ayant des semelles composites, sur plusieurs types de wagon (céréales, granulats).

Au-delà des frontières françaises, un incident de même nature que l'accident de Troyes s'est produit aux Pays-Bas. Il a eu lieu près de la ville de Breda en 2016.

27 mai 2016 à Breda (Pays-Bas)

Le train fret 47606, constitué de 20 wagons, est arrêté avant Breda suite au déclenchement de départs de feu sur son parcours entre Roosendaal et Breda. D'importants dégâts sont constatés sur le 17^e wagon de transport de marchandises dangereuses (n° 37 80 7809 458-1) à la suite d'un incident de frein serré : les semelles du wagon ont été brûlées et la bande de roulement des 8 roues du wagon a été déformée, avec pour certaines un creusement d'un profond sillon.



Cet incident a fait l'objet, en février 2017, d'une remontée d'alerte à l'Agence de l'Union européenne pour les chemins de fer (ERA) par l'« Inspectie Leefomgeving en Transport » (ILT) qui est l'organisme ayant le rôle d'autorité nationale de sécurité ferroviaire aux Pays-Bas. Cet incident s'inscrivait dans une série d'autres incidents du même type aux Pays-Bas.

À la suite de l'alerte hollandaise, l'ERA a initié un « JNS » (Joint Network Secretariat) qui est un groupe de travail chargé d'organiser l'échange d'informations et la recherche de solutions entre les acteurs du monde ferroviaire pour traiter de risques importants. Il était intitulé « JNS wagon braking systems » (systèmes de freinage de wagon).

Deux réunions du groupe se sont tenues en 2018 et 2019. Il en a été conclu que les incidents de freinage étaient extrêmement complexes et que les informations disponibles sur tous les cas analysés ne suffisaient pas à déterminer une cause racine. La discussion a mis en évidence de multiples causes : défaut du distributeur, mauvaise qualité des semelles, etc. Aucune mesure d'atténuation concrète immédiatement applicable du risque n'a été identifiée. Le groupe de travail a été fermé depuis, dans l'attente de plus amples informations.

Considérant que la problématique des dégradations de roue en cas de frein serré et d'emploi de semelles « LL » a déjà fait l'objet de ce travail d'exploration dans le cadre européen, le BEA-TT n'a pas investigué plus loin sur les raisons pouvant expliquer l'écart observé entre le comportement supposé des semelles, vérifié lors de l'homologation, et sa réalité dans ces incidents qui montrent de multiples effritements de semelles et creusements de sillons dans les roues.

Cet écart présente cependant un caractère très dangereux pour la sécurité ferroviaire et le BEA-TT appelle de ses vœux à la reprise des travaux européens et à l'exploration de la problématique dans un objectif d'atteindre plus de résultats pour la sécurité du système ferroviaire. Nous y reviendrons en conclusion.

3.11 - Les ruptures de roue en lien avec l'emploi de semelles LL

Un autre type d'accidents survenu sur le réseau européen peut être rapproché des détériorations de table de roulement présentées ci-dessus. Il s'agit des ruptures de roue survenues en ligne en 2017 à Giulianova en Italie et à Aubange en Belgique.

Pour ne citer que l'accident d'Aubange⁷, celui-ci a connu le déraillement d'un wagon suite à la rupture d'une des roues. De fissures et des criques thermiques s'étaient développées dans la roue. Elles avaient montré l'insuffisante résistance de la roue aux sollicitations thermiques et aux cycles de ces sollicitations imposés par des cycles de freinage trop intenses et/ou une utilisation d'un couple roues/semelles inadapté. Le wagon était équipé de semelles LL.

À la suite de ces accidents, un « JNS broken wheels » (distinct de celui évoqué plus haut) a été initié au niveau européen dont les travaux ont été relayés par l'EPSF auprès des opérateurs français.

Le 6 septembre 2017, l'EPSF relayait par courrier auprès des opérateurs une première série de mesures à court terme décidées par le JNS à savoir le renforcement des inspections en exploitation afin de détecter les surcharges thermiques, et celui des contrôles en maintenance pour les types de roue BA 314/ZDB29 et BA 004 considérées comme non thermostables. Ces recommandations ont été mises en application par VTG.

Le 26 juin 2020 (postérieurement à l'accident de Troyes), l'EPSF relayait les mesures finales du JNS qui complétaient les mesures initiales. L'utilisation des roues BA 004 était alors restreinte à un diamètre minimum de 860 mm, diamètre dont s'approchaient les diamètres des roues du wagon 33 81 7837 835-6, tout en étant néanmoins supérieures.

Les mesures prescrites par le JNS « broken wheels » ont donc renforcé les exigences de tenue aux effets thermiques des roues freinées par semelles LL. On peut toutefois se demander si ces mesures seront assez contraignantes pour prévenir du risque de comportement au frein bloqué de certains matériels mis en évidence dans le présent rapport, les roues en jeu dans l'accident respectant les critères.

⁷ Le rapport d'enquête de sécurité sur le déraillement d'un train de marchandises Lineas à Aubange, le 19 mai 2017, est consultable en français sur le site de l'organisme d'enquête sur les accidents et incidents ferroviaires de Belgique à l'adresse : <https://www.rail-investigation.be/>

4 - Analyse du déroulement de l'accident

Vendredi 26 juillet 2019, le train fret 60815 de l'entreprise ferroviaire Europorte, constitué de 20 wagons-citernes chargés d'huile végétale relie les établissements Saipol au Mériot dans l'Aube à Gand en Belgique.

Au départ, un agent visiteur effectue la reconnaissance d'aptitude au transport et ne relève aucune anomalie. À 15 h 04, le conducteur et l'agent au sol effectuent l'essai de frein complet du train qui est concluant. Le train est alors acheminé par l'embranchement particulier de Saipol en gare de Nogent-sur-Seine (PK 110,350 de la ligne Paris-Troyes).

À 16 h 01, le train est mis en mouvement vers les voies principales en direction de Troyes. L'essai de roulage par le conducteur et l'observation au défilé par l'agent au sol sont conformes.

À 16 h 14, au PK 123,590, le conducteur effectue l'essai de frein dynamique et commande le serrage du freinage pneumatique. Au PK 123,860, ayant constaté une baisse normale de vitesse, il commande le desserrage du frein pneumatique.

L'enquête a établi que les freins du 4^e wagon ont été à ce moment maintenus serrés, très probablement parce que le distributeur de frein du wagon ne s'est pas replacé à l'état de frein desserré.

Au PK 124,390, le conducteur reprend la traction.

À 16 h 21 au PK 128,700, le train passe en gare de Romilly-sur-Seine. Deux agents circulation se lèvent de leur poste de travail et observent le train en marche, sans détecter d'anomalie sur le train. Il est possible que le soleil qui leur faisait face ait toutefois gêné leur observation. Les caractéristiques des semelles de frein LL qui équipaient le wagon, à faible frottement et à faible bruit, ont peut-être aussi atténué les émissions sonores perceptibles par les agents.

Le blocage des freins du 4^e wagon conduit à une montée en température des semelles et des jantes des roues. Les semelles en matériau composite LL s'effritent et les bandes de roulement de certaines roues (n° 5, 6 et 7) se creusent de sillons.

De la matière en incandescence est projetée sur la plateforme et aux abords alors que le temps est sec. Au PK 136,150, en approche de l'ancienne halte de Châtres, un premier incendie se déclare suivi de quatre autres jusqu'au PK 154,600 après l'ancienne halte de Payns. Sur l'un d'eux, le feu se propage à la maison d'un riverain.

Le creusement de sillons profonds sur les roues 5 et 6 du même essieu produit une descente de l'essieu et des dommages d'arrachement des platelages de six passages à niveau du PK 146,950 et 157,500. Dix-huit détecteurs électromécaniques de commande sont dégradés, provoquant la fermeture prolongée de ces passages à niveau.

Entre les PK 148,800 et 150,450, les deux files de rail sont poinçonnées avec un pas régulier correspondant à la circonférence des roues 5 et 6 désormais profondément creusées. Ensuite l'essieu de ces deux roues s'enraye.

Entre ces mêmes PK, des armatures et clavettes de semelles tombent en voie. La timonerie du wagon, toujours maintenue serrée, est soumise à de fortes sollicitations thermiques et mécaniques, aggravées pour le bogie avant par le martèlement des roues sur le rail. La timonerie cède sur ce bogie au PK 150,240 avec la perte d'un triangle de frein et d'axes de timonerie. La perte d'un autre triangle suit 2,5 km plus loin. L'effort de serrage des freins ne s'exerce alors plus.

La perte de pièces du matériel roulant s'accompagne de multiples dommages sur le wagon en raison de choc de ces éléments sur le wagon lors de leur chute en voie à 100 km/h. La tuyauterie d'alimentation du réservoir auxiliaire du wagon est rompue, provoquant une fuite d'air, fuite moindre toutefois que celle que produirait la coupure complète de la conduite générale qui aurait stoppé le train.

À 16 h 35 à l'ancienne halte de Payns située au PK 154,406, le train passe sur un détecteur de boîte chaude et de frein serré qui détecte des températures anormalement élevées sur le 4^e wagon. Le détecteur renvoie une alarme « danger » boîte chaude et frein serré au poste d'aiguillage de Troyes.

L'agent-circulation reçoit cette alarme. Il contacte le conducteur du train et le prévient qu'il l'arrêtera au premier signal rencontré, c'est-à-dire le signal C3 implanté au PK 160,985 à l'entrée de l'accès au faisceau de voies de service de Barberey-Saint-Sulpice. L'agent-circulation prend aussi les mesures de rétention des circulations sur la zone.

À 16 h 37 après avoir franchi le signal d'annonce du C3, le conducteur du train commande un freinage et arrête le train devant le signal C3. Il part par la suite à la visite du train et découvre les dommages sur le 4^e wagon. Plus de 20 minutes se sont écoulées depuis la rupture de la timonerie et les roues ne sont plus chaudes au point de devoir s'écarter.

Le relevage du wagon intervient le 27 juillet à 19 h 30, avec un acheminement de celui-ci au faisceau de Barberey-Saint-Sulpice. La circulation des trains reprend, avec des limitations de vitesse pour la voie avariée, le 28 juillet à 0 h 50.

5 - Analyse des causes et facteurs associés, orientations préventives

5.1 - L'arbre des causes

Les investigations conduites permettent d'établir le graphique ci-après qui synthétise le déroulement plausible de l'accident et identifie les causes et les facteurs associés mis en évidence par le BEA-TT.

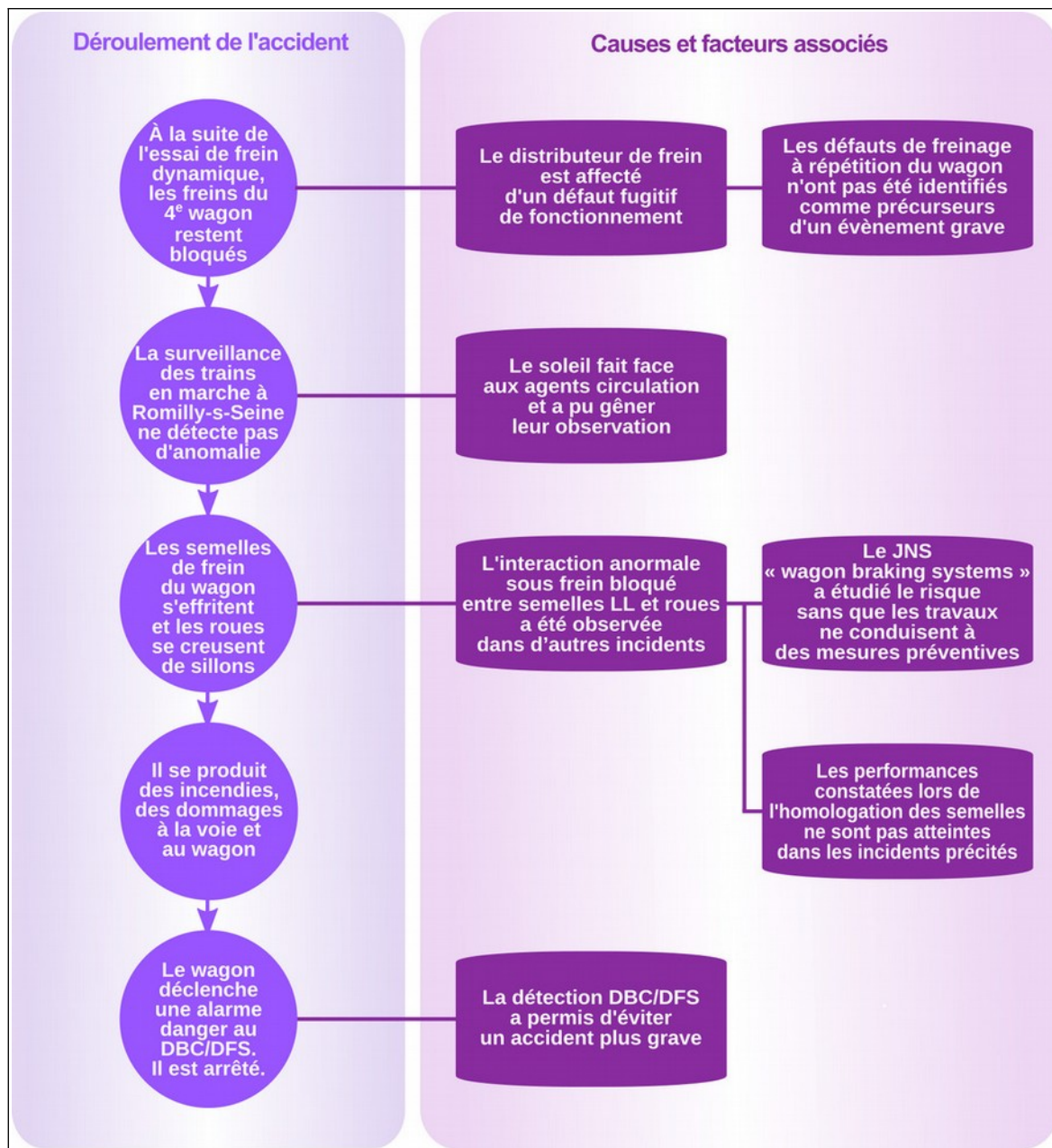


Figure 37 : l'arbre des causes de l'accident

5.2 - Les causes de l'accident

La cause origine identifiée de la détérioration des tables de roulement des roues et des dommages associés est un incident de non-desserrage des freins affectant le 4^e wagon. Le maintien en serrage a très vraisemblablement pour origine un dysfonctionnement intempestif du distributeur de frein du wagon. Celui-ci aurait continué à délivrer la pression de serrage aux freins du wagon à la suite de l'essai de fonctionnement du freinage mené par le conducteur en ligne. Il n'est pas exclu qu'un autre scénario se soit produit mais celui-ci n'a pu être mis à jour en cohérence avec les dommages observés.

Un incident de frein est un type d'incident fréquent sur le réseau. Dans le cas présent, l'enquête identifie que les conséquences ont été potentiellement aggravées par une interaction défavorable entre les semelles de frein et les roues du wagon. Les semelles sont en matériau composite à faible coefficient de frottement (type LL) et, à haute température, leur interaction avec les roues n'aurait pas eu le comportement escompté tel que vérifié lors de leur homologation. Cette interaction défavorable a été observée dans d'autres incidents.

La détection de frein serré opérée sur la ligne a permis d'arrêter le train à temps et d'éviter un accident plus grave comme un déraillement. En revanche, la surveillance des trains en marche effectuée sur le parcours du train n'a pas détecté l'avarie.

Deux facteurs sont identifiés comme ayant contribué à l'accident :

- le wagon accidenté avait connu des incidents répétitifs de non-desserrage intempestif par le passé, annonceurs du dysfonctionnement du distributeur, sans que l'entité en charge de l'entretien ait instruit cette série d'incidents comme précurseur d'un événement plus grave ;
- l'interaction défavorable sous frein bloqué entre des semelles composites LL et les roues, observée dans d'autres incidents, a été évoquée en groupe de travail au niveau européen, sans que les travaux ne permettent de conduire à des résultats et mesures préventives concrètes.

Les orientations préventives pour éviter le renouvellement de ce type d'accident sont à rechercher dans les deux domaines suivants :

- l'amélioration du système de gestion des avaries de l'entité en charge de l'entretien pour une meilleure sécurité d'utilisation des wagons ;
- l'exploitation du retour d'expérience des incidents de frein bloqué avec des semelles LL et la vérification du processus d'homologation.

5.3 - Le management de la sécurité par l'entité en charge de la maintenance

La cause origine identifiée de l'accident est un incident de non-desserrage des freins affectant le wagon.

Parmi les organes de frein, le distributeur du wagon, soumis à un test dans le cadre de l'enquête, a révélé qu'il était affecté d'une anomalie quant à sa capacité de réarmement lors d'une remontée de pression de la conduite générale.

L'analyse de l'historique d'exploitation et de maintenance du wagon a montré que le wagon roulait peu et qu'il subissait de fréquents passages en atelier en raison d'anomalies pour serrage des freins. Le wagon a ainsi connu cinq avaries de frein sur les cinq années qui ont précédé l'accident objet du présent rapport. Plusieurs de ces avaries

ont conduit à des déformations de roues et des indices de surcharge thermique, nécessitant pour l'une d'elles le remplacement de l'ensemble des essieux.

Le BEA-TT s'étonne qu'une répétition aussi forte d'incidents sur un même wagon, témoignant de dysfonctionnements fugitifs affectant la commande de freinage (et donc potentiellement le distributeur), n'ait pas conduit à un traitement particulier.

Dans la gestion de flotte par VTG, les cumuls d'incident sont analysés globalement sur la flotte, mais ne semblent pas l'être wagon par wagon. Ceci a facilité le non-traitement du défaut du distributeur du wagon accidenté.

Le maintien d'un haut niveau de sécurité passe par l'identification des précurseurs et le déclenchement d'actions adaptées pour prévenir des répétitions avec un événement plus grave. Les actions du mainteneur auraient pu, à titre d'illustration dans le cas présent, être une expertise du wagon, la réalisation d'un essai complet du distributeur (les sorties d'atelier évoquées ci-dessus ne s'étaient accompagnées que d'essai des freins simple), voire une mise sous surveillance par capteurs...

Il appartient à l'entité en charge de la maintenance de renforcer ses processus de management de la sécurité sur ce point.

Ainsi, le BEA-TT émet la recommandation et l'invitation ci-après.

Recommandation R1 adressée à VTG :

Mettre en place une gestion des anomalies répétitives à l'échelle de chaque wagon ou de composant de wagon, et statuer sur les modalités de définition des actions à engager dans ce cas pour garantir la sécurité d'un maintien du matériel en exploitation.

Le BEA-TT invite l'ensemble des entités en charge de l'entretien (ECE) à mettre en œuvre la recommandation R1.

5.4 - Le retour d'expérience versus l'homologation des semelles LL

Les dommages de l'accident ont été notablement amplifiés par rapport à un classique incident de frein relativement fréquent sur le réseau. Cette amplification des conséquences semble liée à l'emploi de semelles composites LL avec, en cas de blocage des freins, des effets plus agressifs sur les roues que lorsque des semelles en fonte sont utilisées, semelles en fonte qui sont amenées à être remplacées par les semelles LL.

Les semelles équipant le wagon accidenté sont de modèle IB 116* UIC, de marque Becorit. Elles ont reçu une certification par l'UIC et font l'objet d'un suivi de contrôle qualité par le fournisseur.

Deux possibilités peuvent être envisagées pour expliquer l'agressivité des semelles :

- Soit il existe une défaillance dans le système de contrôle qualité du fournisseur de semelles, qui pourrait expliquer des non-conformités de lots de semelles délivrées par rapport au produit homologué.
- Soit il y aurait une insuffisance concernant les critères techniques retenus lors de l'homologation en ce qui concerne l'essai de comportement au frein serré.

La première possibilité ne peut être écartée. Aussi le BEA-TT émet-il la recommandation suivante.

Recommandation R2 adressée à VTG :

Vérifier, auprès des fournisseurs de semelles de frein « LL », que leur système de contrôle qualité garantisse la conformité des produits délivrés au type homologué.

Le BEA-TT invite l'ensemble des entités en charge de l'entretien (ECE) à mettre en œuvre la recommandation R2.

Le BEA-TT a néanmoins identifié trois autres incidents de freinage en France, sur des wagons à semelles LL, ayant conduit à des effets comparables quoique moindres. L'EPSF note également des fissurations de semelles de type LL et d'importantes déformations sur les tables de roulement de roues ayant des semelles composites.

Un incident comparable à l'accident de Troyes a eu lieu aux Pays-Bas près de la ville de Breda en 2016, et d'autres également dans ce même pays. Au moment de la publication de ce rapport, il a été porté à notre connaissance un nouvel accident de déraillement suite à l'abrasion de tables de roulement de roues avec emploi de semelles LL, survenu en Italie.

La diversité de survenue des incidents (qu'elle soit géographique, sur le type de wagon impliqué, sur l'entité en charge de l'entretien...) questionne de façon plus large sur les conditions d'emploi des semelles LL.

L'incident de Breda avait conduit à la mise en place d'une JNS « wagon braking systems » (systèmes de freinage de wagon) en 2018 par l'ERA. Ce groupe de travail, chargé d'organiser l'échange d'informations et la recherche de solutions entre les acteurs du monde ferroviaire pour traiter le risque, n'a toutefois pas identifié de mesure d'atténuation du risque. Le groupe de travail a été fermé depuis, dans l'attente de plus amples informations.

À la vue des dommages survenus lors de l'accident de Troyes, mais aussi de la récurrence des événements et de la gravité potentielle de ceux-ci (déraillement, implication de matières dangereuses), le BEA-TT appelle de ses vœux à la reprise de ces travaux européens.

L'ensemble de la profession s'accorde aujourd'hui à penser qu'il demeure encore une part d'inexpliqué dans ces événements. La reprise des travaux, alimentée par un retour d'expérience aujourd'hui plus nourri, doit permettre de lever les incertitudes et de mieux prévenir des risques.

Le BEA-TT émet la recommandation ci-après.

Recommandation R3 adressée à l'Agence de l'Union européenne pour les chemins de fer (ERA) :

Réactiver le Joint Network Secretariat « wagon braking systems » (systèmes de freinage de wagon) pour définir des mesures prévenant du risque de détérioration des tables de roulement par creusement dans les roues équipées de semelles LL lors d'incident de freinage.

Au-delà, la nature des dommages (effritement des semelles, abrasion des roues) questionne sur l'efficacité et la fiabilité de l'essai de comportement frein serré prévu par le processus d'homologation de ce type de semelle.

L'essai de comportement au frein serré prévu par le processus d'homologation consiste en la réalisation d'un essai sur banc. Celui-ci est prescrit par la spécification technique d'interopérabilité (STI) applicable aux wagons, approuvée par le règlement 321/2013 de la Commission européenne du 13 mars 2013, qui renvoie aux prescriptions de la fiche UIC 541-4 relative aux conditions générales d'évaluation de la conformité des semelles composites.

Le BEA-TT se demande légitimement si l'essai de la fiche UIC est suffisamment représentatif. Le choix de plusieurs paramètres qui influencent le résultat, ne semble, dans l'essai en première approche, pas assez sécuritaire (type de roue ; diamètre des roues ; prise en compte d'une perte partielle de matière d'une semelle ; force de serrage appliquée). Les dégradations observées sur l'accident de Troyes, confirmées par les constats effectués sur les autres incidents, montrent en effet un processus de désagrégation progressive des semelles qui précède et interagit avec l'apparition d'un usinage de roue. La thermo-sensibilité de la roue, et notamment le volume de la jante de celle-ci, pourrait également entrer en ligne de compte.

L'écart entre la sécurité donnée par l'essai d'homologation et les dégradations observées par le retour d'expérience doit être expliqué.

Le BEA-TT émet ainsi la recommandation ci-après concernant l'essai de frein serré du processus d'homologation des semelles LL. Dans la mesure où à terme l'Agence de l'Union européenne pour les chemins de fer pourrait remplacer la fiche UIC 541-4 par la norme NF EN 16452 (Applications ferroviaires – Freinage – Semelles de frein), le Bureau de normalisation ferroviaire est adjoint aux destinataires.

Recommandation R4 adressée à l'Agence de l'Union européenne pour les chemins de fer (ERA), à l'Union internationale des chemins de fer (UIC) et au Bureau de normalisation ferroviaire (BNF) :

Réexaminer les modalités des essais d'homologation des semelles « LL » en tirant parti du retour d'expérience sur la détérioration par creusement de la table de roulement de roue, lors d'incidents de frein serré, sur les wagons équipés de ces semelles.

Le BEA-TT invite l'EPSF à partager avec l'ERA, l'UIC et le BNF le retour d'expérience des incidents français de détérioration des tables de roulement par creusement dans les roues de wagons équipées de semelles LL.

6 - Conclusions et recommandations

Les dommages de cet accident présentent un caractère inhabituel et non aisément explicable. Parmi maintes défaillances envisagées, l'enquête technique a identifié que la cause origine de la détérioration des tables de roulement des roues serait un incident de non-desserrage des freins affectant le 4^e wagon. Le maintien en serrage a très vraisemblablement pour origine un dysfonctionnement intempestif du distributeur de frein du wagon. Celui-ci aurait continué à délivrer la pression de serrage aux freins du wagon à la suite de l'essai de fonctionnement du freinage mené par le conducteur en ligne. Il n'est pas exclu qu'un autre scénario se soit produit mais celui-ci n'a pu être mis à jour en cohérence avec les dommages observés.

Un incident de frein est un type d'incident fréquent sur le réseau. Dans le cas présent, l'enquête identifie que les conséquences ont été potentiellement aggravées par une interaction défavorable entre les semelles de frein et les roues du wagon. Les semelles sont en matériau composite à faible coefficient de frottement (type LL) et, à haute température, leur interaction avec les roues n'aurait pas eu le comportement escompté tel que vérifié lors de leur homologation. Cette interaction défavorable a été observée dans d'autres incidents.

La détection de frein serré opérée sur la ligne a permis d'arrêter le train à temps et d'éviter un accident plus grave comme un déraillement. En revanche, la surveillance des trains en marche effectuée sur le parcours du train n'a pas détecté l'avarie.

Deux facteurs ont été identifiés comme ayant contribué à l'accident :

- le wagon accidenté avait connu des incidents répétitifs de non-desserrage intempestif par le passé, annonciateurs du dysfonctionnement du distributeur, sans que l'entité en charge de l'entretien ait instruit cette série d'incidents comme précurseur d'un événement plus grave ;
- l'interaction défavorable sous frein bloqué entre des semelles composites LL et les roues, observée dans d'autres incidents, a été évoquée en groupe de travail au niveau européen, sans que les travaux ne permettent de conduire à des résultats et mesures préventives concrètes.

L'ensemble de la profession s'accorde aujourd'hui à penser qu'il demeure encore une part d'inexpliqué dans les incidents de détérioration par creusement des tables de roulement. Le BEA-TT émet ainsi certaines recommandations qui visent à porter une attention particulière au suivi de ce type d'incidents à l'avenir, et à l'animation d'une réflexion par des experts qualifiés en vue de mieux expliquer les phénomènes et de proposer des actions préventives.

Le BEA-TT émet quatre recommandations et deux invitations.

Recommandation R1 adressée à VTG :

Mettre en place une gestion des anomalies répétitives à l'échelle de chaque wagon ou de composant de wagon, et statuer sur les modalités de définition des actions à engager dans ce cas pour garantir la sécurité d'un maintien du matériel en exploitation.

Recommandation R2 adressée à VTG :

Vérifier, auprès des fournisseurs de semelles de frein « LL », que leur système de contrôle qualité garantisse la conformité des produits délivrés au type homologué.

Recommandation R3 adressée à l'Agence de l'Union européenne pour les chemins de fer (ERA) :

Réactiver le Joint Network Secretariat « wagon braking systems » (systèmes de freinage de wagon) pour définir des mesures prévenant du risque de détérioration des tables de roulement par creusement dans les roues équipées de semelles LL lors d'incident de freinage.

Recommandation R4 adressée à l'Agence de l'Union européenne pour les chemins de fer (ERA), à l'Union internationale des chemins de fer (UIC) et au Bureau de normalisation ferroviaire (BNF) :

Réexaminer les modalités des essais d'homologation des semelles « LL » en tirant parti du retour d'expérience sur la détérioration par creusement de la table de roulement de roue, lors d'incidents de frein serré, sur les wagons équipés de ces semelles.

Le BEA-TT invite l'ensemble des entités en charge de l'entretien (ECE) à mettre en œuvre les recommandations R1 et R2.

Le BEA-TT invite l'EPSF à partager avec l'ERA, l'UIC et le BNF le retour d'expérience des incidents français de détérioration des tables de roulement par creusement dans les roues de wagons équipées de semelles LL.

ANNEXES

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête



La Défense, le 2 août 2019

DECISION

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

Vu le Code des transports et notamment les articles L. 1621-2 à L. 1622-2 et R. 1621-1 à R. 1621-26 relatifs, en particulier, à l'enquête technique après un accident ou un incident de transport terrestre ;

Vu les circonstances de l'enrayage d'un essieu sur un train de fret survenu le 26 juillet 2019 entre Romilly-sur-Seine et Troyes (10) ;

décide

Article 1 : Une enquête technique est ouverte en application des articles L. 1621-2 et R. 1621-22 du Code des transports concernant l'enrayage d'un essieu du train de fret Europorte 60815, survenu le 26 juillet 2019 entre les gares de Romilly-sur-Seine et Troyes dans l'Aube.

Pour le Directeur empêché
La Secrétaire générale

Farida BABA-MABROUKI



Bureau d'Enquêtes sur les Accidents de Transport Terrestre



Grande Arche - Paroi Sud
92055 La Défense cedex

Téléphone : 01 40 81 21 72

Télécopie : 01 40 81 21 50

bea-tt@developpement-durable.gouv.fr

www.bea-tt.developpement-durable.gouv.fr

