

**RAPPORT
D'ENQUÊTE TECHNIQUE**
sur le déraillement et la perte de chargement
d'un train de fret transportant de l'éthanol
survenus le 13 mars 2017
en gare de triage de Sibelin
sur la commune de Solaize (69)

Février 2019



MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET SOLIDAIRE

MINISTÈRE
CHARGÉ DES
TRANSPORTS

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

Affaire n° BEATT-2017-03

**Rapport d'enquête technique
sur le déraillement et la perte de chargement
d'un train de fret transportant de l'éthanol
survenus le 13 mars 2017
en gare de triage de Sibelin, à Solaize (69)**

Bordereau documentaire

Organisme commanditaire : Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer (MEEM)

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

Titre du document : Rapport d'enquête technique sur le déraillement et la perte de chargement d'un train de fret transportant de l'éthanol survenus le 13 mars 2017 en gare de triage de Sibelin, sur la commune de Solaize (69)

N° ISRN : EQ-BEAT--19-1--FR

Proposition de mots-clés : transport ferroviaire, déraillement, rupture de rail, matière dangereuse

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, en déterminant les circonstances et les causes de l'évènement analysé et en établissant les recommandations de sécurité utiles. Elle ne vise pas à déterminer des responsabilités.

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

SOMMAIRE

GLOSSAIRE.....	9
RÉSUMÉ.....	11
1 - LES CONSTATS IMMÉDIATS ET L'ENGAGEMENT DE L'ENQUÊTE.....	13
1.1 - L'accident.....	13
1.2 - La situation immédiatement après l'accident.....	13
1.3 - Les secours.....	14
1.4 - Le bilan de l'accident.....	15
1.5 - L'engagement et l'organisation de l'enquête.....	15
2 - LE CONTEXTE DE L'ACCIDENT.....	17
2.1 - Le triage de Sibelin.....	17
2.2 - Le faisceau relais nord-sud et la voie 101.....	18
2.3 - Le train accidenté.....	20
2.3.1 -Les wagons-citernes.....	20
2.3.2 -Le carburant bioéthanol transporté.....	21
2.4 - La réglementation du transport des marchandises dangereuses.....	21
2.4.1 -Les principes généraux de la réglementation.....	21
2.4.2 -Le « RID ».....	22
2.4.3 -Le plan d'urgence interne du site de Sibelin et l'étude de dangers.....	23
2.5 - L'accidentologie du transport ferroviaire de marchandises dangereuses.....	23
2.6 - Le risque de rupture de rail.....	26
2.6.1 -Le nombre de ruptures de rail sur le réseau.....	26
2.6.2 -La surveillance ultrasonique des rails.....	27
3 - LES INVESTIGATIONS SUR LES CAUSES DIRECTES DE L'ACCIDENT.....	29
3.1 - Les résumés des déclarations et des témoignages.....	29
3.1.1 -Les déclarations de l'agent de conduite.....	29
3.1.2 -Les déclarations de l'agent circulation.....	29
3.1.3 -Les déclarations du chef de la brigade d'entretien de la voie.....	29
3.2 - La météorologie.....	30
3.3 - Les constats effectués sur la rame accidentée.....	30
3.3.1 -La composition du train.....	30
3.3.2 -L'enregistrement des données de conduite.....	30
3.3.3 -L'observation immédiate de la rame accidentée.....	31
3.3.4 -Les relevés de maintenance des wagons.....	33
3.4 - Les constats effectués sur la voie.....	33
3.4.1 -Les observations sur le site.....	33
3.4.2 -L'expertise métallurgique du rail file haute.....	36
3.4.3 -Les constats sur l'état de la voie.....	40

3.5 - Les relevés ultrasoniques des voies du triage de Sibelin suite à l'accident.....	42
3.6 - La simulation numérique du comportement des wagons-citernes.....	43
4 - LES INVESTIGATIONS SUR LES CAUSES INDIRECTES DE L'ACCIDENT.....	45
4.1 - Les règles de maintenance des voies de service.....	45
4.1.1 -L'organisation générale de la maintenance.....	45
4.1.2 -La surveillance de la fissuration des rails.....	46
4.1.3 -Les règles sur l'efficacité des attaches de voie.....	46
4.2 - La maintenance de la voie 101.....	47
4.2.1 -L'état de la voie diagnostiqué par l'équipe de maintenance.....	47
4.2.2 -Les travaux de remplacement de rail en maintenance corrective.....	49
4.2.3 -La demande de régénération du faisceau « nord-sud ».....	49
4.2.4 -Conclusion sur la maintenance de la voie 101.....	50
4.3 - Le dimensionnement des voies de service.....	50
4.4 - Les accidents de marchandises dangereuses sur le site.....	51
4.5 - L'audit national de 2014 sur le transport ferroviaire des matières dangereuses.....	52
4.6 - Les mesures préventives de maintenance des voies de service.....	53
4.7 - Les investigations sur la résistance des wagons-citernes.....	54
5 - ANALYSE DU DÉROULEMENT DE L'ACCIDENT.....	55
6 - L'ANALYSE DES CAUSES ET LES ORIENTATIONS PRÉVENTIVES.....	59
6.1 - L'arbre des causes.....	59
6.2 - Les causes de l'accident.....	60
6.3 - Le contrôle de la fissuration des rails sur voie de service.....	60
6.4 - L'efficacité d'attache du rail dans les courbes de faible rayon.....	61
6.5 - L'état général de l'infrastructure.....	62
6.6 - La conformité de l'installation à la réglementation.....	63
7 - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	65
7.1 - Conclusions.....	65
7.2 - Recommandations et invitation.....	65
ANNEXES.....	67
Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête.....	69
Annexe 2 : Échelle européenne de gravité des accidents industriels.....	70
Annexe 3 : Les accidents notables de transport de marchandises dangereuses.....	71
Annexe 4 : Relevé des dégâts occasionnés aux wagons-citernes.....	76
Annexe 5 : Principes de surveillance des voies de service.....	79

Glossaire

- **BARPI** : Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industriels
- **CG** : Conduite Générale de freinage parcourant l'ensemble d'un train
- **CGEDD** : Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable
- **CODIS** : Centre Opérationnel Départemental d'Incendie et de Secours
- **DREAL** : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
- **EPSF** : Établissement Public de Sécurité Ferroviaire
- **GI** : Gestionnaire de l'Infrastructure, ici SNCF réseau
- **IN 0264** : référentiel interne de SNCF Réseau décrivant « l'organisation de la maintenance des voies de service (voie courante et appareils de voie) »
- **MD** : Marchandise Dangereuse
- **ONU** : Organisation des Nations Unies
- **ORSEC** : Organisation de la Réponse de Sécurité Civile
- **PPI** : Plan Particulier d'Intervention des services de secours
- **PUI** : Plan d'Urgence Interne
- **RFN** : Réseau Ferré National
- **RID** : Règlement concernant le transport International ferroviaire de marchandises Dangereuses (Regulations concerning the International carriage of Dangerous goods by rail)
- **SA** : Soudure Aluminothermique
- **SDMIS** : Service Départemental-Métropolitain d'Incendie et de Secours, service gérant les sapeurs-pompiers sur le département du Rhône
- **SNCF** : Société Nationale des Chemins de fer Français
- **TMD** : Transport de Marchandises Dangereuses
- **VTG BA** : Groupe d'entreprises de transport et de logistique fret

Résumé

Lundi 13 mars 2017 à 4 h 05, un train de marchandises dangereuses comprenant 22 wagons-citernes chargés de bioéthanol, déraile de quatre wagons à son arrivée sur le faisceau relais nord-sud du triage de Sibelin.

Deux citernes basculent. Une autre, heurtant les citernes renversées, se perfore en deux endroits. Son contenu, très inflammable, commence à se déverser au sol.

La voie est emportée dans le déraillement sur une cinquantaine de mètres.

Les sapeurs-pompiers sont immédiatement avisés. Leur intervention va permettre de sécuriser le site vis-à-vis du risque d'incendie et de colmater la fuite de carburant en un délai de trois heures. La sécurisation complète, avec la vidange des wagons qui ont déraillé, s'achève le lendemain à 4 h.

L'accident n'a fait aucune victime. Les dommages matériels à l'infrastructure et aux wagons sont en revanche significatifs. Il n'y a pas eu de conséquence irréversible d'ordre environnemental.

La cause de l'accident est la double rupture d'un tronçon de rail sous le passage du train lourd. La première rupture est une rupture en fatigue du rail dont la fissuration était très avancée. La seconde rupture s'est produite sous l'effet des efforts de guidage des wagons dans la courbe serrée, qui se sont exercés sur un rail affaibli par la première rupture, par une fissuration en développement, et par un maintien amoindri par des attaches et traverses en mauvais état dans cette zone. Le coupon de rail isolé par les deux ruptures a pivoté latéralement sous le chargement, entraînant la sortie de voie des essieux qui sont passés dessus.

Plusieurs facteurs, liés à l'infrastructure, ont contribué à la double rupture :

- l'état de fissuration avancé du rail, et l'absence d'opération de recherche des fissures lors des opérations de maintenance ;
- l'insuffisance de maintien du rail ;
- le mauvais état général de la voie qui n'avait pas été corrigé en raison du report de travaux de maintenance.

Les secours se sont déroulés dans un contexte de non-respect de deux obligations réglementaires, concernant la réalisation d'une étude de dangers et d'un plan particulier d'intervention des services de secours sur le site, qui aurait pu perturber les conditions d'intervention des secours, mais qui n'a pas porté à conséquence.

Le BEA-TT émet deux recommandations et une invitation dans les domaines suivants :

- le renforcement des règles de surveillance de l'état de fissuration des rails sur les voies de service empruntées par des trains de marchandises dangereuses ;
- l'amélioration des règles de maintenance des voies pour une meilleure efficacité de l'attache des rails dans les zones de courbe de faible rayon ;
- le respect des obligations réglementaires relatives à la circulation des marchandises dangereuses sur le site de Sibelin.

Le BEA-TT ne formule pas de recommandation en lien avec le vieillissement de l'infrastructure et l'organisation de sa régénération, s'agissant d'une problématique bien connue pour l'ensemble du RFN et ayant déjà fait l'objet d'une recommandation dans le rapport sur le déraillement de Brétigny-sur-Orge.

1 - Les constats immédiats et l'engagement de l'enquête

1.1 - L'accident

Le lundi 13 mars 2017 à 4 h 05 du matin, le train de marchandises dangereuses n° 489241 comprenant 22 wagons-citernes chargés de bioéthanol, déraile à son entrée sur la voie 101 du faisceau relais nord-sud du triage de Sibelin situé sur la commune de Solaize.

Le conducteur constate une fuite de la conduite générale¹ (CG) entraînant le freinage du train. À l'arrêt du train, il s'aperçoit alors qu'un wagon a déraillé sur son train. Il avise le régulateur qui est en charge de la supervision des circulations sur le secteur. Celui-ci déclenche le Plan d'urgence interne (PUI) d'intervention des sapeurs-pompiers en cas d'accident de transport de marchandises dangereuses.



Figure 1 : le premier wagon qui a déraillé vu de la cabine de conduite
(en cours d'intervention des secours)

1.2 - La situation immédiatement après l'accident

Le déraillement concerne 4 wagons : les 3^e et 4^e wagons après la locomotive sont couchés sur leur flanc gauche. Ils obstruent la voie adjacente qui est la voie de circulation 1ter, à proximité des voies principales Lyon – Marseille. Les 5^e et 6^e wagons ont déraillé également mais sont encore debout.

Une fuite importante de carburant se déclare sur le 5^e wagon par deux orifices percés dans la citerne.

La voie 101, empruntée par le train, a été emportée et est détruite sur 50 mètres. La voie 1ter adjacente est également endommagée sur 30 mètres.

1 La conduite générale assure une continuité pneumatique des véhicules entre eux, et permet le freinage. La mise en action des freins est provoquée volontairement ou automatiquement par une dépression dans la conduite.



Figure 2 : les deux wagons couchés et la voie emportée

1.3 - Les secours

Le Centre opérationnel départemental d'incendie et de secours² (CODIS) est avisé à 4 h 17.

L'ensemble du trafic ferroviaire est arrêté sur la zone. La ligne à haute tension de 63 000 volts qui surplombe l'accident est coupée. L'accident dépassant les capacités de coordination du maire de la commune, le préfet active à 7 h 22 le plan ORSEC de transport de marchandises dangereuses (TMD), consistant en un commandement unique de l'organisation des secours par la préfecture. SNCF Réseau demande aussi l'activation du protocole « Transaid »³ de la zone Sud-Est qui conduit à l'engagement de moyens de l'entreprise de chimie et plastiques Solvay située à Saint-Fons, à proximité du lieu de l'accident.

Après leur arrivée, les pompiers réalisent un tapis de mousse isolant au-dessus du produit inflammable déversé afin de prévenir le risque de déclenchement d'un incendie (ce tapis est visible en blanc sur les photographies). La fuite de carburant est colmatée à 7 h 10.

Le dépotage des wagons accidentés, c'est-à-dire leur déchargement nécessaire à la sécurisation du site, débute à 17 h. Il s'achèvera le lendemain, 14 mars, à 4 h. Le site ne présente alors plus de risque.

2 Le CODIS supervise et coordonne l'ensemble de l'activité opérationnelle du service départemental d'incendie et de secours (SDIS) gérant les sapeurs-pompiers au niveau du département.

3 Depuis 1987, le dispositif Transaid permet, en cas d'accident de TMD sur le territoire national, de faire appel à l'industrie chimique la plus proche du lieu de l'accident pour mettre les moyens techniques de cette industrie (matériel, personnel formé) à disposition des services de secours.



Figure 3 : les pompiers en intervention après le déraillement (photo SNCF)

Environ 300 pompiers et une centaine de véhicules d'intervention furent mobilisés.

La circulation des voies principales Lyon – Marseille a été totalement interrompue dès l'accident pour ne reprendre que le lendemain à 9 h. La ligne à haute tension a été remise en service le 16 mars à 9 h.

Les voies accidentées ont été reconstruites, puis remises en exploitation le 23 mars 2017.

1.4 - Le bilan de l'accident

L'accident n'a fait aucune victime. Les dommages matériels sont, en revanche, assez importants :

- 3 wagons sont inaptes à leur réemploi ;
- 80 mètres de voie sont à remplacer (50 m sur la voie 101 et 30 m sur la voie 1ter adjacente) ;
- 30 tonnes d'éthanol sont estimées s'être déversées dans l'environnement conduisant à des mesures de restriction de l'usage des forages d'eau potable environnants. Aucune pollution de ces captages n'a cependant été constatée a posteriori.

Une autre conséquence économique est l'interruption sur une journée complète de la circulation ferroviaire sur les voies principales Lyon – Marseille.

La cause de l'accident n'a pas pu être déterminée avec exactitude par les premières expertises qui sont intervenues sur site immédiatement après l'accident.

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

Au vu des circonstances et du contexte de l'accident, le directeur du bureau d'enquêtes sur les accidents de transport terrestre (BEA-TT) a ouvert le 15 mars 2017 une enquête technique en application des articles L. 1621-2 à L. 1622-2 du Code des transports.

Les enquêteurs techniques du BEA-TT se sont rendus sur place. Ils ont rencontré les représentants du gestionnaire d'infrastructure, SNCF Réseau, et du détenteur de wagons, VTG Rail Europe France. Ils ont rencontré les experts de l'EPSF, autorité nationale de sécurité, dont l'une des missions est plus particulièrement l'autorisation de mise en exploitation des wagons, ainsi que les autorités en charge de l'enquête judiciaire. Ils ont eu communication de l'ensemble des pièces et documents nécessaires à l'enquête.

2 - Le contexte de l'accident

2.1 - Le triage de Sibelin

Le triage de Sibelin est un important site ferroviaire national pour le transport des marchandises. Il est situé à une dizaine de kilomètres au sud de Lyon.

Inauguré le 29 octobre 1970, sa construction, comme celle d'autres grands triages nationaux (Woippy, Gevrey...) entrainé dans le cadre d'un vaste programme de modernisation de la production du fret ferroviaire entrepris dans les années 1960.



Figure 4 : plan de situation du triage sur le réseau ferroviaire lyonnais

Le fonctionnement industriel du site est assez classique (voir figure ci-après) :

- les trains de marchandises sont réceptionnés, en provenance du nord comme du sud, sur le faisceau de voie dit « faisceau réception » ;
- les wagons sont ensuite « démaillés » (décrochage de leurs attelages), puis poussés à la « bosse » pour être triés par gravité dans le « faisceau formation » ;
- les wagons sont alors déplacés et attelés pour former un nouveau train dans le « faisceau attente au départ », prêts pour un nouvel acheminement ;

Certains trains ne font toutefois pas l'objet de ces opérations de tri : il s'agit des trains dits « entiers ». Le train accidenté le 13 mars 2017 en faisait partie. Ces trains entiers s'arrêtent au triage en général pour attendre un sillon d'acheminement sur leur itinéraire, ou pour changer de conducteur ou de locomotive, profitant des facilités du dépôt de locomotives présent dans le triage. Ces trains sont réceptionnés sur un faisceau dit

« relais », dédié à leur accueil. Il existe deux faisceaux relais à Sibelin : l'un appelé « nord-sud » pour les trains en provenance du nord et à destination du sud, et l'autre appelé « sud-nord » pour les trains en sens inverse. Le train n° 489241 accidenté se rendait sur le faisceau relais nord-sud.

Les **5 faisceaux** de voies décrits ci-dessus sont reliés entre eux et à la ligne principale Lyon – Marseille, par des voies de circulation.

La voie de circulation située à l'est du triage est la voie 1ter. Elle assure la liaison entre la voie 1bis de la ligne principale en provenance de Lyon et les faisceaux. C'est l'itinéraire qu'a suivi le train entier accidenté le 13 mars 2017, d'abord par la voie 1ter puis en entrée sur le faisceau relais nord-sud.

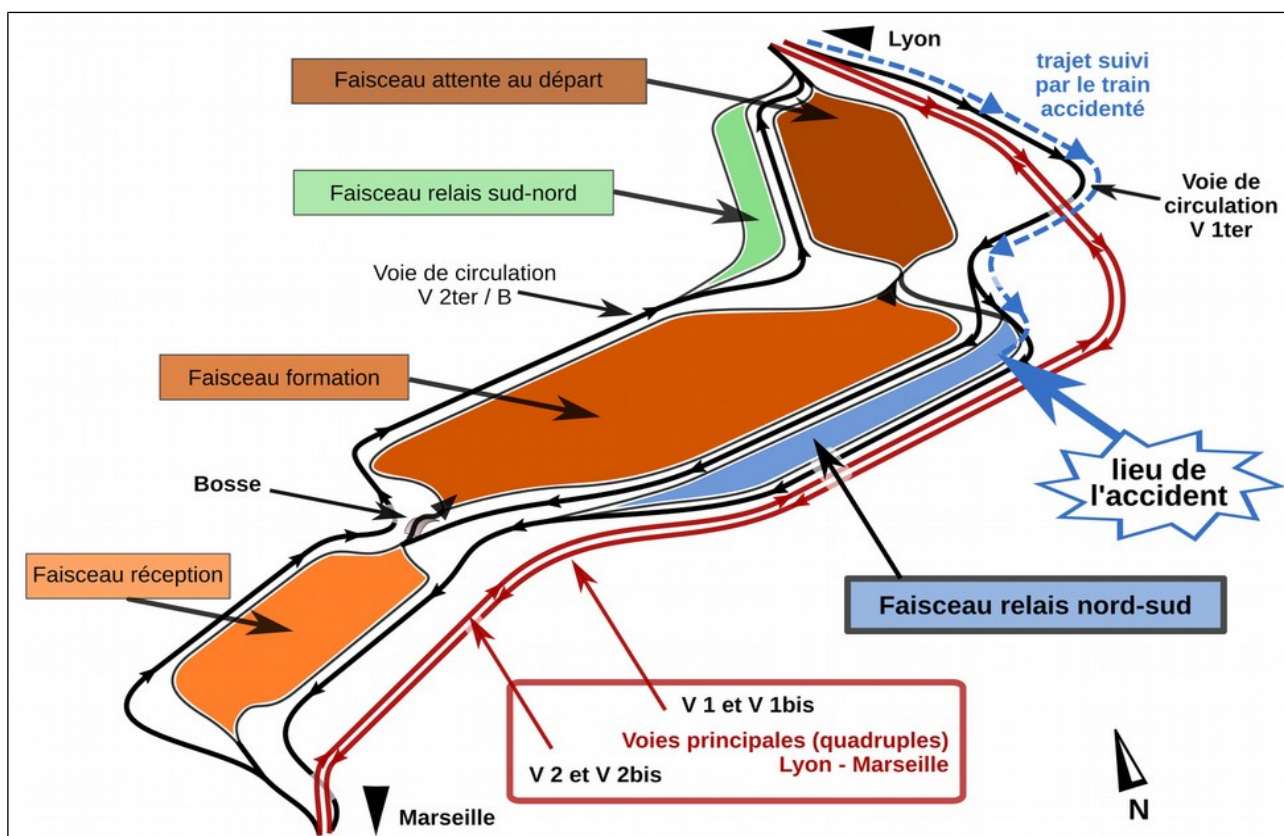


Figure 5 : vue en perspective simplifiée des faisceaux de voies du triage de Sibelin

2.2 - Le faisceau relais nord-sud et la voie 101

Le faisceau relais nord-sud comprend quatre voies numérotées avec des nombres impairs de 101 à 107. La voie 101 sur laquelle s'est produit l'accident est la plus extrême du faisceau vers l'est. Elle longe la voie de circulation du triage V 1ter, non loin des voies principales (voir figure ci-après).

Les voies du faisceau relais ont une longueur de 820 mètres. Elles sont toutes électrifiées. Les trains sont réceptionnés selon un graphique d'occupation des voies préalablement établi, mais sans règle d'affectation précise hormis la disponibilité des voies lors de la réception. Le faisceau reçoit environ 500 trains chaque mois, avec une occupation qui se répartit quasi uniformément sur les voies.

La voie 101 date de la construction du triage. Elle est constituée de rails d'une longueur de 18 m, éclissés et fixés sur un platelage de traverses en bois. Le travelage est de 3 traverses pour 2 mètres linéaires de voie.

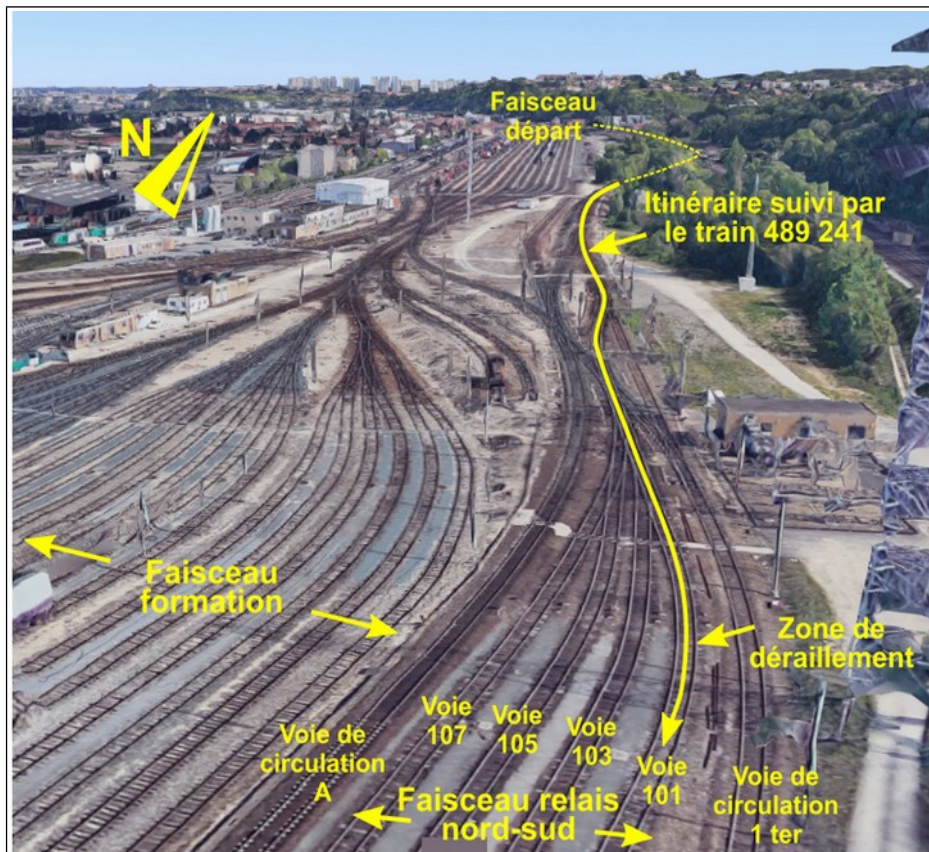


Figure 6 : l'extrémité nord du faisceau relais et l'itinéraire d'entrée (vue google)

La voie est en assez mauvais état général. Le sol d'assise est humide. Le ballast est pollué. Les traverses ont un aspect, pour partie, vermoulu. Nous y reviendrons plus en détail dans le chapitre sur les investigations. Des travaux d'entretien avaient permis en 2006 de remplacer les traverses à raison d'une sur deux dans la courbe où a eu lieu l'accident, et de une sur trois dans l'alignement.



Figure 7 : l'état général de la voie en avril 2017

2.3 - Le train accidenté

Le train accidenté, n° 489241, est un train entier qui effectuait un parcours allant du triage de Gevrey près de Dijon à celui de Miramas près de Marseille sans remaniement.

L'origine du convoi était l'usine de fabrication de bioéthanol de la société Cristanol à Bazancourt, située à une quinzaine de kilomètres au nord-est de Reims. Sa destination était la raffinerie située à Fos-sur-Mer appartenant à la société LyondellBasell.

Le train comprenait une locomotive et 22 wagons-citernes chargés de bioéthanol liquide. Le commissionnement du transport était assuré par la société VTG Rail Logistics France, dont le siège est à Paris. Cette société sous-traitait la prestation de traction du convoi à Fret SNCF et louait les wagons à VTG Rail Europe France, société détenue par le même groupe allemand VTG AG⁴. VTG Rail Europe France gère un parc d'environ 8 000 wagons en France.

La locomotive, de type 26 000, électrique bicourant, appartenait à Fret SNCF.

Le propriétaire des wagons, la société VTG Rail Europe France, était également entité en charge de la maintenance. Les wagons étaient entretenus dans leurs ateliers d'Occitanie, basés à Narbonne, et de Provence, basés à Miramas.

Type de train	Fret – marchandises dangereuses
Numéro du train	489241
Entreprise ferroviaire	SNCF Mobilités
Locomotive	BB 26 000
Charge remorquée	22 wagons-citernes
Nature du chargement	Bioéthanol
Tonnage total brut	2 048 tonnes
Tonnage du chargement	1 422 tonnes

Fiche descriptive du train accidenté

2.3.1 - Les wagons-citernes

Les wagons-citernes ont une contenance de 95 m³, soit 65,8 tonnes de carburant au maximum. Leur poids à vide est de 24,2 tonnes et leur poids maximal chargé est de 90 tonnes. Les wagons reposent sur deux bogies à deux essieux. La pleine charge par essieu est donc de 22,5 tonnes. Cette charge est la valeur maximale autorisée sur le réseau ferroviaire national, appelée « charge D ».

Les wagons ont été construits en 2008 en Roumanie.

La citerne est constituée d'un cylindre métallique de diamètre de 2,9 m, fermé par deux fonds de cuve en calotte. L'épaisseur de métal de la cuve est de 6 mm. Six arceaux viennent, sur la longueur de la cuve, renforcer la résistance de la cuve lorsque celle-ci se met en dépression. La dépression maximale admissible de conception des cuves est de 0,4 bar. La pression intérieure maximale admissible est de 10 bars (10 fois la pression atmosphérique).

4 VTG AG : groupe détenant les sociétés VTG Rail Europe France et VTG Rail Logistics France. Le nom VTG provient de Vereinigte Tanklager und Transportmittel GmbH, qui signifie Entreprise de Stockage et Transport Réunis

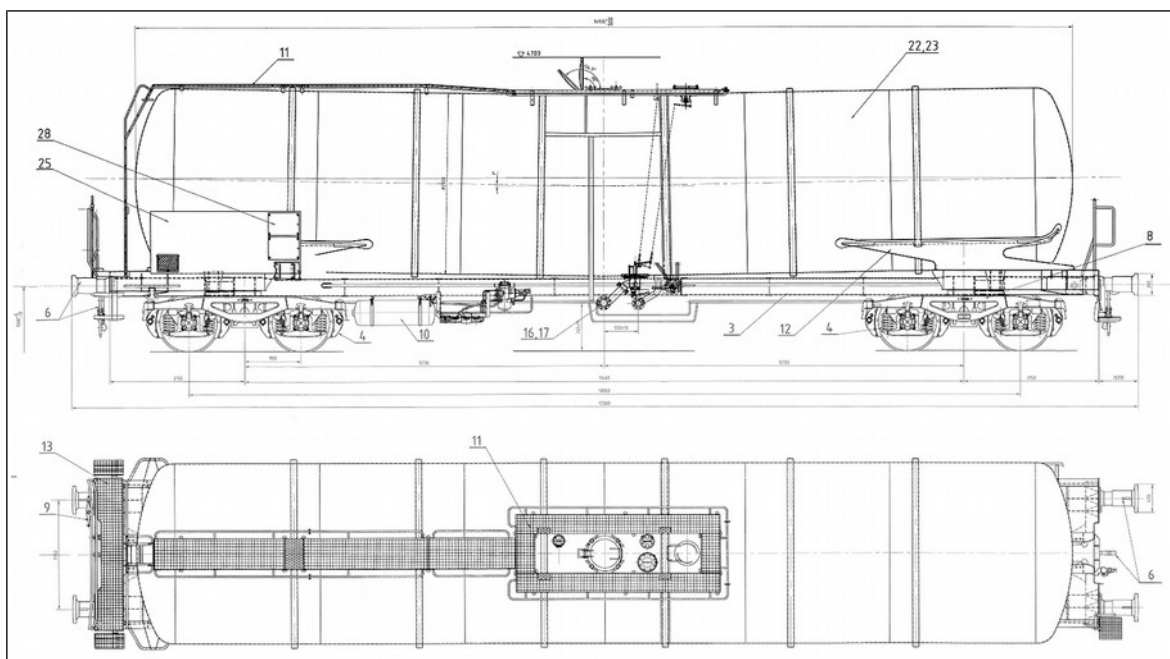


Figure 8 : plan schématique des wagons-citernes

2.3.2 - Le carburant bioéthanol transporté

L'**éthanol**, ou alcool éthylique, est le nom en chimie organique du liquide communément appelé alcool, contenu notamment dans les boissons alcoolisées. Le **bioéthanol** est l'alcool de synthèse produit à partir de matière organique agricole. Dans le cas du chargement du 13 mars 2017, il s'agit de betterave sucrière et de céréales.

Le bioéthanol est utilisé sous forme pure, anhydre (sans eau), pour être incorporé à l'essence jusqu'à hauteur de 15 %, formant ainsi un biocarburant (super 95).

Le point d'éclair ou point d'inflammabilité (en anglais : flash point) de l'éthanol pur est de **12 °C**. Cette valeur correspond à la température la plus basse à laquelle le liquide émet suffisamment de vapeurs pour former, avec l'air ambiant, un mélange gazeux qui s'enflamme sous l'effet d'une source d'énergie calorifique. Au-delà de cette température, le risque d'inflammation est important. Vu la basse température du point éclair, il s'agit donc d'un liquide très inflammable.

2.4 - La réglementation du transport des marchandises dangereuses

2.4.1 - Les principes généraux de la réglementation

Une marchandise dangereuse est une matière ou un objet qui, par ses caractéristiques physico-chimiques (toxicité, réactivité ...) et physiologiques peut présenter des risques pour l'homme, les biens et/ou l'environnement.

Son transport par voie ferroviaire fait l'objet d'un règlement international élaboré par l'Organisation intergouvernementale pour les transports internationaux ferroviaires (OTIF), qui réunit 50 pays et siège à Berne en Suisse. Le règlement se nomme le « RID » : Règlement concernant le transport international ferroviaire de marchandises dangereuses. Il est imposé sur le territoire européen par la directive européenne 2008/68/CE relative au *transport intérieur des marchandises dangereuses*, elle-même transposée en droit français par l'arrêté ministériel, dit « arrêté TMD », du 29 mai 2009 (modifié) relatif aux *transports de marchandises dangereuses par voies terrestres*. L'arrêté impose l'application du RID et regroupe aussi les prescriptions relatives aux transports par modes routier et fluvial provenant d'autres règlements.

2.4.2 - Le « RID »

Le RID est un règlement étoffé d'environ 1 000 pages. Il dresse la liste des matières dangereuses, indique si leur transport est interdit ou non et fixe les conditions applicables à leur transport s'il est autorisé.

Les marchandises sont identifiées en fonction de leur numéro d'identification de danger ainsi que de leur numéro d'identification ONU – ou code « matière » – qui est propre à chaque produit. Le RID impose que ces numéros soient clairement affichés sur le véhicule de transport. Dans le cas présent, ils le sont sur les plaques signalétiques disposées sur chaque face latérale des wagons.



Figure 9 : plaque d'identification d'un wagon avec les numéros MD en bas à droite

Dans le cas du bioéthanol transporté, les caractéristiques de la marchandise dangereuse étaient les suivantes :

- n° d'identification du danger : **33** ;
- n° ONU : **1170**.

Le numéro de danger comporte deux ou trois chiffres parfois précédés de la lettre « X ». Le numéro 33 signifie une matière liquide très inflammable de point d'éclair inférieure à 23 °C. Le doublement du chiffre 3 indique une intensification du danger afférant, sinon il y aurait 30.

Le code matière est un numéro à 4 chiffres. Le code 1170 signifie de l'éthanol ou éthanol en solution. Ce code est commun à l'ensemble des modes de transport. Il permet de connaître rapidement la nature de la marchandise transportée, ainsi que les principaux dangers qu'elle présente. À partir de ce numéro, les services de secours peuvent se reporter facilement à la fiche de données de sécurité du produit et prendre connaissance des instructions à suivre en cas d'accident. Le numéro détermine également dans le RID un certain nombre d'obligations à respecter pour le transport : pression de résistance de la cuve, équipements de service et de sécurité dont la cuve doit être dotée...

Le conducteur du train a l'obligation de détenir la liste des produits qu'il transporte (n° de wagon, position, n° ONU, n° d'identification du danger). Des consignes écrites doivent se trouver à porter de main dans la locomotive.

2.4.3 - Le plan d'urgence interne du site de Sibelin et l'étude de dangers

Conformément au RID, le gestionnaire de l'infrastructure (GI) établit un **plan d'urgence interne** (PUI) dans chaque gare de triage traitant de marchandises dangereuses. Ce plan doit avoir pour effet qu'en cas d'incident, ou d'accident, sur une gare de triage, tous les intervenants coopèrent de manière coordonnée pour minimiser les conséquences sur la vie humaine ou sur l'environnement.

Le triage de Sibelin est doté d'un PUI marchandises dangereuses sous forme de consigne locale, en date du 22 décembre 2014.

La consigne décrit les activités du site, les accès, les systèmes et équipements notamment pour les secours, l'organisation opérationnelle mise en place à l'occasion du déclenchement du PUI, ainsi que les mesures concernant les exercices de secours et le retour d'expérience. C'est en application de ce plan que le CODIS a été avisé par le centre opérationnel SNCF de l'alerte d'accident de marchandises dangereuses.

Par ailleurs, le Code de l'environnement fait obligation au gestionnaire d'infrastructure, dans ses articles L551-1 et R551-8, de produire une « **étude de dangers** ». Elle a pour but d'évaluer les risques liés aux transports dangereux et de définir les moyens de prévention déployés pour atteindre un niveau de risque le plus bas possible.

L'étude de dangers du site de Sibelin est en projet depuis 2008. Malgré plusieurs allers-retours entre SNCF Réseau et les services instructeurs de la Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement (DREAL) à la préfecture de la région Auvergne-Rhône-Alpes, l'étude de dangers n'était, au jour de l'accident, pas validée.

Le préfet de région doit, pour sa part, élaborer un **plan particulier d'intervention** (PPI). Ce plan est rendu obligatoire par le décret n° 2005-1158 du 13 septembre 2005 relatif aux plans particuliers d'intervention [...]. Il définit les moyens de secours mis en œuvre et leurs modalités de gestion en cas d'accident, en interface avec les dispositions définies par l'étude de dangers et le PUI MD. Toutefois, faute d'une étude de dangers du site validée, fournissant les informations nécessaires, le PPI n'existe pas pour le site de Sibelin.

Le triage de Sibelin est donc, au titre de sa conformité vis-à-vis de la réglementation, entaché de plusieurs irrégularités. Dans la mesure où ces irrégularités n'ont pas porté à conséquence sur les circonstances de l'accident et sur le bon déploiement des secours, nous ne les avons pas étudiées plus avant.

2.5 - L'accidentologie du transport ferroviaire de marchandises dangereuses

Au sein du ministère de la Transition écologique et solidaire, et plus spécifiquement de la Direction générale de la prévention des risques, le **Bureau d'analyse des risques et pollutions industriels** (BARPI) est chargé de rassembler, d'analyser et de diffuser les informations et le retour d'expérience en matière d'accidents industriels et technologiques.

Le bureau a constitué une base de données nommée ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents) qui répertorie les incidents ou accidents. Cette base, d'accès libre, contient les accidents survenus en France, mais également de nombreux accidents étrangers. Sont ainsi recensés 46 000 accidents ou incidents, à raison d'environ 1 200 événements par an.

Les événements sont classés selon l'*échelle européenne des accidents industriels* qui a été officialisée en 1994 par le Comité des autorités compétentes des États membres pour l'application de la directive SEVESO. L'échelle repose sur 18 critères techniques destinés à caractériser objectivement les effets ou les conséquences des accidents. On trouve parmi ces critères la quantité de substance rejetée, le nombre de morts ou de blessés, le

niveau de pollution, le coût des dommages... (se reporter au site du BARPI pour des explications plus détaillées sur cette échelle reproduite en annexe 2).

L'échelle comporte 6 niveaux qui déterminent l'**indice** de gravité de l'accident. Un évènement de faible importance a un indice de 1. Un accident de gravité extrême a un indice de 6.

L'accident de déraillement de Sibelin du 13 mars 2017 a un indice de gravité qui peut être évalué à un **niveau 3**. Cet indice est obtenu par le niveau élevé des dommages matériels de l'accident qui peuvent être estimés comme supérieurs à 2 M€ (critère 15 : conséquences économiques – dommages matériels supérieurs à 2 M€ – voir annexe 2).

Les accidents de transports ferroviaires de marchandises dangereuses en France

La base recense **792** accidents significatifs de **transport ferroviaire de marchandises dangereuses en France** depuis 1987 (30 années) dont **19** ont un indice de gravité supérieur ou égal à l'indice 3. Le graphe ci-après donne la répartition des accidents selon leur indice (voir l'échelle en annexe 2 pour le calcul de l'indice).

Sur ces accidents en France, un seul est d'indice égal à **6**. Il s'agit du déraillement et de l'explosion de wagons d'essence à La Voulte-sur-Rhône (Ardèche), le 13 janvier 1993. Il a causé plus de 10 M€ de dommages. Trois accidents sont d'indice égal à **5** :

- le déraillement suivi de l'incendie de wagons d'acide à Saint-Galmier (Loire), le 21 mars 2000 ;
- le renversement d'un wagon de chlorure de vinyle monomère en gare d'Avignon (Vaucluse), le 2 décembre 1994 ;
- le déraillement suivi de l'incendie d'un train d'essence à Chavanay (Loire), le 3 décembre 1990.

Un accident, d'indice 2, a déjà donné lieu à une enquête technique du BEA-TT : le déraillement avec fuite de deux wagons chargés de propane, à Orthez le mardi 24 novembre 2009⁵.

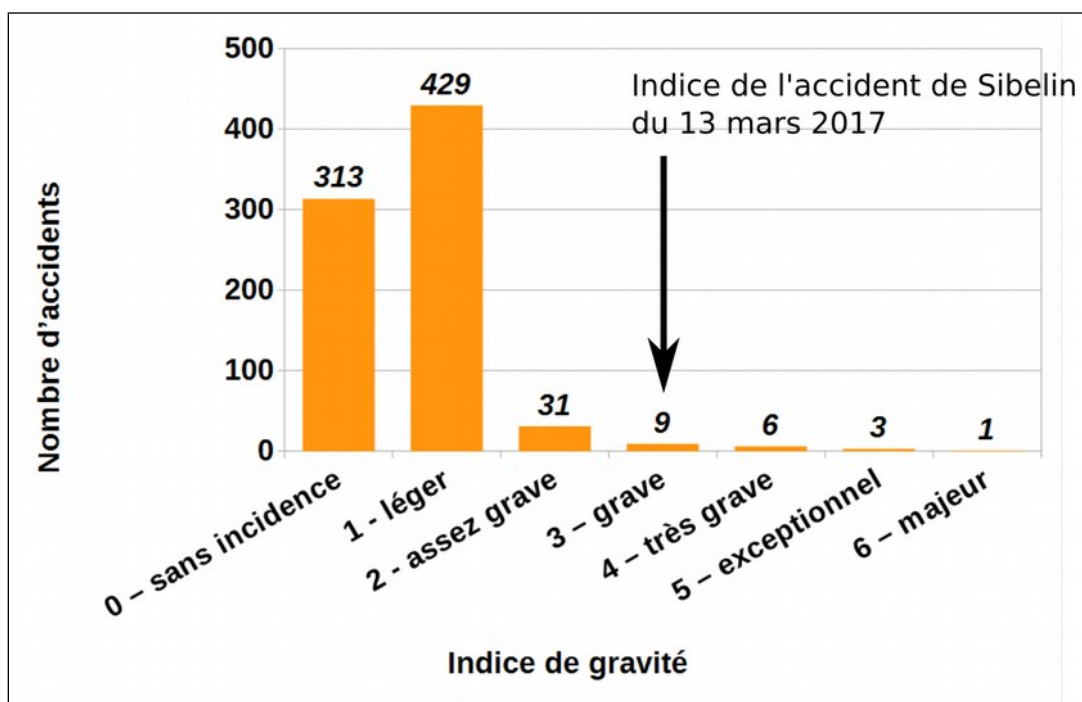


Figure 10 : indice des accidents ferroviaires de matières dangereuses en France depuis 1987

⁵ Le rapport concernant cet accident est consultable sur le site Internet du BEA-TT : www.bea-tt.developpement-durable.gouv.fr

Les accidents remarquables dans le monde

L'annexe 3 fournit un tableau récapitulatif de l'ensemble des accidents de transport ferroviaire, recensés dans la base du BARPI dans le monde, qui ont un indice supérieur ou égal à 5. Ils correspondent donc à des accidents d'un niveau de gravité 100 à 1000 fois supérieur à celui de Sibelin (l'échelle est logarithmique). Ces accidents, lorsqu'ils mettent en jeu un carburant, sont comparables à l'accident de Sibelin dans leur scénario initial. Ils diffèrent dans le fait qu'une inflammation des substances rejetées a conduit à l'aggravation de l'indice de l'accident, ce qui n'a pas été le cas à Sibelin.

Ces accidents donnent une idée assez représentative des conséquences potentielles de la situation du 13 mars 2017 au triage de Sibelin. L'efficacité des services de secours et les circonstances favorables ont permis de les éviter.

Voici trois exemples d'accidents issus de l'annexe 3 qui illustrent la gravité des conséquences potentielles.

Date	Pays / Commune	Indice	Description
13/01/93	FRANCE La Voulte-sur-Rhône	6	7 citernes de 80 m ³ d'essence d'un convoi de 20 wagons déraillent. Un essieu dont l'une des boîtes de roulement s'est trop échauffée s'est rompu. 4 citernes se vident, un violent incendie se déclare. Une explosion et une boule de feu se produisent. Des ruisseaux d'hydrocarbures en flamme se déversent en contrebas dans une rue. 15 habitations et 15 véhicules sont détruits. 1 000 personnes sont évacuées. 6 sont blessées.
08/03/94	SUISSE Zurich	5	Après rupture d'un essieu, l'un des 20 wagons d'un train, contenant chacun 75 m ³ d'essence, déraile, prend feu et explose dans une gare. L'incendie atteint 4 autres wagons, détruit 3 bâtiments bordant les voies. L'essence rejoint les égouts et provoque des explosions. Le quartier est évacué (120 personnes). 1 blessé grave et 2 légers sont à déplorer.
29/06/09	ITALIE Viareggio	6	Vers 23 h 45, à 90 km/h, un convoi de 14 wagons de gaz de pétrole liquéfié (GPL) déraile de 5 citernes qui se couchent sur le côté. Le 1 ^{er} wagon se déchire, entraînant une fuite de GPL et la formation d'un nuage dense qui explose. Un violent incendie embrase les lieux. 2 autres explosions sont entendues un peu plus tard. 32 victimes sont à déplorer, ainsi que 50 blessés. Une villa et 2 immeubles sont détruits.

2.6 - Le risque de rupture de rail

Dans les premières constatations qui ont suivi l'accident du 13 mars 2017, il a été observé un tronçon de rail rompu à l'emplacement du déraillement. Nous y reviendrons. Nous évoquons cependant ci-après, quelques notions importantes concernant la rupture des rails.

2.6.1 - Le nombre de ruptures de rail sur le réseau

La rupture de rail est un événement de sécurité important sur le réseau. Les conséquences peuvent aller du simple incident d'exploitation, le temps d'effectuer une réparation, à des accidents plus catastrophiques. Le BEA-TT a produit plusieurs rapports d'enquête sur des accidents consécutifs à des ruptures de rail. On peut citer le rapport sur les multiples ruptures de rails au passage d'un train le 13 décembre 2016 entre Pons et Jonzac (Charente-Maritime), ou celui sur la rupture multiple de rail franchie en vitesse par des trains le 26 novembre 2013 à Carbonne (Haute-Garonne)⁶.

Il s'est produit, en 2017, **172 ruptures** de rail sur le réseau des voies principales. La tendance générale du nombre de ruptures est à une baisse significative sur les dernières années. À titre indicatif, il y avait 419 ruptures au total en 2004.

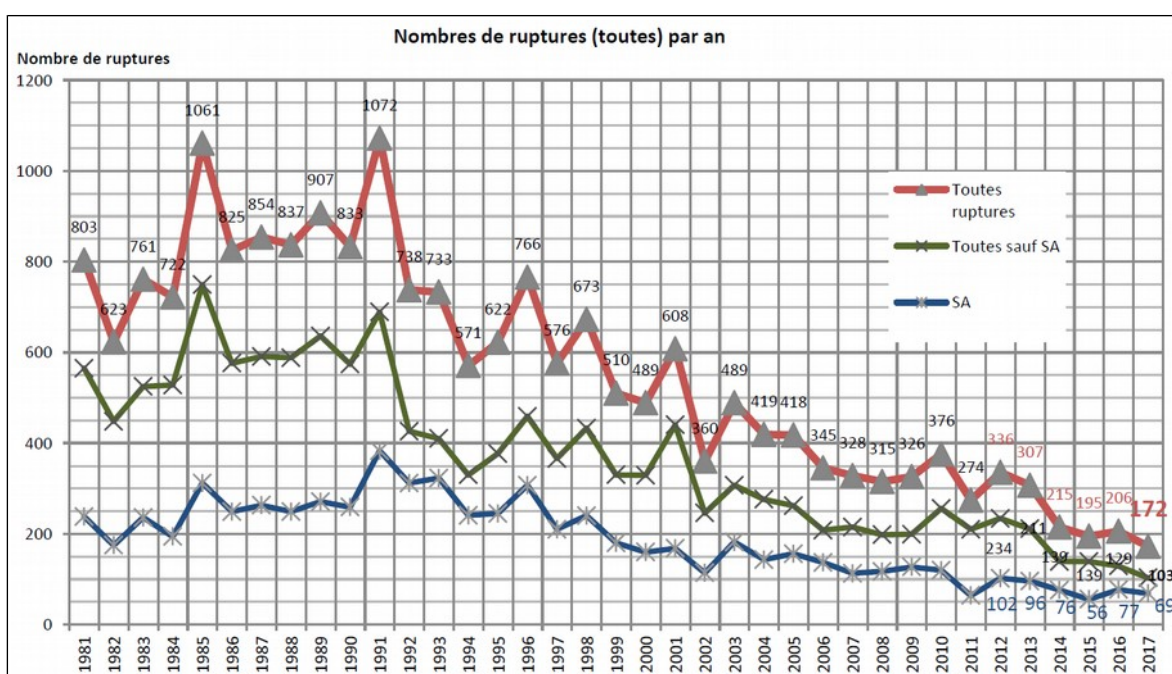


Figure 11 : évolution du nombre de ruptures de rail sur le réseau⁷

Les valeurs de la figure ci-dessus tiennent compte uniquement des ruptures sur les voies principales, les ruptures sur les voies de service n'étant pas comptabilisées par le gestionnaire d'infrastructure au niveau national.

Les **voies principales** sont les voies dont la fonction est la circulation des trains. Elles bénéficient d'équipements de niveau supérieur pour assurer une sécurité maximale des circulations. Leur suivi et leur politique de maintenance sont renforcés.

Les **voies de service** sont les voies autres que les voies principales affectées aux circulations. Ce sont des voies de manœuvre ou de garage des trains. Les voies du faisceau relais nord-sud de Sibelin en font partie. La marche des trains y est à vitesse

⁶ Ces rapports sont consultables sur le site internet du BEA-TT : www.bea-tt.developpement-durable.gouv.fr

⁷ La mention SA dans le graphique signifie « Soudure Aluminothermique ». Elle désigne les ruptures survenues au droit de telles soudures de mise en continuité du rail.

réduite, limitée à 30 km/h. Les installations de sécurité y sont moindres. La politique de maintenance est moins contrainte.

2.6.2 - La surveillance ultrasonique des rails

Pour améliorer la prévention des ruptures de rail, une surveillance de l'état de fissuration des rails est mise en place sur le réseau. L'état de fissuration est mesuré au moyen de la technologie des ultrasons. Dans cette technologie, un signal ultrasonore est émis à la surface du rail. L'écho qu'il renvoie permet de reconstituer une image interne du rail, et donc de sa fissuration annonciatrice d'une rupture.

Le capteur ultrasonore est installé soit sur un engin lourd qui parcourt en vitesse le réseau, soit sur un appareil utilisé à pied d'œuvre. L'appareil à pied d'œuvre est précis mais d'une utilisation peu rapide. Il n'est pas adapté à l'auscultation de grands linéaires de voie courante. Il est utilisé pour confirmer les défauts repérés par les engins lourds, et pour ausculter les petits linéaires comme c'est le cas en zone de triage.

La surveillance par moyen ultrasonique de l'état de fissuration du rail est obligatoire sur les voies principales. Elle ne l'est, en revanche, pas pour les voies de service.



Figure 12 : contrôle continu aux ultrasons à pied d'œuvre par canne

3 - Les investigations sur les causes directes de l'accident

3.1 - Les résumés des déclarations et des témoignages

Les résumés 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 avec les constats ou les analyses présentés par ailleurs.

3.1.1 - Les déclarations de l'agent de conduite

L'agent de conduite du train déclare :

« À 3 h 55, j'arrive à l'entrée du faisceau relais nord-sud de Sibelin.

Après le franchissement du rappel de ralentissement 30 km/h, je progresse à une vitesse de 27 km/h. Dans la descente d'entrée sur la voie 101, je freine pour réduire ma vitesse et respecter la marche en manœuvre à 30 km/h.

80 mètres environ après l'entrée sur la voie 101, je constate une fuite de la conduite générale des freins que j'assimile à une rupture d'attelage. Du fait de la fuite, le train freine et stoppe. J'observe immédiatement le train du côté droit où la courbe est favorable. Le train est sur les rails et il n'y a rien d'anormal. Par contre, du côté gauche, un wagon a déraillé et engagé la voie 1ter.

J'avise immédiatement le régulateur pour qu'il fasse protéger l'entrée du faisceau. J'avise ensuite le poste d'aiguillage, par le téléphone de voie côté nord, pour qu'il assure cette protection, ce qu'il me confirme.

Je pars alors à la visite du train. Deux wagons sont couchés (les 3^e et 4^e de tête). Il y a une fuite de marchandise dangereuse sur le 5^e. J'avise le poste d'aiguillage et je lui donne le code de marchandise dangereuse « 33 / 1170 ». J'attends alors l'arrivée du cadre SNCF d'astreinte et des pompiers. »

3.1.2 - Les déclarations de l'agent circulation

L'agent circulation était en fonction au poste 1 de Sibelin qui commande les mouvements du faisceau relais nord-sud. Il déclare :

« Le train n° 489241 s'est annoncé à 3 h 53 par le système d'annonce automatique des trains sur la voie 1 bis. L'itinéraire est tracé pour une réception sur la voie 101 conformément au graphique théorique d'occupation des voies. L'itinéraire s'établit et aucun dérangement n'est en cours.

À 3 h 55, le train franchit les aiguilles de l'itinéraire menant à la voie 101.

À 4 h 05, le régulateur m'avise du déraillement du train. »

3.1.3 - Les déclarations du chef de la brigade d'entretien de la voie

Le chef de brigade d'entretien de la voie est en fonction depuis 2001.

Interrogé sur l'état des voies du faisceau relais nord-sud, il précise qu'un changement du rail de la file haute de la courbe avait été prévu suite à l'apparition de lamelles métalliques coupantes à la surface. L'évaluation des usures de la surface du rail n'a toutefois pas abouti à prévoir un changement du rail avec un caractère d'urgence. Une partie du rail a déjà fait l'objet de remplacement, à l'amont de la rupture qui s'est produite lors de l'accident, mais le remplacement n'avait pas été plus loin à la date de l'accident, pour une raison de synchronisation des travaux avec le service de maintenance de la signalisation, les travaux touchant, sur cette partie, des installations de signalisation.

Il précise également que la présence de traverses défectueuses est identifiée depuis longtemps sur le faisceau relais. Elle a été signalée à l'occasion d'une demande de travaux de renouvellement faite fin 2013.

Malgré ces défauts observés et en attente de traitement, le maintien de la sécurité a selon lui toujours été assuré. Cela a pu se faire parfois au prix du renfort temporaire des traverses par des entretoises métalliques, mais la nécessité de ce traitement touchait d'autres voies du faisceau que la voie 101.

3.2 - La météorologie

Le 13 mars 2017 à Lyon, le matin, il faisait 10 °C avec un léger brouillard. Cette température est en dessous du point éclair de 12 °C. Cela a contribué favorablement à limiter le risque incendie.

Le soleil s'est levé à 7 h 57. Les 12 °C ont été dépassés vers 10 h. À la mi-journée, il y a eu de faibles pluies avec du soleil entre les averses et un renforcement de la température. La température a atteint un maximum de 16 °C vers 19 h.

La journée a été assez nuageuse. Il y a eu de faibles précipitations, en tout 2 mm sur la journée. L'humidité dans l'air a été très importante, en moyenne de 91 %.

3.3 - Les constats effectués sur la rame accidentée

3.3.1 - La composition du train

Le bulletin qui décrit les caractéristiques du train au conducteur fait état de 22 wagons et une locomotive. La longueur du train, locomotive comprise, est de 390 mètres. Sa masse totale est de 2 048 tonnes.

Les wagons sont tous des wagons-citernes de la société VTG, de modèle semblable. Leur chargement a une masse comprise entre 60,39 et 65,17 tonnes. Leur tare varie de 21,3 à 25 tonnes. Le poids chargé est compris entre 81,69 et 89,853 tonnes. La charge par essieu est très proche de la charge limite, dite « D » de 22,5 tonnes⁸.

Une pesée a posteriori des wagons n'a montré aucune anomalie sur ces données du bulletin de composition.

3.3.2 - L'enregistrement des données de conduite

L'examen de la bande graphique montre, qu'au franchissement du signal C117 qui annonçait un ralentissement à respecter de 30 km/h à l'arrivée sur la voie de circulation du triage, le conducteur, dont le train roulait à 55 km/h, a effectué un freinage général au moyen du frein continu automatique. La vitesse a chuté jusqu'à 18 km/h. Puis le train a repris de la vitesse jusqu'à 23 km/h. Il a alors franchi le signal C217 présentant le rappel de ralentissement à 30 km/h et l'annonce de l'entrée sur voie de service du faisceau relais⁹. Le conducteur a effectué un nouveau freinage.

En entrée du faisceau relais, la vitesse est descendue à 18 km/h. Après un desserrage du frein, la vitesse est remontée à 24 km/h, en raison de la pente. Il s'est alors produit une fuite de la conduite générale qui a conduit au freinage général et à l'arrêt du train.

Hormis la phase finale de rupture de la conduite, cette séquence avec alternance freinage/desserrage est habituelle pour l'entrée d'un train lourd sur le faisceau relais

⁸ Les limitations sur la charge à l'essieu du matériel ferroviaire varient selon le type de matériel et le type de voie empruntée. Pour les locomotives et les trains de marchandises, elle est limitée à 22,5 tonnes par essieu, dite charge « D ». Pour certaines lignes, cette charge est limitée à 20 tonnes, dite charge « C ».

⁹ L'annonce d'une voie de service impose une marche en manœuvre c'est-à-dire de s'avancer avec prudence sans dépasser les 30 km/h de manière à pouvoir obéir à tout signal rencontré.

nord-sud de Sibelin. L'examen de la bande graphique est cohérent avec la déclaration du conducteur et ne fait apparaître aucune anomalie sur la conduite du train.

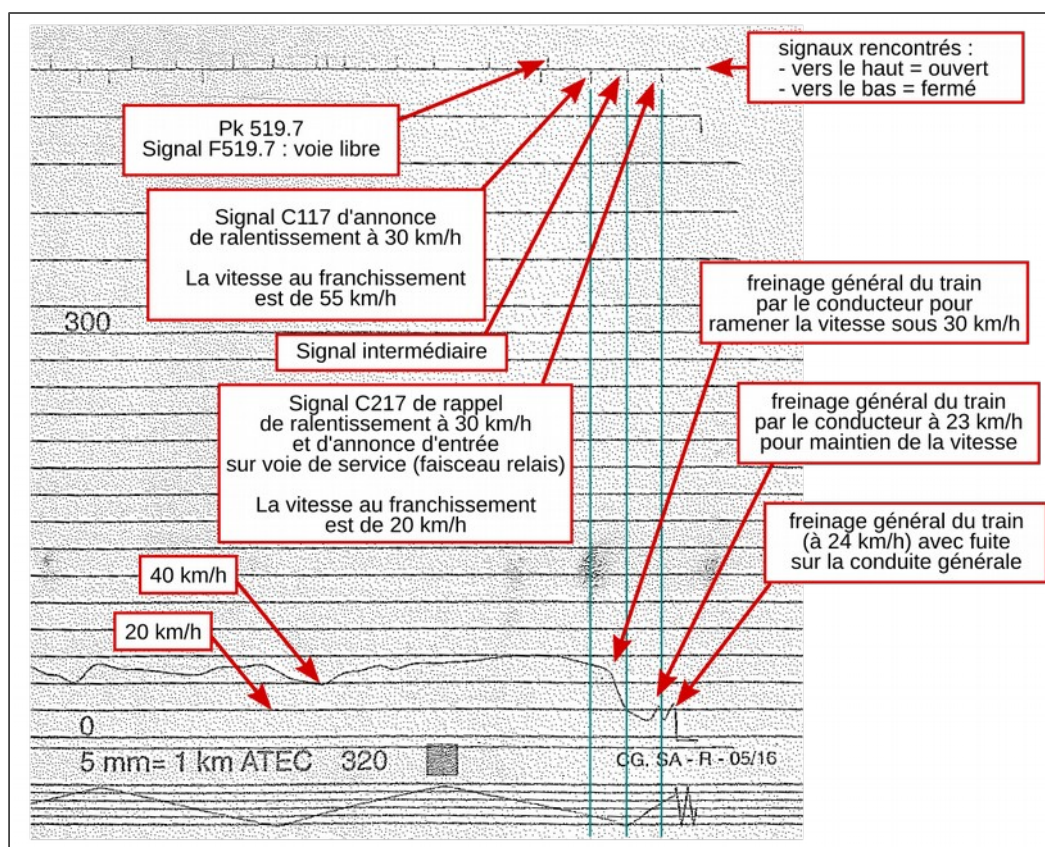


Figure 13 : extrait de la bande graphique du train n° 489241

3.3.3 - L'observation immédiate de la rame accidentée

La situation de la rame après l'accident est la suivante.

Les deux premiers wagons du train sont positionnés normalement sur les rails derrière la locomotive.

Les quatre wagons suivants, du troisième au sixième, ont déraillé :

- le troisième wagon est couché, en dehors de la voie, son premier bogie est enfoncé dans le ballast et tourné de 60°. L'attelage avant est rompu, tandis que l'attelage arrière est maintenu ;
- le quatrième wagon est couché également, légèrement plus près de la voie 101. Sa citerne est, à l'avant, enfoncée et en contact avec le tampon amortisseur de choc arrière droit du troisième wagon. L'attelage arrière est rompu ;
- le cinquième wagon a déraillé des deux bogies, mais est resté debout. Il s'est avancé jusqu'au niveau du premier bogie du quatrième wagon qui est couché. Sa citerne est en contact avec les parties basses du quatrième wagon et a été percée par celles-ci. Il y a deux trous de perforation d'où s'est écoulé le chargement. La plus grande ouverture mesure 45 mm de long. L'attelage arrière est intègre ;
- le sixième wagon est resté sur les rails pour ses trois derniers essieux. Le premier essieu a déraillé. Le rail file haute est sectionné à cet emplacement, entre les deux essieux du bogie avant, sur une longueur d'environ 1,10 m (voir figure ci-après).

Le relevé détaillé des dégâts occasionnés sur les wagons accidentés est donné sous forme de planche photographique en annexe 4.

Quatre attelages du train ont leur vis de serrage vissée quasi à fond, soit plus que l'usage pour les trains fret qui consiste à laisser 3 filets comme cela est observable sur le reste du train. La position des attelages serrés dans le train n'a cependant pas été notée avec précision.

Sur le troisième wagon, couché, le tampon avant droit d'amortissement des chocs entre wagons est arraché. Sur le deuxième wagon, une engravure dans le sens vertical peut aussi être observée sur le tampon arrière gauche, ce wagon étant pour le reste intact.

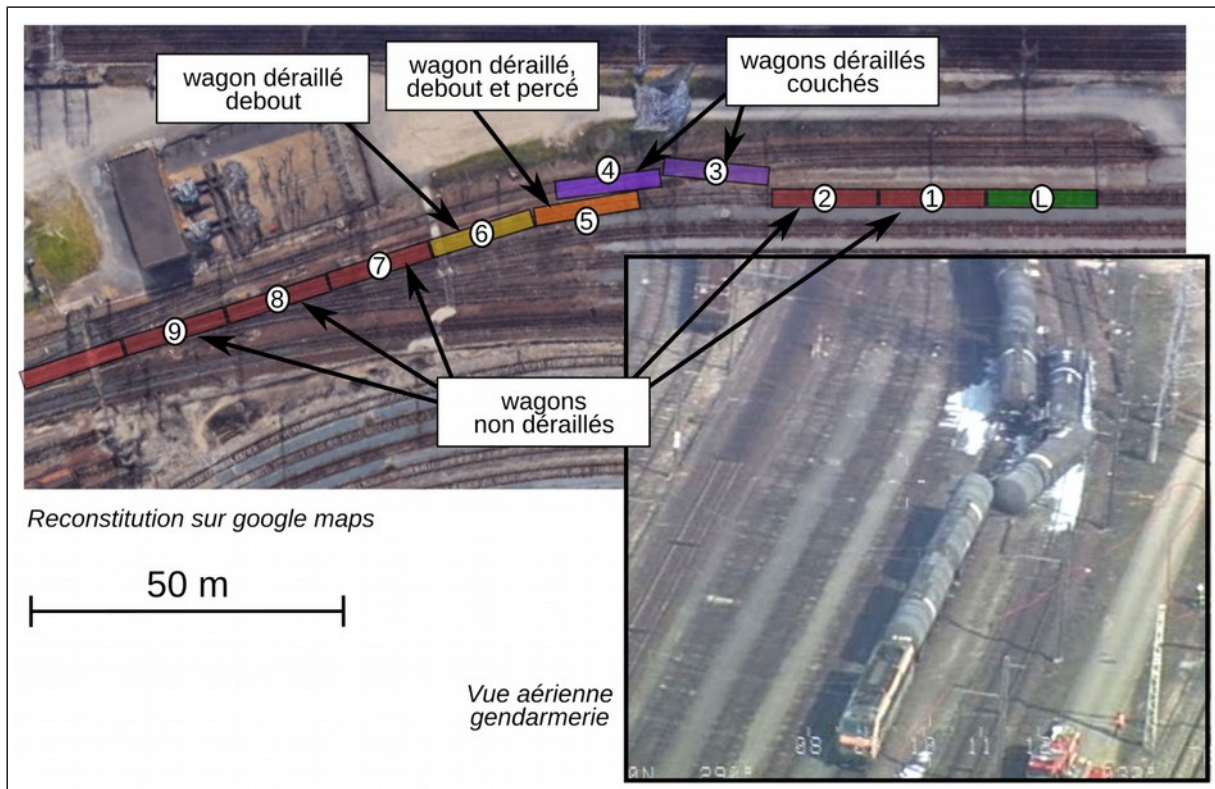


Figure 14 : positionnement du train après l'accident

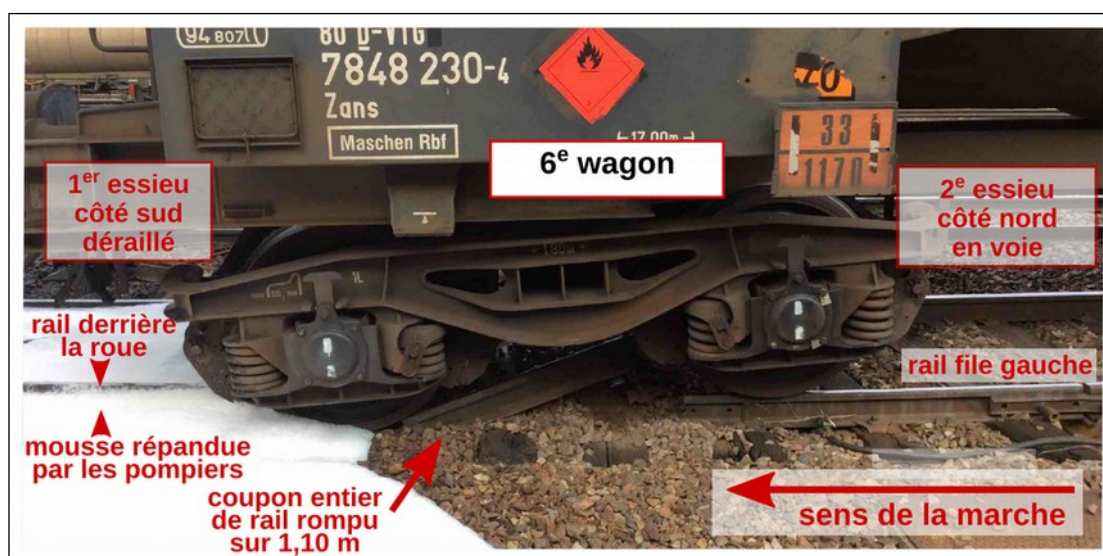


Figure 15 : le bogie avant du 6^e wagon

Les premières traces de chocs du déraillement sur les boudins de roues sont trouvées sur le premier bogie du troisième wagon, indiquant qu'il s'agirait donc du bogie qui est sorti des rails en premier.

L'examen détaillé des organes de roulement et des éléments de liaison entre bogies et citernes n'a révélé aucune anomalie qui ne soit pas une conséquence de l'accident. Le relevé dimensionnel des essieux des wagons et de la locomotive n'a montré aucun méplat sur la bande de roulement susceptible de produire des chocs sur les rails. L'ensemble des avaries observées sur les wagons et mentionnées ci-dessus sont des conséquences de l'accident.

3.3.4 - Les relevés de maintenance des wagons

L'entretien des wagons fait l'objet d'un programme de maintenance périodique en atelier avec plusieurs niveaux d'intervention dans la durée. Tous les 4 ans, il y a une révision intermédiaire. Cette révision comprend divers contrôles comme l'épreuve hydraulique en pression de la citerne, le relevé des essieux et leur reprofilage, si nécessaire. Tous les 12 ans, il y a une révision lourde. Le suivi du programme d'entretien est piloté pour chaque wagon par un système de gestion informatique géré par le détenteur des wagons.

Les six wagons impliqués dans le déraillement étaient de fabrication 2008. Ils avaient connu deux opérations de révision intermédiaire, en 2012 et 2016. Âgés de moins de 12 ans, ils n'avaient pas encore connu de révision lourde.

L'examen des comptes rendus de maintenance de la dernière révision de 2016 n'a révélé aucune anomalie.

3.4 - Les constats effectués sur la voie

3.4.1 - Les observations sur le site

Le déraillement s'est produit dans la zone de courbe serrée de la voie 101 qui démarre à l'aiguille d'entrée et rejoint la partie principale de la voie en alignement. Dans cette courbe, le rayon de courbure mesuré est de 179 mètres. Il est légèrement supérieur au rayon minimal admis sur voie courante de 150 mètres.

Les wagons sont aptes à franchir des courbes inférieures. L'inscription portée sur chaque wagon « R 36 m » indique la valeur minimale de rayon de courbure que le wagon peut franchir en train composé (voir la mention sur la plaque du wagon donnée en figure 9 en bas à droite).

Les caractéristiques de la voie dans la partie courbe sont données ci-dessous.

<i>Courbure</i>	179 mètres
<i>Dévers</i>	20 mm
<i>Écartement</i>	Standard (1435 mm)
<i>Variation d'écartement</i>	~ +15 mm
<i>Type de rail</i>	U33 ¹⁰
<i>Masse du rail</i>	46 kg/ml
<i>Année du rail</i>	1964
<i>Espacement moyen des traverses</i>	590 mm
<i>Année des traverses</i>	1969 et 2006 (1 sur 2)
<i>Attaches</i>	Rigide sur traverse 1969 Élastique sur traverse 2006

Fiche descriptive de l'armement de la voie dans la courbe

¹⁰ Le repère U33 figurant sur le rail est une ancienne dénomination correspondant au profil 46E2 de la norme EN 13674-1 qui spécifie les profils de rail ferroviaire. Il s'agit d'un rail de 46 kg/m.

Après l'accident, il est constaté que le rail externe, dit aussi rail file haute (il est plus haut en raison du dévers de la voie dans la courbe), a été rompu en deux endroits.

Dans l'environnement immédiat de la zone de rupture, nous faisons les observations suivantes en parcourant le rail dans le sens de la circulation du train :

- le rail à l'amont a fait l'objet d'un renouvellement récent. Ce renouvellement date d'août 2016 comme nous le verrons plus loin ;
- un éclissage provisoire par « Cés » de serrage (toujours en place) marque la séparation entre ce rail renouvelé et le rail plus ancien qui est rompu. Sur ce rail ancien, la date de 1964 est imprimée, indiquant que le rail est plus ancien que la construction du triage ;
- une première section de rupture se situe à 1,73 m du joint des « Cés » ;
- une seconde section de rupture se situe 1,10 m plus loin. Le coupon de rail compris entre ces deux ruptures mesure 1,10 m.
- sur le bord de la voie, entre la voie 101 et la voie 1ter adjacente, des coupons de rail portant l'inscription « voie 101 » sont alignés en attente de pose.



Figure 16 : le rail file haute rompu

Les traverses sont, pour moitié, anciennes et datent de la construction du triage (1969). Pour moitié, elles sont plus récentes (2006). Les deux types de traverse ont été posés de manière alternée.

Les dommages causés aux traverses par le déraillement sont identifiables à partir de la traverse numérotée 6 pour les besoins de l'enquête. Celle-ci est déplacée dans le sens longitudinal de la voie, signe que la partie en aval de la voie a légèrement ripé lors du déraillement. Des traces de boudins sont repérables sur le bois, ainsi que sur la semelle d'attache et les tirefonds de fixation de cette traverse. Il s'agit de la première traverse sur laquelle ont roulé les roues qui ont déraillé.

Des traces sont ensuite repérables sur la traverse n° 7 donnant une idée précise de la trajectoire suivie par les bogies des wagons qui ont déraillé (voir figure 18).

Les traverses suivantes sont très atteintes. Certaines sont détruites.

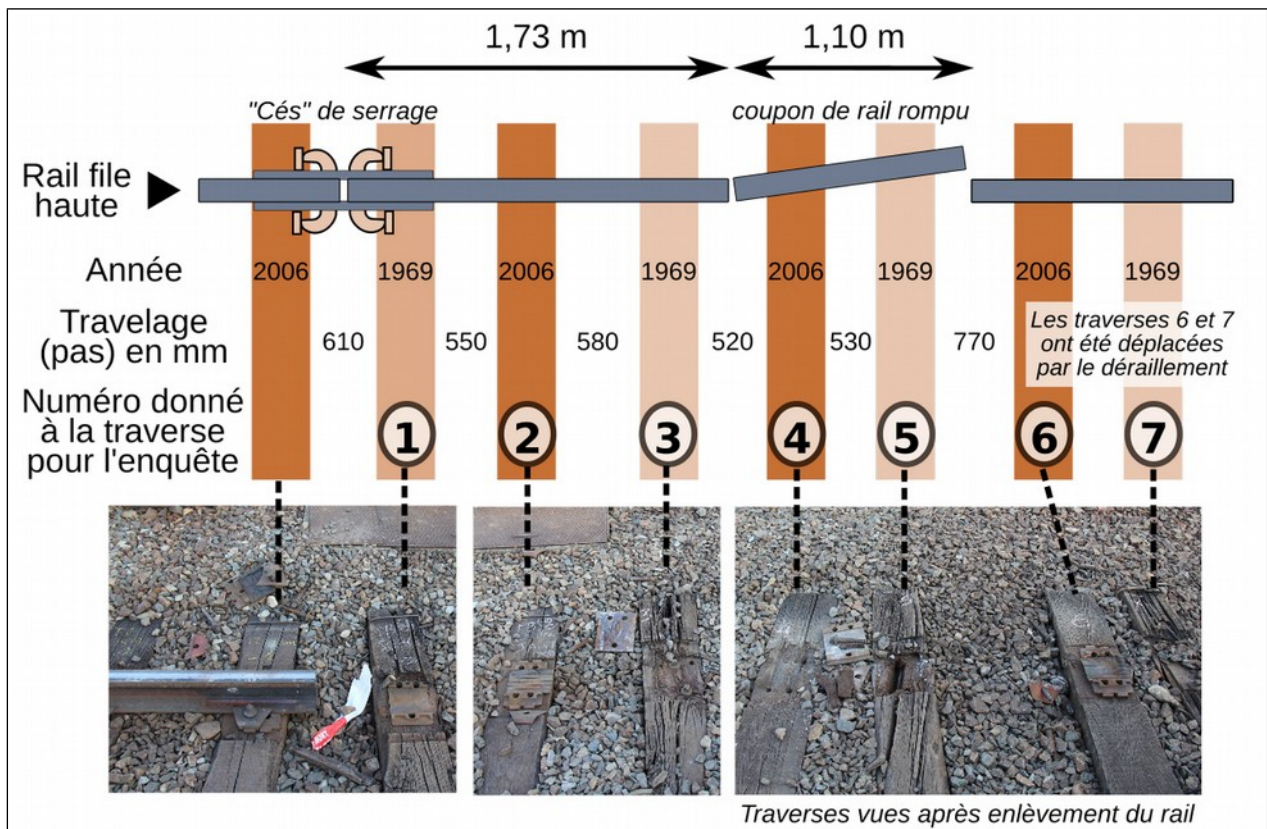


Figure 17 : les traverses dans la zone de rupture du rail file haute

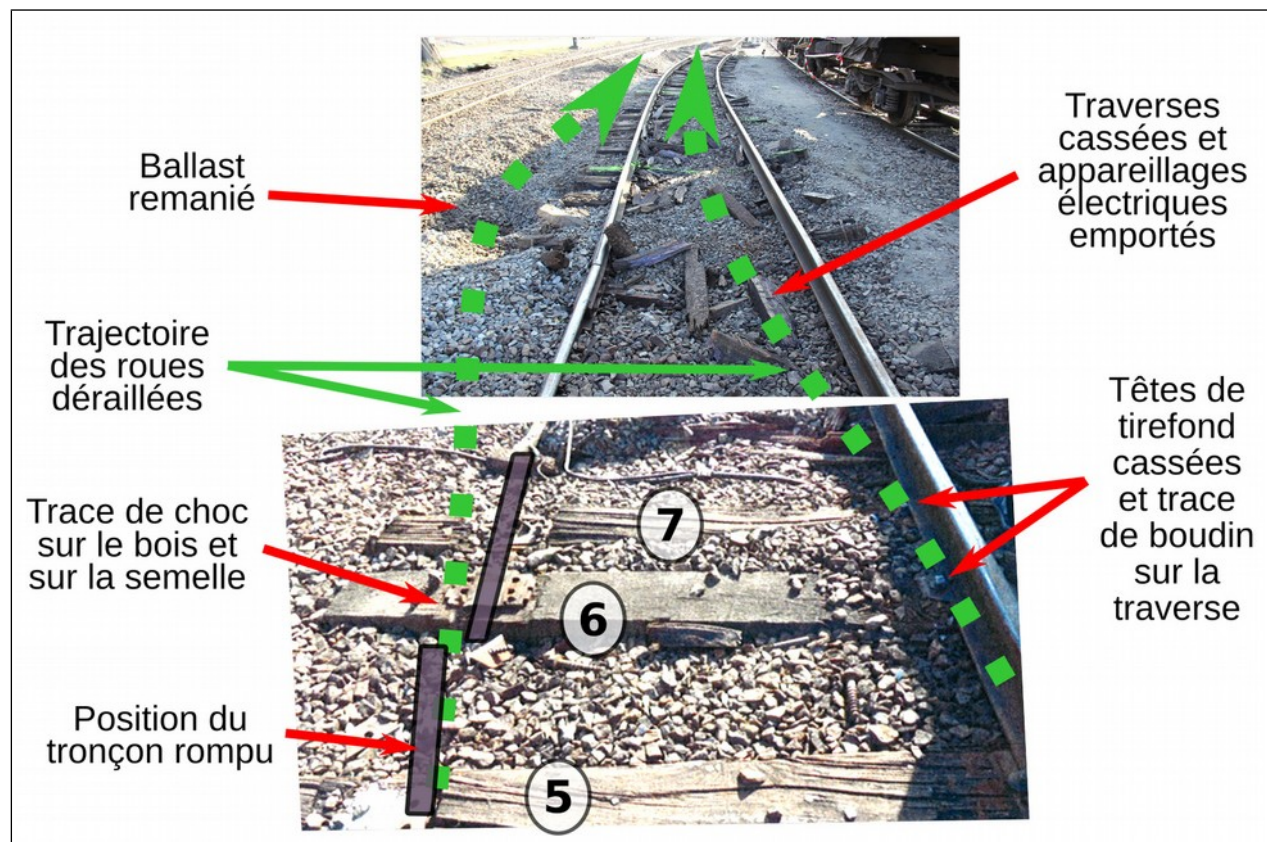


Figure 18 : trajectoire des roues suite au déraillement et dégâts à la voie à l'aval

3.4.2 - L'expertise métallurgique du rail file haute

Le tronçon de rail rompu et les deux bouts de part et d'autre ont été prélevés pour être expertisés en laboratoire dans le cadre de la procédure judiciaire. Cette expertise métallurgique a été conduite par un expert en génie des matériaux. Nous reformulons ci-après les principales conclusions.

État général du rail

La géométrie du rail au niveau du tronçon rompu était initialement **déformée et usée** sur le champignon¹¹.

Il peut être observé une **usure** de 5 mm de matière par rapport au profil théorique en partie supérieure sur le bord interne à la voie.

Cette usure témoigne des fortes sollicitations du rail en file haute dans la courbe de faible rayon. Elle reste cependant largement en deçà des tolérances admises et elle n'entame pas de façon significative la capacité de résistance du rail.

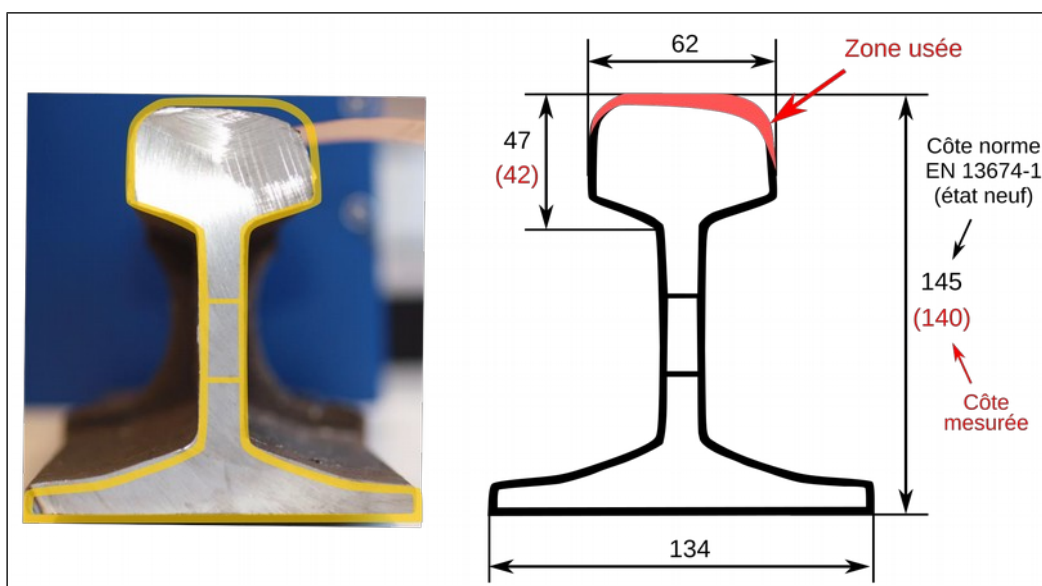


Figure 19 : perte de matière sur le rail file haute

Il peut aussi être observé de larges **bavures** d'écoulement plastique du métal de la surface qui redescendent sur le bord du champignon côté interne de la voie (voir figure ci-après). Ces bavures sont le résultat des intenses efforts de portance et de guidage des roues appliqués dans le temps.

Les bavures masquent le champignon du rail et gênent son observation visuelle lors des tournées d'entretien. Elles n'entament cependant pas de façon significative la capacité de résistance du rail.

Ces bavures sont combinées à la formation « d'**écailles** » en surface sur la table de roulement (voir figure ci-après). Elles sont bien visibles à proximité des sections rompues. Il s'agit d'un défaut connu sur les rails, dit de « défibrage » de la bande de roulement, appelé aussi « **shelling** ».

11 Dans un rail de chemin de fer, de profil dit « Vignole », le *champignon* désigne la partie supérieure du rail où roule la roue. La partie centrale du rail, amincie, est l'*âme* et la partie inférieure, d'appui à plat sur les traverses, est le *patin*.

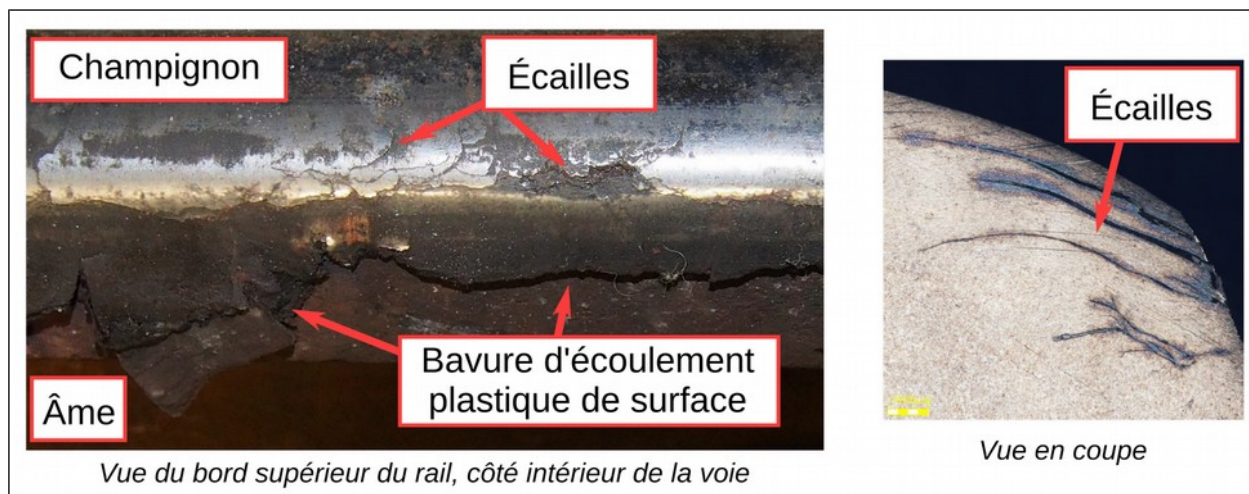


Figure 20 : défaut d'écaillage à la surface du champignon du tronçon rompu

Ce défaut d'écaillage résulte d'une fatigue de contact.

La fatigue désigne l'endommagement d'un matériau par la répétition de sollicitations mécaniques telles que le passage cyclique des essieux sur le rail. Alors que la pièce est conçue pour résister à des efforts donnés, l'application répétée d'efforts plus faibles peut provoquer une rupture localisée voire sa rupture générale. La rupture n'apparaît qu'au bout d'un temps prolongé, fonction du nombre de sollicitations et de leur importance. Le mécanisme de rupture met généralement en jeu une modification progressive des caractéristiques du matériau, entraînant la formation de fissures et, au final, provoquant la rupture brutale.

Le référentiel interne de SNCF Réseau « Codification des défauts de rail », qui classe l'ensemble des défauts identifiables sur le réseau ferré, répertorie le défaut d'écaillage en surface sous le code « 2222 ». Ce référentiel précise que le défaut affecte principalement, sur le réseau, les rails en file haute de courbe (c'est le cas ici). Le référentiel précise aussi que le défaut est connu pour son **évolution en fissuration transversale** se propageant dans le cœur du champignon jusqu'à la rupture complète du rail. Un écaillage constaté en surface peut ainsi être le signe de l'amorce d'une fissure en fatigue qui descend plus profondément dans le rail et qui devrait être étudiée et surveillée.

Analyse de la rupture amont

La **rupture amont**, la première dans le sens de la marche du train, est verticale dans la zone du champignon, puis a une inclinaison d'environ 45° dans la partie inférieure du rail. Les observations de l'expertise métallurgique indiquent qu'une importante fissuration progressive transversale en **fatigue** s'est développée dans cette section antérieurement à l'accident.

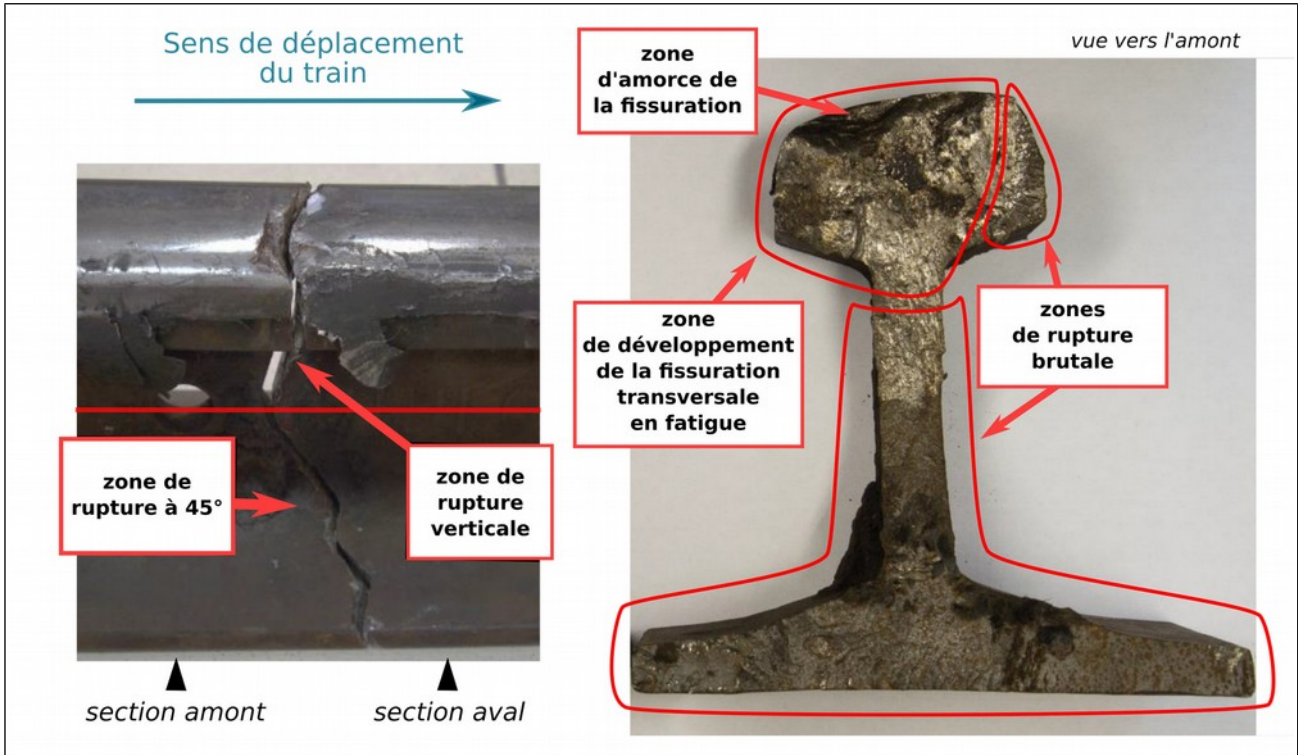


Figure 21 : détail de la rupture amont

Selon l'expertise métallurgique, le mécanisme s'est amorcé dans une des fissures d'écaillage en surface. La fissure s'est développée jusqu'à occuper **80 %** de la section du champignon au jour de l'accident. Sous l'effet des charges cycliques des trains, la fissure s'est propagée d'abord proche de la surface de roulement, du côté du rail interne à la voie, puis elle est descendue verticalement dans l'intérieur de champignon. Ce mécanisme est classique. Il correspond à l'évolution possible du « shelling » décrite dans le référentiel sur les défauts de rail et mentionnée ci-dessus.

Lorsque la section restante de rail est devenue insuffisante pour résister à la sollicitation de passage d'un train, la rupture s'est propagée brutalement dans tout le rail à partir du patin qui est la partie en tension lorsque le poids du train s'applique sur le rail entre deux traverses. Une analyse au microscope électronique à balayage de la zone de rupture brutale montre, dans cette zone résiduelle, une rupture de type « clivage », c'est-à-dire avec des plans de rupture caractéristiques d'une rupture rapide sans déformation.

La fissure s'est donc développée progressivement jusqu'à occuper presque tout le champignon. Conformément au mécanisme de ruine en fatigue, la rupture de la section de rail résiduelle s'est produite au cours d'un cycle de chargement, brutalement. Il est à noter que la fissure était dans un état très avancé. La capacité résistante d'un rail, dont le champignon est fissuré à 80 %, est réduite d'un facteur **5** par rapport à un rail intègre¹².

¹² La contrainte dans le rail est en effet inversement proportionnelle au module d'inertie de la section de matière résistante. Sur un rail de 46 kg plein, le module d'inertie (I/v) est de 213 cm³. Sur un rail dont le champignon est fissuré à 80 %, il est d'environ 43 cm³, soit 5 fois moindre. La contrainte mécanique est multipliée par 5.

Une dernière observation peut être faite sur cette rupture amont : la section aval rompue présente une déformation significative de la table de roulement (voir figure ci-après). Cette déformation est la conséquence d'un choc sur l'extrémité aval du rail laissée libre par la rupture. Ce choc résulte du passage énergétique d'une ou plusieurs roues après la rupture.

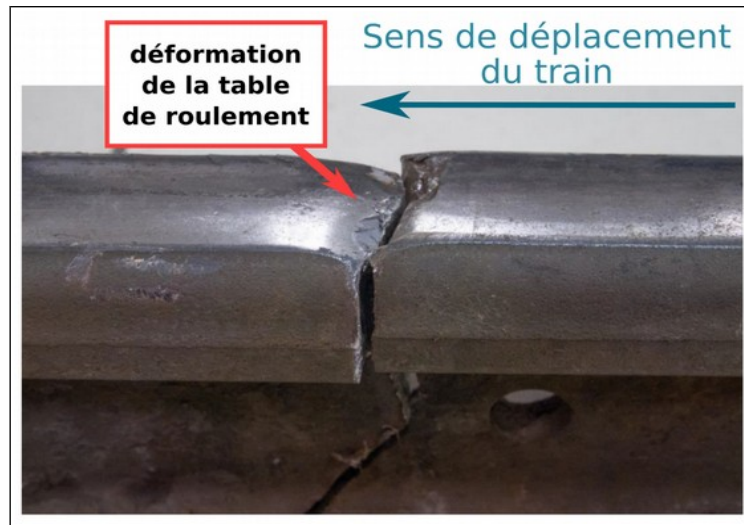


Figure 22 : déformation de la table de roulement sur la rupture amont

Analyse de la rupture aval

L'autre rupture, la **rupture aval**, est verticale dans la zone du champignon, puis inclinée à environ 45° dans la partie inférieure du rail. Le champignon est également écaillé en surface selon le même défaut de rail « 2222 ».

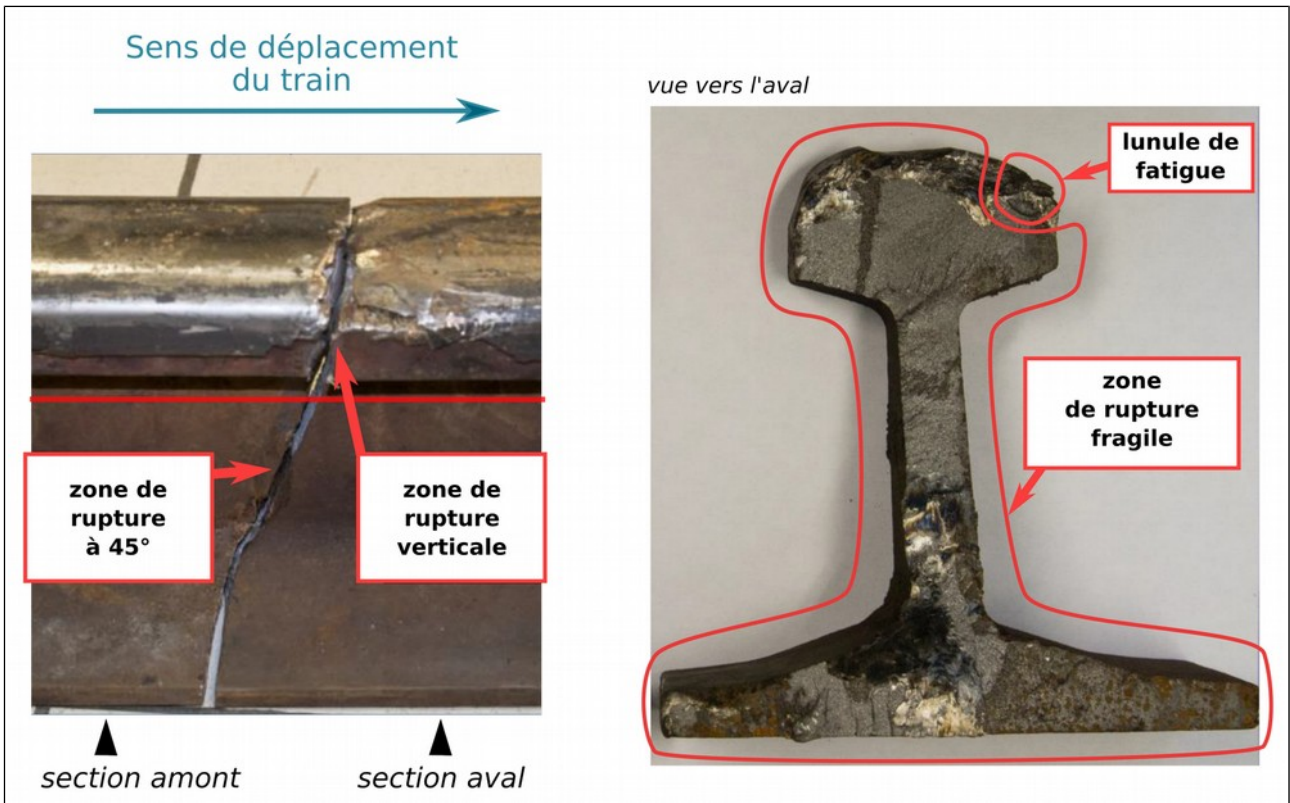


Figure 23 : détail de la rupture aval

Selon l'expertise métallurgique, une zone fissurée de petite dimension, en « lunule », dans la partie supérieure du champignon interne à la voie, témoigne de l'amorce d'une **fissure progressive en fatigue** dans cette section. Cette fissure prend naissance dans l'écaillage de surface. L'oxydation de la surface de rupture confirme l'antériorité de la fissure à l'accident. Sa surface occupe environ **10 %** de la section du champignon.

L'ensemble de la section restante du champignon, de même que la partie inférieure du rail, sont en **rupture fragile** (c'est-à-dire prompte, sans déformation plastique du matériau).

Le niveau de progression de la fissure de fatigue antérieure à l'accident dans cette section, d'environ 10 % du champignon, ne justifie pas à elle seule la rupture de la section contrairement au cas de la section amont.

L'expertise métallurgique se conclut par l'hypothèse suivante de rupture du rail :

- Dans un premier temps, la section du rail est fortement diminuée par la présence d'une fissure transversale du champignon au droit de la rupture amont. Le passage du train entraîne le dépassement de la résistance mécanique du matériau dans la surface restante et donc la rupture brutale dans cette section.
- Ensuite, la contrainte sur le rail augmente fortement par le poids qui agit verticalement mais aussi par une poussée latérale, vers la gauche dans le sens de la marche, due au virage ce qui entraîne la deuxième rupture, à l'aval, sur une zone déjà amorcée par une fissure de fatigue.

Nous partageons ces conclusions. Sous l'effet du passage du train, c'est la section amont, au champignon fissuré à 80 %, qui s'est rompue en premier. La seconde section, en aval, présentait une résistance suffisante au passage du train et ne s'est rompue qu'après sous l'effet d'une sollicitation excessive.

3.4.3 - Les constats sur l'état de la voie

Les constats effectués sur l'état de la voie après l'accident sont les suivants (voir figure ci-dessous) :

- Comme nous l'avons vu, les traverses sont alternativement anciennes, datant de 1969, et récentes, posées en 2006. Les traverses anciennes sont très fendillées et ont des caractéristiques mécaniques amoindries. Des morceaux de bois ont pu aisément être extraits à la main au lendemain de l'accident.
- Les attaches sont aussi variables. Sur les traverses neuves, les attaches sont de type « nabla ». Elles sont élastiques. Sur les traverses anciennes, il s'agit de simples tirefonds de fixation. L'attache est rigide. Certains de ces tirefonds s'enlèvent à la main.
- Des traces de polissage dues à un frottement répétitif entre le rail et la traverse sont retrouvées en sous-face du rail au droit de la traverse n° 4 (traverse de 2006 sous le tronçon rompu – voir la numérotation des traverses en figure 17). Ces traces indiquent la mobilité du rail, son mauvais appui et la mauvaise efficacité de sa fixation dans la zone de rupture.
- Le patin du rail est aussi déformé au droit des traverses n° 4 à n° 6 sur le bord extérieur du rail. La déformation de bascule latérale du rail témoigne des fortes poussées latérales produites par le guidage des wagons dans la courbe de faible rayon.

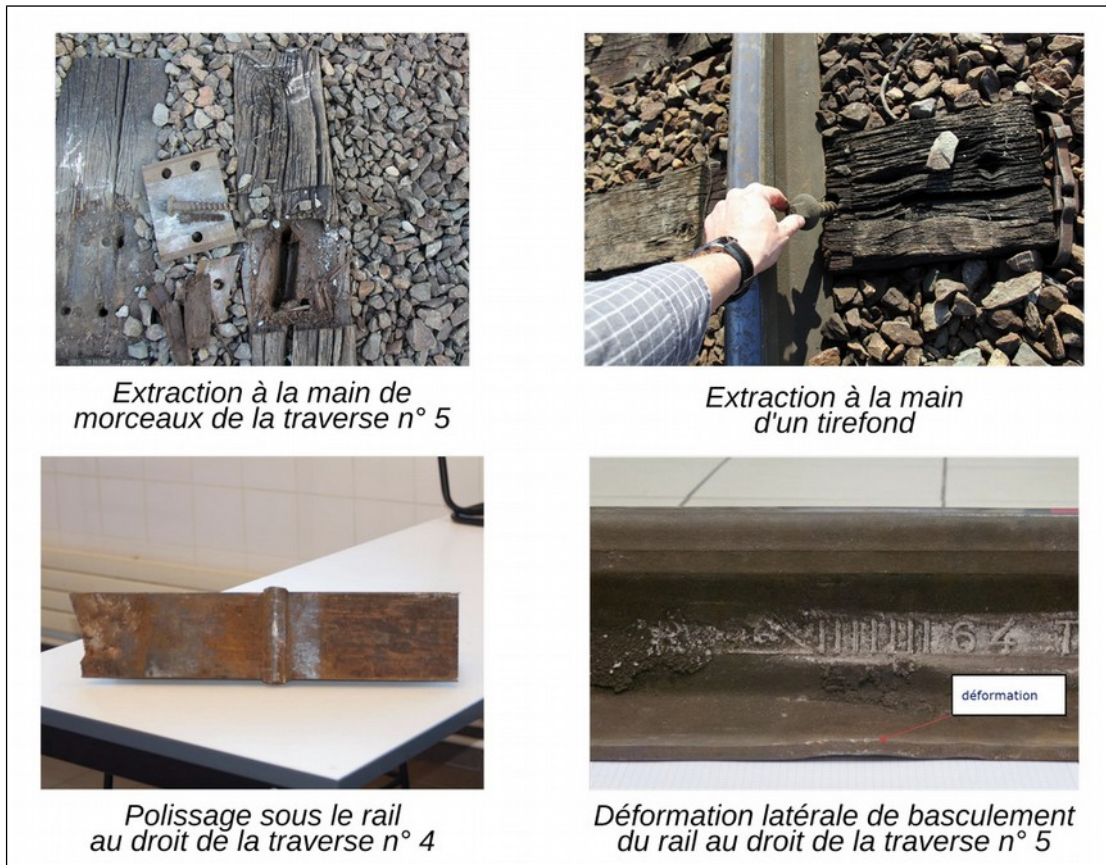


Figure 24 : défauts de fixation du rail observés sur site

De l'ensemble de ces constats, il apparaît que dans la zone des traverses n° 3 à n° 5 :

- le rail en file haute est fortement déformé sous l'effet des efforts de guidage dans la courbe de faible rayon ;
- et que, le rail présentait plusieurs défauts de tenue entraînant du jeu en mobilité transversale, en basculement latéral, et dans une moindre mesure en vertical, lors du passage des charges.

Il est vraisemblable que la mobilité du rail a, pour partie, favorisé le développement des fissures en fatigue identifiées dans les sections rompues (fissure à 80 % du champignon à l'amont et à 10 % à l'aval).

3.5 - Les relevés ultrasoniques des voies du triage de Sibelin suite à l'accident

Immédiatement après l'accident, par mesure conservatoire et dans l'attente des conclusions sur la cause du déraillement, le gestionnaire d'infrastructure a organisé une campagne exceptionnelle de contrôle de l'état de fissuration des voies de service du triage de Sibelin, par ultrasons (voir § 2.6.2). Une telle campagne n'entre pas dans le cadre des opérations de maintenance périodique prévue par les référentiels sur voie de service.

La campagne a ausculté les deux faisceaux relais nord-sud et sud-nord, et les deux faisceaux de départ et de réception du site de Sibelin (voir le descriptif des faisceaux au § 2.1). Ces quatre faisceaux ne font pas l'objet d'auscultations périodiques dans le cadre des prescriptions de maintenance contrairement au faisceau de débranchement. Des campagnes similaires ont aussi concerné les triages de Woippy, du Bourget et de Miramas.

Sur le site de Sibelin, **163 défauts** de fissuration ont été identifiés. Les défauts sont, classiquement sur le réseau, classés en 5 niveaux :

- « NR » : les défauts pouvant rester en voie sans intervention ;
- « O » : les défauts pouvant rester en voie mais nécessitant un suivi de leur évolution ;
- « X1 » et « X2 » : les défauts pour lesquels un risque de rupture existe, ou est important, et devant être éliminé à court terme (X1) ou très court terme (X2) ;
- « S » : défaut pour lequel la rupture du rail est imminente et demande une intervention immédiate.

Sur l'ensemble des défauts identifiés, **14 défauts** ont eu un classement « S », **8** un classement « X2 » et **12** un classement « X1 », soit un total de **34 défauts** très préoccupants. La répartition exacte par faisceau est reprise sur la figure ci-après.

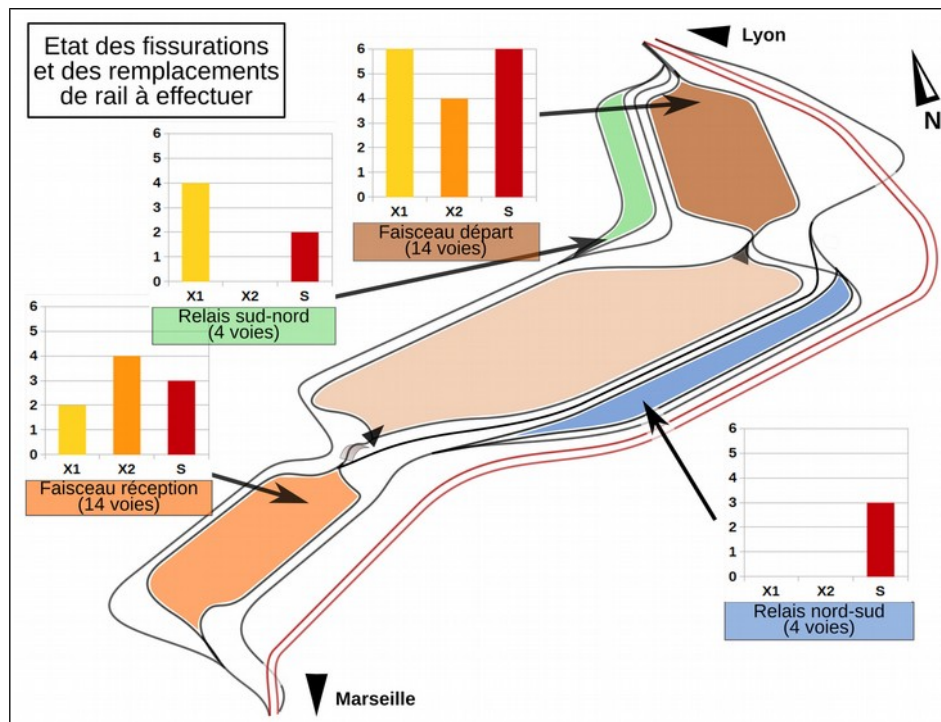


Figure 25 : résultats des relevés ultrasoniques post accident

La moitié des défauts étaient de type « shelling », de nature identique à celui qui a conduit à la rupture de la voie 101. Trois défauts concernaient le faisceau nord-sud de l'accident.

Cette campagne montre l'importance du développement de la fissuration des rails sur le triage et la réalité particulière du risque de rupture des rails. L'état de fissuration des rails est globalement très avancé. Il existe un risque de rupture imminente en plusieurs endroits.

La campagne d'auscultation a conduit à réaliser en urgence le remplacement de 34 rails avant le 1^{er} juillet 2017.

3.6 - La simulation numérique du comportement des wagons-citernes

Postérieurement au 13 mars 2017, SNCF Réseau a commandité une expertise au Centre d'ingénierie de la direction du matériel consistant en une simulation numérique des conditions de passage d'un train lourd en entrée de voie 101. L'objectif était de vérifier le comportement dynamique des wagons du train n° 489241 dans cette portion de voie et de quantifier les efforts d'inscription du convoi dans les courbes et contre-courbes serrées d'entrée sur la voie 101. L'objectif était également de mesurer l'effet du serrage excessif de certains attelages des wagons constaté sur le convoi accidenté (serrage à fond).

Un modèle numérique de la voie a été construit. Un modèle numérique des wagons VTG également. Ces modèles ont été assemblés et traités par le logiciel SIMPACK de simulation des mécanismes multicorps.

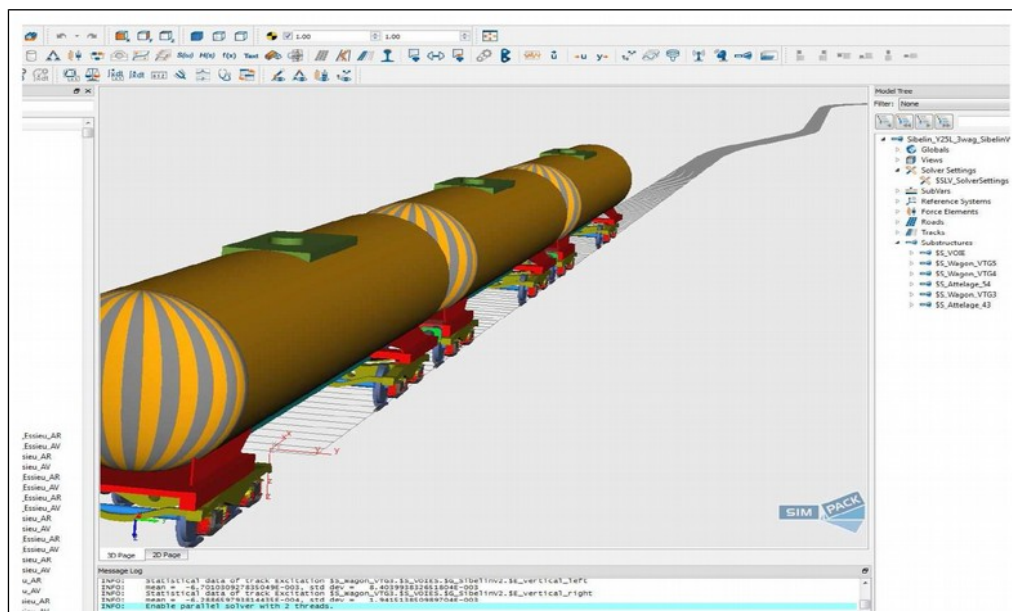


Figure 26 : vue du modèle numérique de simulation du convoi

Les enseignements de cette expertise sont les suivants :

- La charge minimale verticale d'une roue dans la courbe est de 80 kN (8 tonnes-force). Il ne peut donc y avoir déraillement par délestage de roue.
- L'indicateur de déraillement sur gauche de voie, dit Y/Q, atteint 0,5. Cet indicateur, rapport entre l'effort horizontal et l'effort vertical exercé par la roue sur le rail, caractérise l'aptitude du boudin à monter sur le rail. Il est considéré qu'il n'y a pas de risque pour une valeur inférieure à 1,2. Ceci est largement le cas ici.
- Le serrage des attelages n'a pas d'influence significative sur les efforts mentionnés ci-dessus.

L'expertise conclut que le passage des wagons sur le parcours ne pose ni problème particulier, ni risque de soulèvement des wagons. Cette expertise permet d'écarter l'hypothèse qu'un soulèvement des wagons aurait pu se produire amenant à un choc, lors de leur retombée, justifiant la rupture du coupon de rail.

Nous remarquons que même si l'indicateur Y/Q est inférieur au seuil qui conduit à un déraillement, et qu'il reste donc relativement faible de ce point de vue, le niveau de la poussée latérale sur le rail est assez significatif : la poussée atteint 5 tonnes ($Y = 0,5 \times Q \approx 0,5 \times 11,25 \text{ t} \approx 5 \text{ t}$). La simulation confirme l'importance des efforts de guidage auxquels le rail est soumis, en cohérence avec les constats effectués sur site (écaillage de la bande de roulement, déformation en bascule latérale du rail).

4 - Les investigations sur les causes indirectes de l'accident

Les constats et les analyses du chapitre précédent mettent en évidence plusieurs facteurs causaux qui concernent l'état général de la voie.

Nos investigations se sont donc orientées sur l'exploration des conditions de maintenance et de maintien en bon état de cette voie.

4.1 - Les règles de maintenance des voies de service

4.1.1 - L'organisation générale de la maintenance

Sur le réseau ferroviaire national, la maintenance des voies s'organise de façon généralisée sur trois niveaux d'intervention :

- la **maintenance préventive**, qui comprend des opérations de **surveillance systématique** par des tournées à pied ou par des engins, et également des interventions d'**entretien conditionnel** sur certains constituants ;
- la **maintenance corrective**, qui comprend le remplacement de constituants évalués comme défectueux lors de la maintenance préventive ;
- et enfin, la **régénération** de tout ou partie des constituants.

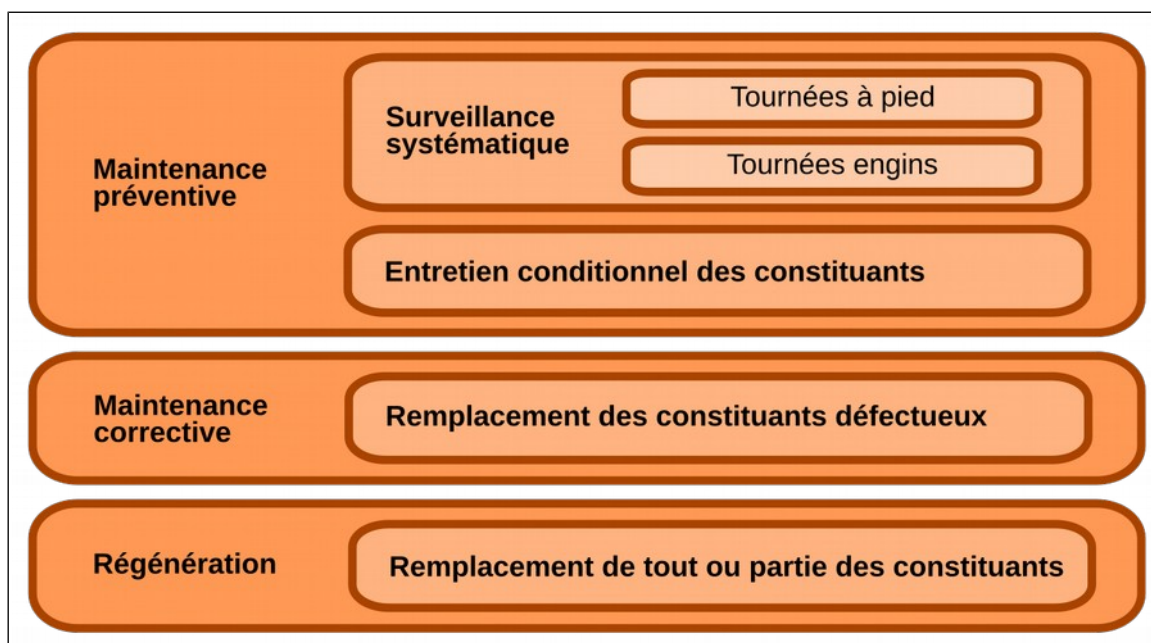


Figure 27 : schéma d'organisation de la maintenance

La **maintenance préventive** est normée. Elle est décrite dans des référentiels nationaux de SNCF Réseau. L'**IN 0264**¹³ est le référentiel décrivant « l'organisation de la maintenance des voies de service (voie courante et appareils de voie) ». Sa dernière version est datée du 4 juillet 2008. D'une manière générale, les prescriptions sont moins exigeantes pour les voies de service qu'elles ne le sont pour les voies principales.

L'IN 0264 distingue quatre classes de voies de service, auxquelles correspondent quatre niveaux de maintenance. La voie 101 du faisceau relais nord-sud, est classée dans la « classe n° 1 », la plus contraignante. C'est en effet une voie supportant une charge à l'essieu maximale de 22,5 tonnes, ainsi que des matières dangereuses. L'annexe 5 donne un tableau synoptique comparant les prescriptions dans les différents cas de voies de service accueillant des marchandises dangereuses.

13 Ce référentiel est un document interne de SNCF Réseau.

Le référentiel prescrit, pour les voies de classe n° 1, la **surveillance systématique** suivante, pour les parties hors aiguillage :

- la réalisation de tournées de surveillance à *pied* à un rythme régulier d'une tournée toutes les huit semaines. Ces tournées, réalisées à pied, sont organisées suivant les modalités définies dans un autre référentiel interne de SNCF Réseau, l'IN 0312 ;
- la surveillance de la géométrie, *par engin*, c'est-à-dire la mesure de l'écartement et du nivellement transversal, une fois par an, à réaliser avec des moyens permettant un enregistrement ;
- d'autres opérations plus spécifiques concernant la saison chaude et l'entretien des joints dans les détails desquels nous n'entrerons pas.

L'**entretien conditionnel** consiste en des interventions annuelles optionnelles, portant sur le renouvellement des traverses, et l'entretien des attaches et de l'écartement lorsqu'ils sont défectueux.

La **maintenance corrective** et la **régénération** sont organisées sur demande avec prise de décision en fonction des disponibilités budgétaires.

4.1.2 - La surveillance de la fissuration des rails

La surveillance par moyen ultrasonique de l'état de fissuration du rail est requise, par le référentiel du gestionnaire d'infrastructure, pour les voies principales (IN 2070 sur la *surveillance des rails posés sur voies principales*). Elle n'est, en revanche, pas inscrite dans l'IN 0264 concernant la maintenance des voies de service. Ces dernières ne font donc l'objet d'aucune surveillance systématique par ultrasons. La surveillance ne peut résulter que d'une demande spécifique.

L'utilisation des moyens ultrasons nécessite un opérateur spécialisé, appelé OPUS (OPérateur Ultra-Son). Celui-ci dépend d'une unité spécialisée de maintenance, rattachée à un établissement de type Infralog (Infrastructure logistique) du gestionnaire d'infrastructure, établissement distinct de l'établissement Infrapôle dont dépend la brigade d'entretien des voies. Il y a donc nécessité d'organiser une coordination entre ces établissements, l'un ayant des besoins de moyens pour assurer la surveillance et l'autre délivrant ces moyens. Cette coordination répond à des règles strictes.

Ainsi, dans les faits, une équipe d'entretien doit, sur voie principale, programmer des tournées ultrasons puisque de telles tournées sont prescrites par les référentiels. Ces tournées sont prioritaires. Si une tournée devait être demandée sur voie de service, elle va être en revanche, beaucoup moins prioritaire puisque, comme nous l'avons vu ci-dessus, l'IN 0264 ne définit aucune surveillance de l'état de fissuration des rails par moyen ultrasons dans le cadre de la maintenance prescrite.

L'équipe qui a repéré un éventuel défaut sur une voie de service, va ainsi rencontrer un obstacle organisationnel pour le diagnostiquer plus avant par des moyens ultrasoniques. Il s'agit d'une contrainte qui bloque la capacité de l'équipe à affiner son diagnostic et qui pourrait l'enfermer dans une attitude fataliste.

4.1.3 - Les règles sur l'efficacité des attaches de voie

Le référentiel interne SNCF d'application nationale IN 1898, intitulé « *normes de maintenance sur l'efficacité des attaches* », prescrit les tolérances sur l'état des attaches et des traverses pour assurer la tenue de la voie.

L'IN 0264 reformule et synthétise ainsi ces exigences pour les voies de service :

« Seules les traverses hors d'usage sont impérativement à remplacer ; il n'y a pas lieu, lors de la visite, d'estimer une évolution du dépérissement ultérieur de la traverse, mais de s'en tenir à l'état réel.

Les traverses qui ne permettent pas la tenue d'un tirefond de chaque côté du rail peuvent être maintenues en voie lorsque les conditions suivantes sont simultanément remplies :

- 1. Elles assurent un appui suffisant.*
- 2. Les deux traverses les encadrant, présentent sur chaque tête, une attache solide ou consolidable de part et d'autre du rail.*
- 3. Elles n'intéressent pas les joints.*
- 4. Elles sont suffisamment réparties, notamment dans les courbes, pour tenir compte de la nature du trafic. »*

Nous notons que ces critères reposent sur une appréciation subjective de la situation et laissent une large marge de décision à ceux qui doivent les appliquer. Pour la voie 101, une traverse sur deux datait de 2006 et attachait solidement le rail. Pour autant, les tirefonds défectueux, sur les autres traverses plus anciennes datant de 1969, n'étaient pas *suffisamment répartis* puisqu'ils étaient nombreux et qu'ils n'ont clairement pas assuré leur rôle lors de l'accident. L'ouverture donnée par la prescription, pour accorder un peu de souplesse, devient une règle générale.

4.2 - La maintenance de la voie 101

Nous allons ci-après examiner plus en détail l'application des principes de maintenance édictés par les référentiels sur le plan local.

La maintenance des voies du triage de Sibelin est assurée par une entité de maintenance locale du gestionnaire de l'infrastructure SNCF Réseau, appelée unité de production voie « Dauphiné – sillon rhodanien ». Elle comprend 94 agents. Elle couvre le territoire de Lyon et de ses proches environs, soit 440 km de voies principales et 240 km de voies de service. Le triage est dans le périmètre de l'équipe dite « Sibelin », de 24 agents. Le faisceau relais nord-sud est plus spécifiquement dans le périmètre de la brigade « Sibelin Sud », comprenant 8 agents.

Nous avons recueilli l'ensemble des informations sur les actions de maintenance effectuées par cette équipe.

4.2.1 - L'état de la voie diagnostiqué par l'équipe de maintenance

L'examen des comptes rendus des tournées de surveillance systématique de la brigade sur la période du 1^{er} janvier 2016 au 13 mars 2017, montre que ces tournées étaient effectuées en cohérence avec la prescription. La fréquence constatée est d'une tournée toutes les huit semaines, soit 9 tournées sur la période. Cette fréquence est conforme à celle définie dans l'IN 0264.

Chaque compte rendu de tournée du faisceau nord-sud recense une dizaine d'opérations de maintenance corrective à réaliser sur le faisceau. Elles sont enregistrées dans un tableau d'amortissement des tournées au niveau de l'unité.

Au 13 mars 2017, le tableau d'amortissement des tournées comprenait 10 opérations correctives concernant la voie 101 dans sa partie courante (hors aiguillages d'extrémité). À noter qu'il comprenait un total impressionnant de 1 194 constatations de défauts à traiter sur l'ensemble du territoire de l'équipe « Sibelin ». Six des dix actions mentionnées pour la voie 101 étaient corrigées à cette date.

	Voie	PK début	PK fin	Opération	Anomalie constatée	Date de constat	Traité le
Travaux sur le rail							
1	101			Remplacement	Prévoir remplacement rails voie 101 à 107	29/01/15	22/08/16
2	101	1,64		Rail	Nord – file montagne 1 rail U33 18 m + 1 rail 4,200 m + 1 joint isolant 6 trous, proche tableau lumineux de correspondance ¹⁴ nord (PK 1,65)	21/06/16	22/08/16
3	101			Rail	Prévoir campagne remplacement rails sur voies 101 à 107 vers le tableau lumineux de correspondance nord	07/12/16	–
4	101 à 107	1,6	1,7	Rechargement	Rechargement à prévoir sur les 2 files	19/05/11	–
5	101 à 107	2,3	2,34	Rechargement	Rechargement à prévoir sur les 2 files	06/07/12	–
Travaux sur les traverses							
6	101 à 107	1,5	2,5	Traverse	Prévoir remplacement de traverses (pour les traverses au niveau du rail)	03/01/13	–
Autres travaux							
7	101	1,66		Soudure	1 Soudure Aluminothermique U33	04/08/14	Fait
8	101	1,68		Joints	2 ohios ¹⁵ manquant file droite	14/09/15	Fait
9	101			Nivellement	Zone boueuse épuration sur 20 m (sortie sud)	19/01/16	Fait
10	101			Attaches	Consolider sur 10 traverses	19/01/16	Fait

Tableau d'amortissement des tournées sur la voie 101 en partie courante

Ce tableau témoigne de la préoccupation constante de l'équipe d'entretien concernant l'état de la voie dans les parties courbes (PK 1,5 à 1,7 et 2,3 à 2,5). Les anomalies touchent principalement l'état du rail et l'efficacité de la voie, sujets en cause dans l'accident.

Le tableau témoigne aussi que l'équipe peine à corriger les défauts identifiés. Certains défauts sont considérés comme traités alors qu'ils ne le sont que partiellement (ligne 1), obligeant à réinscrire à nouveau le défaut lors d'une tournée suivante (ligne 3). Plusieurs défauts ne sont pas traités sur de longues durées (lignes 4 à 6).

Nous observons que, si le mauvais état du rail est bien source de préoccupation, le diagnostic de fissuration du rail n'est, lui, pas posé. La fissure dans le champignon s'était développée depuis longtemps. Elle était interne à celui-ci et donc peu visible à l'œil nu. Les bavures latérales de métal sur le rail gênaient la vue. La fissure n'a certainement pas été observée par les agents d'entretien lors de leurs tournées d'inspection visuelle. Mais en revanche, les fissures d'écaillage en surface étaient quant à elles bien visibles et suffisantes pour déterminer un défaut de rail « 2222 ». Elles auraient dû conduire à mettre en place des investigations plus poussées sur l'état de fissuration.

Nous avons toutefois vu que le diagnostic complet ne pouvait être posé que moyennant l'utilisation de moyens d'auscultation ultrasonique, moyens difficilement accessibles en maintenance courante pour les voies de service jugées non prioritaires.

14 Le tableau lumineux de correspondance est une signalisation au sol répétant le signal de départ, sur chaque voie du faisceau et aux deux extrémités de celui-ci. Le tableau lumineux nord est situé dans la zone où a eu lieu l'accident.

15 Les ohios sont des connexions électriques soudées entre les rails nécessaires à la transmission du retour de courant de traction.

Parallèlement à ce suivi des anomalies en suite des tournées, deux actions d'envergure en maintenance corrective et de régénération avaient été initiées par l'équipe d'entretien en vue de travaux sur le faisceau. Il s'agit des actions suivantes :

- le remplacement du rail file haute dans la courbe d'entrée de la voie 101, en maintenance corrective ;
- la régénération complète des têtes du faisceau relais nord-sud.

Nous allons examiner ces deux initiatives successivement.

4.2.2 - Les travaux de remplacement de rail en maintenance corrective

Lors des constats immédiats faisant suite à l'accident, il a pu être observé la présence de coupons de rail en bord de voie (voir figure 16). Ils portaient l'inscription peinte « voie 101 ». Ces coupons de 18 mètres avaient été approvisionnés en août 2016, soit 7 mois plus tôt. Comme cela a été mentionné dans la déclaration du chef de la brigade d'entretien, ils étaient destinés à remplacer le rail de la file haute atteint de bavures d'écoulement du métal. Ces travaux répondaient au constat de la ligne 1 du tableau ci-dessus.

Une première partie de rail avait déjà fait l'objet d'un remplacement les 21 et 22 août 2016. Il s'agit de la partie du rail située à l'amont, avant l'éclissage provisoire avec des « Cès » de serrage, distante de 1,73 m de la zone de rupture. Ces travaux n'avaient pas pu être prolongés dans la zone qui a rompu pour des raisons de difficulté de coordination avec le service électrique, leur réalisation nécessitant le déplacement d'appareils de signalisation.

Ces travaux n'étaient pas motivés par l'état de fissuration du rail car celui-ci n'avait pas été reconnu. Ils étaient motivés par l'affaissement de la table de roulement (usure de surface et bavures d'écoulement plastique).

Bien que débutés en août 2016, au 13 mars 2017 ces travaux n'étaient pas achevés. S'ils l'avaient été, l'accident aurait pu être évité.

4.2.3 - La demande de régénération du faisceau « nord-sud »

Une autre action, à l'initiative de l'équipe d'entretien, avait été conduite antérieurement. Il s'agit d'une demande de financement de travaux, appelée « fiche d'émergence de travaux », portant la référence n° 2013/47, faite en vue de la régénération des têtes de voie du faisceau relais nord-sud. Selon les procédures internes de SNCF Réseau, ce type de demande est à effectuer pour solliciter le financement d'une opération d'entretien lourde qui n'entre pas dans le cadre des budgets courants alloués à la maintenance corrective des installations.

La fiche a été initiée en **décembre 2013** et est datée du 13 janvier 2014. Elle présente des travaux de régénération des 60 mètres de tête des voies 101 à 107 qui sont courbes, avec un objectif de réalisation en 2017. Le motif exposé est le suivant : « *les traverses neuves injectées en 2006 sont peu nombreuses, ne permettent pas de tenir l'écartement sans interventions correctives récurrentes ; les rails sont atteints de shelling en file haute, et la file basse est écrasée de façon générale* ».

Ces travaux, évalués à 216 k€, n'ont pas été approuvés sur le programme 2017 par le processus interne de validation des engagements de dépense. Ils ont été renvoyés à un arbitrage futur sur les programmes ultérieurs.

4.2.4 - Conclusion sur la maintenance de la voie 101

L'équipe d'entretien avait clairement identifié la dégradation des têtes du faisceau relais nord-sud. Elle avait engagé des actions en vue de la traiter.

Si l'équipe avait bien identifié la difficulté, elle n'avait pas pour autant estimé un risque immédiat pour la sécurité. Le défaut de shelling généralisé pouvait conduire à un état avancé de fissuration du rail file haute. L'état réel de fissuration n'avait pas été reconnu par des moyens d'auscultations adéquats. Pour autant ces moyens n'étaient pas accessibles dans une mise en application courante des référentiels.

L'équipe devait en permanence composer entre l'état de dégradation important et la faiblesse des moyens pour y faire face. Sans doute que, enfermée dans ces injonctions contradictoires, l'équipe n'a pas été en mesure d'évaluer correctement le risque imminent.

4.3 - Le dimensionnement des voies de service

Si, comme nous l'avons vu, les conditions d'entretien de la voie 101 présentaient certaines difficultés qui expliquent les ruptures du 13 mars 2017, nous nous sommes, en complément, interrogés à titre de vérification, sur le dimensionnement mécanique de la voie au regard des charges cycliques importantes à supporter. Une rupture en fatigue peut être généralement révélatrice d'un manque de prise en compte du phénomène de fatigue dans le dimensionnement. De même, les constats effectués précédemment montrent le niveau particulier des efforts de guidage dans les courbes de faible rayon auxquels la voie est soumise sans être possiblement dimensionnée pour.

Le premier constat que nous faisons est que le gestionnaire d'infrastructure ne dispose pas de règles de conception applicables aux voies de service. Aucun référentiel ne donne de spécifications concernant le dimensionnement des voies de service.

De fait, ce sont des règles portant sur les voies principales qui peuvent être utilisées. Le référentiel correspondant est le RFN-IG-MR 00 A-00-n° 001 « Règles d'admission des matériels roulants sur le RFN en fonction de la sollicitation de la voie » figurant aux documents techniques du Document de référence du réseau ferré national (DRR) qui est public. Le référentiel définit, en fonction de l'armement de la voie, le type de matériel qui peut y rouler. Ces règles s'appellent communément règles « Demaux » du nom de leur auteur.

L'armement de la voie 101 est de type rail Vignole de 46 kg/m en barres normales de 18 mètres avec des traverses en bois au pas de 0,6 mètre. Ces données conduisent, selon le référentiel, à un coefficient $I/v/L$ valant 301 mm² (ce coefficient dit « Demaux », est égal au rapport du module d'inertie du rail sur le pas des traverses. Il caractérise la résistance du rail à demi-usure). Selon le référentiel, cet armement est compatible avec la circulation d'un matériel roulant désigné D, c'est-à-dire avec une charge à l'essieu de 22,5 tonnes. La vitesse maximale admissible donnée par le référentiel est de 80 km/h.

L'armement de la voie 101 est donc compatible avec les convois du type de celui qui circulait le 13 mars 2017.

Nous remarquons cependant que les vérifications selon les règles « Demaux » mettent en œuvre des principes très simplifiés par rapport à la complexité des sollicitations mécaniques de la voie. Elles ne prennent pas en compte l'état de contrainte réel dans le rail, celui-ci ne pouvant, dans l'état des connaissances des sciences physiques actuelles, être bien modélisé compte-tenu de la nature composite et complexe de la voie ferrée. Les règles ne reposent pas non plus sur une vérification rigoureuse par des campagnes d'essais en laboratoire ou en voie. Les règles sont empiriques et c'est leur usage ancien qui a produit leur justification. A fortiori, il n'est pas objectivement établi que le respect de la règle garantisse la résistance en fatigue, expressément si l'environnement traverses-ballast devait se dégrader.

Le risque de rupture par fatigue du rail n'est ainsi objectivement pas couvert par le dimensionnement de la voie et, pour être contré, il doit donc être spécialement surveillé par des moyens de mesure adaptés.

De même, la particularité des efforts dans les courbes de faible rayon n'est pas correctement évalué. Il n'est objectivement pas établi que cette particularité soit prise en compte dans le dimensionnement du système d'attache.

4.4 - Les accidents de marchandises dangereuses sur le site

Dans le but d'identifier des signes précurseurs de la criticité des circulations des marchandises dangereuses sur le triage de Sibelin, nous avons analysé l'historique de tels accidents sur le site.

Sur les trois années 2014 à 2016, le site a connu **16 accidents** de marchandises dangereuses. Le tableau ci-après donne la liste de ces accidents.

Date	Faisceau	PUI MD	Cause	Description de l'accident
31/01/14	Formation	X	wagon	Déraillement de 3 wagons suite à rattrapage lors du tri à la gravité
02/06/14			manœuvre	Déraillement suite au talonnage d'une aiguille
17/07/14	Formation		wagon	Déraillement de wagons suite à rattrapage lors du tri à la gravité
07/10/14	Formation		manœuvre	Déraillement d'un wagon sur un sabot incorrectement positionné
19/11/14	Formation		wagon	Déraillement d'un wagon suite à rattrapage lors du tri à la gravité
26/02/15	Service entretien		manœuvre	Déraillement d'un engin lors d'une mauvaise manœuvre d'aiguillage
03/03/15	Relais sud-nord		manœuvre	Déraillement sur talonnage d'aiguille
11/03/15	Formation		wagon	Déraillement d'un wagon-citerne suite à rattrapage lors du tri à la gravité
12/05/15	Formation	X	wagon	Déraillement d'un wagon-citerne suite à saut d'un sabot
12/05/15	Formation		wagon	Déraillement d'un wagon plat accouplé à un wagon-citerne lors du tri
23/06/15	Formation (voie évite- bosse)		manœuvre	Déraillement d'un wagon en manœuvre suite à oubli d'un sabot
30/07/15	Formation		wagon	Déraillement d'un wagon sur un sabot freineur en fin de descente
18/12/15	Formation		wagon	Déraillement d'un wagon suite à rattrapage par un wagon MD
16/01/16	Formation		manœuvre	Prise en écharpe sur la bosse
15/07/16	Formation	X	manœuvre	Déraillement d'un wagon-citerne suite à erreur de manœuvre
27/12/16	Formation	X	wagon	Déraillement d'un wagon dans les freins de voie secondaires

Tableau des accidents de déraillement sur le site de Sibelin de 2014 à 2016

L'analyse du tableau montre, sur les trois années d'observation, que les accidents se produisent généralement lors des opérations de tri à la gravité (sur la « bosse ») ou lors des manœuvres qui suivent dans le faisceau de formation. Il s'agit majoritairement du déraillement partiel ou complet d'un wagon. Neuf déraillements ont pour cause un comportement défectueux des wagons lors du tri à la gravité (wagons mauvais rouleurs ou mal chargés). D'autres déraillements ont pour cause une erreur de manœuvre (talonnage, sabot mal positionné).

Quatre de ces accidents ont donné lieu à l'activation du PUI MD d'intervention des pompiers.

Un accident a eu lieu sur un faisceau relais, le faisceau « sud-nord », consistant au talonnage d'un aiguillage par le train pour non-respect de la signalisation par le conducteur du train. Il a été sans gravité sur la marchandise.

Aucun des accidents de marchandises dangereuses n'a pour cause une défaillance de l'infrastructure, et a fortiori de la voie, annonciatrice d'un risque particulier pour ce type de transport.

4.5 - L'audit national de 2014 sur le transport ferroviaire des matières dangereuses

En 2014, suite à 5 déraillements intervenus sur 3 des principaux triages du pays (le Bourget, Woippy et Sibelin) dans les deux mois de décembre 2013 et janvier 2014, le ministre délégué chargé des transports avait demandé au Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD) un état des lieux des infrastructures et des modes d'exploitation ferroviaire dans les triages par lesquels transitent des matières dangereuses. Nous évoquerons ici les points abordés par l'audit en relation avec l'accident du 13 mars 2017.

L'audit s'était attaché à rechercher les causes pouvant expliquer l'accumulation des accidents et a établi des recommandations permettant de réduire le risque de survenance d'accidents¹⁶.

Dans cet audit, le transport ferroviaire des marchandises dangereuses est évalué comme globalement sûr. Les analyses statistiques mettent en évidence une réduction du nombre d'évènements de sécurité dans le temps. On ne compte également aucune victime liée directement au transport ferroviaire de marchandises dangereuses en France depuis 30 ans.

L'entretien courant des installations est évalué comme globalement satisfaisant, du moins pour les plus sensibles (bosse et faisceaux de débranchement). L'audit pointe une nécessité de renouvellement des traverses et des rails sur certains faisceaux. Selon lui, *« ces voies sont certes les moins sollicitées et les moins critiques en cas de déraillement, mais cette situation ne peut être considérée comme satisfaisante »*.

L'audit s'interroge alors sur l'absence, dans le référentiel de maintenance des voies de service, de contrôle des rails par ultrasons dans les triages (à l'exception des coupons mobiles des freins de voie hydrauliques primaires). Il a émis la recommandation suivante :

« Prévoir un contrôle des rails par ultrasons, au moins par sondage dans un premier temps, et en donnant priorité au voisinage de la bosse sans pour autant s'y limiter. »

L'audit pointe également les besoins en renouvellement des infrastructures. Selon lui, SNCF réseau a lancé un important programme d'opérations de gros entretien (OGE),

¹⁶ Le rapport de l'audit est en date de septembre 2014 et s'intitule « Triage des wagons de marchandises dangereuses : état des lieux des infrastructures et des modes d'exploitation ». Il est accessible sur Internet sur la base de données du CGEDD.

permettant de renouveler sur une douzaine d'années (2012 – 2025) les appareils de voie et certaines portions de voies (notamment traverses). Il recommande de :

« Poursuivre et amplifier l'effort de renouvellement de l'infrastructure, notamment par l'amélioration des voies, et prévoir le remplacement des postes à l'horizon 2020. »

La Direction générale des infrastructures, des transports et de la mer (DGITM) du ministère de la Transition écologique et solidaire a mis en place un suivi de la mise en œuvre des recommandations de l'audit.

Selon le suivi effectué à février 2017, en ce qui concerne la recommandation de contrôle des rails par ultrasons, SNCF Réseau avait défini une doctrine de contrôle par ultrasons spécifique aux 4 triages avec sondage de la bosse jusqu'au 1^{er} appareil de voie. L'ensemble des contrôles était estimé être réalisé entre le 1^{er} décembre 2014 et le 20 mai 2015 selon les informations délivrées par SNCF Réseau.

À l'analyse, il s'avère que l'action a été conduite en donnant la priorité à l'environnement de la bosse, et **en s'y limitant**, ce qui n'était pas dans l'esprit initial de la recommandation puisque celle-ci demandait explicitement **de ne pas se limiter** à l'environnement de la bosse. Les contrôles par ultrasons n'étaient clairement pas effectués dans plusieurs parties sensibles des triages comme les faisceaux réception, départ et relais.

Concernant la seconde recommandation, un programme de renouvellement avait été mis en avant par SNCF Réseau pour une enveloppe de 66 M€. Le mode de financement restait toutefois à définir.

Il apparaît donc que les recommandations de l'audit du CGEDD n'ont été que partiellement suivies par le gestionnaire d'infrastructure. Si elles l'avaient été plus complètement, la situation à risque du faisceau relais de Sibelin aurait pu être détectée et corrigée.

4.6 - Les mesures préventives de maintenance des voies de service

Les campagnes exceptionnelles d'auscultation ultrasonique des grands triages du RFN qui ont été conduites en urgence à la suite de l'accident du 13 mars 2017, ont révélé l'existence de nombreux défauts dans les rails (cf § 3.5). SNCF Réseau a alors décidé de faire évoluer les règles de maintenance appliquées sur les voies de service circulées par les trains de marchandises dangereuses.

Les principes orientant cette évolution sont les suivants :

- sur les cinq triages nationaux que sont Sibelin, Le Bourget, Miramas, Woippy et Somain, il est demandé la mise en œuvre d'un contrôle systématique par ultrasons des rails du même niveau d'exigence que celui des voies principales. Cette surveillance s'accompagne des mêmes processus de repérage, classement, codification et exigence de délai de traitement que les défauts des voies principales ;
- sur les autres sites, il est demandé de mettre en place systématiquement des tournées visuelles de la voie, au pas de temps maximum de 2 ans. En fonction des résultats de ces tournées, le dirigeant en charge de l'entretien aura la possibilité de mettre en place une surveillance par ultrasons ciblée sur un tronçon de voie, ainsi que sur les défauts jugés préoccupants ;
- sur l'ensemble des sites recevant des matières dangereuses, il est prévu la mise en place de mesures organisationnelles et techniques normées pour réduire les conséquences des accidents de matières dangereuses. Ces mesures, restant à définir, sont variables en fonction de la catégorie du site qui est définie sur trois niveaux. Une grille d'analyse multicritères permet d'évaluer le niveau en prenant en compte la volumétrie des marchandises reçues, leur nature, et le degré d'urbanisation du site.

Ces dispositions font actuellement l'objet de révision des référentiels concernés du gestionnaire d'infrastructure. La troisième disposition qui concerne les mesures organisationnelles et techniques fait l'objet d'un guide technique en cours d'élaboration.

4.7 - Les investigations sur la résistance des wagons-citernes

Un sujet, d'un autre ordre que ceux que nous avons évoqués précédemment dans le rapport, concerne non pas les causes mais les conséquences du déraillement : pourquoi un wagon a-t-il subi une perforation et n'a-t-il pas été en capacité de résister aux chocs subis ?

Pour éclairer la réponse à cette question, nous avons conduit des investigations notamment en vue de détecter un éventuel facteur aggravant de la conception de la citerne sur l'ampleur des perforations.

Les chocs sur les citernes ont été importants mais sont restés modérés compte tenu de la vitesse peu élevée du convoi. La citerne du cinquième wagon n'a pas résisté tandis que celle du quatrième wagon a bien résisté. Dans des configurations de vitesse plus élevée, les conséquences auraient pu être plus importantes. L'accident du 13 mars 2017 n'est pas représentatif d'une situation maximale.

Le RID et les normes de conception appelées ne définissent pas d'exigence spécifique sur la résistance aux chocs des citernes (par exemple un cas de charge au poinçonnement). La résistance de l'enveloppe de la cuve est déterminée par les critères de résistance aux pressions internes et externes liées au contenu liquide-gazeux. Des exigences portent également sur la nature de l'acier à utiliser pour les citernes et donc, indirectement, la ductilité et la résistance au poinçonnement vis-à-vis des chocs.

Il n'y a pas de carence à rechercher concernant le dimensionnement des citernes vis-à-vis de la réglementation. On peut malgré tout se demander si la réglementation est suffisamment exigeante sur ce point.

L'accident était loin d'une situation maximale et pour autant quelques perforations ont eu lieu. Il nous semble donc illusoire d'imaginer faire évoluer la réglementation pour prendre en compte des enveloppes de situation accidentelle et empêcher coûte que coûte le risque de perforation. Ce ne serait, nous semble-t-il, qu'au prix d'une grande complexification de la structure des wagons et d'un renchérissement de leur coût.

5 - Analyse du déroulement de l'accident

Ce chapitre restitue l'analyse du BEA-TT du déroulement de l'accident en conclusion des investigations conduites.

Le lundi 13 mars 2017 à 4 h 05, le train de marchandises dangereuses n° 489241, comprenant 22 wagons-citernes chargés de bioéthanol, entre sur la voie 101 du faisceau relais « nord-sud » du triage de Sibelin.

La première rupture de rail

Sous l'avant du train, le rail file haute de la courbe d'entrée subit une **première rupture**. Ce rail était atteint d'une fissuration transversale par fatigue occupant 80 % du champignon provenant du développement d'une fissure amorcée depuis l'écaillage de la surface de roulement. Par nature, une rupture de fatigue se produit de manière imprévisible après de nombreux cycles de chargements lourds.

La rupture se situe entre la traverse n° 3 et la traverse n° 4 (rupture amont). Elle s'est produite au passage du bogie arrière du deuxième wagon, ou possiblement lors d'un passage de bogie précédent vu le matage successif de la table de roulement mis en évidence en figure 22.

La continuité de la voie est toujours assurée. Le train a poursuivi son avancée sur la voie.

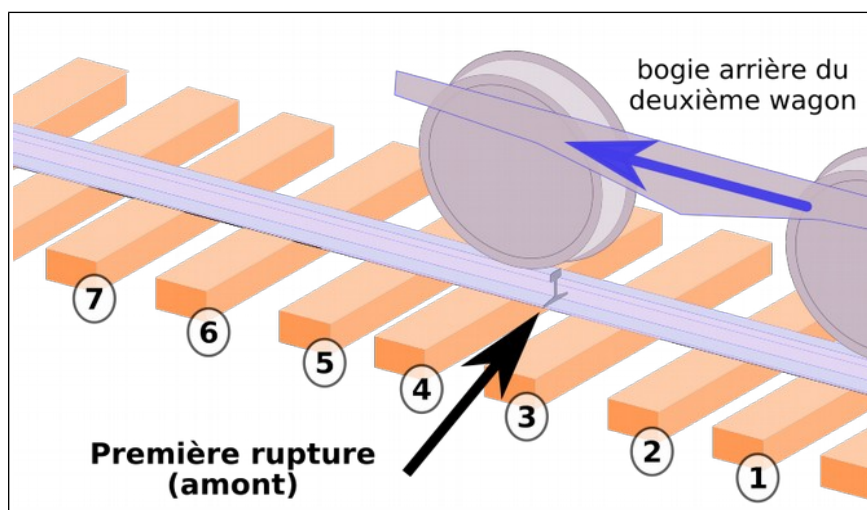


Figure 28 : la première rupture du rail

La deuxième rupture de rail

La première rupture est située dans une zone de voie de courbe de faible rayon. Le bogie exerce un effort transversal sur le rail en raison du guidage des wagons dans la courbe. La simulation numérique a permis d'évaluer cet effort à 5 tonnes.

Dans cette zone, l'état général de la voie est aussi assez dégradé : une traverse sur deux est ancienne et les attaches des traverses anciennes ne tiennent pas correctement le rail. Le rail a une certaine mobilité dans le sens transversal, en basculement latéral et sans doute en vertical également. Il a pu être observé, d'une part, un polissage sous le patin du rail au droit de la traverse n° 4, et d'autre part, une déformation du patin du rail (de bascule latérale) au droit des traverses n° 4 à n° 6. Ces défauts sont antérieurs à l'accident.

Enfin, une autre fissure en fatigue s'est amorcée dans cette zone. Elle occupe 10 % de la section du champignon.

Le rail file haute est affaibli dans son appui du fait de la première rupture¹⁷, il manque de tenue du fait de la mauvaise efficacité des attaches, il est fragilisé par une amorce de fissure. Il est soumis à une poussée latérale et verticale. Sous ces effets, alors que l'essieu arrière du bogie passe la première rupture, le rail subit une **seconde rupture**. La rupture se situe entre la traverse n° 5 et la traverse n° 6 (rupture amont). Le coupon de rail entre les deux ruptures mesure 1,10 mètre.

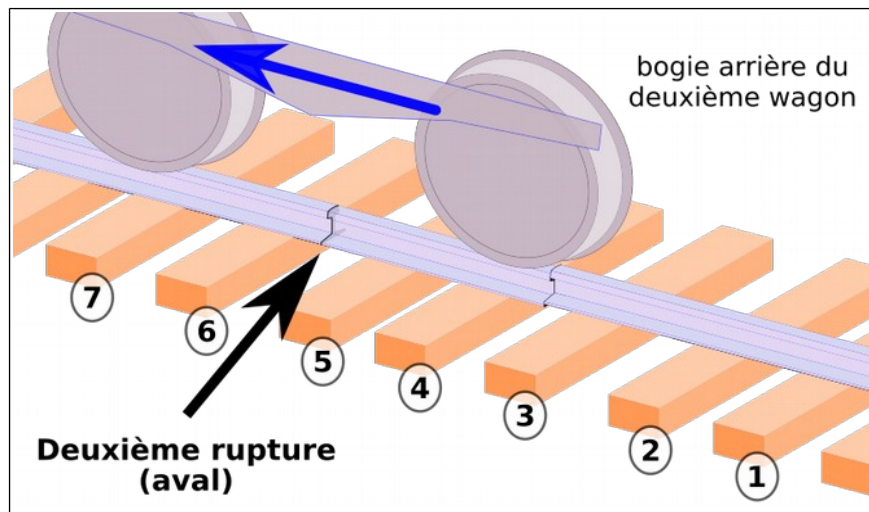


Figure 29 : la deuxième rupture du rail

Le bogie arrière du deuxième wagon dégage de la zone rompue. L'essieu arrière martèle la surface du rail au passage des ruptures tout en restant guidé par l'avant du bogie.

Le pivotement du rail

Une fois le rail rompu en deux endroits, le coupon isolé par la double rupture n'est tenu que par les seules attaches des traverses n° 4 et n° 5. L'attache de la traverse n° 4 est en état. En revanche, l'attache de la traverse n° 5, sur des tirefonds de moindre tenue, est inefficace. Le coupon de rail pivote ainsi autour de l'axe vertical de la traverse n° 4 sous l'effet de l'effort de guidage de la roue suivante.

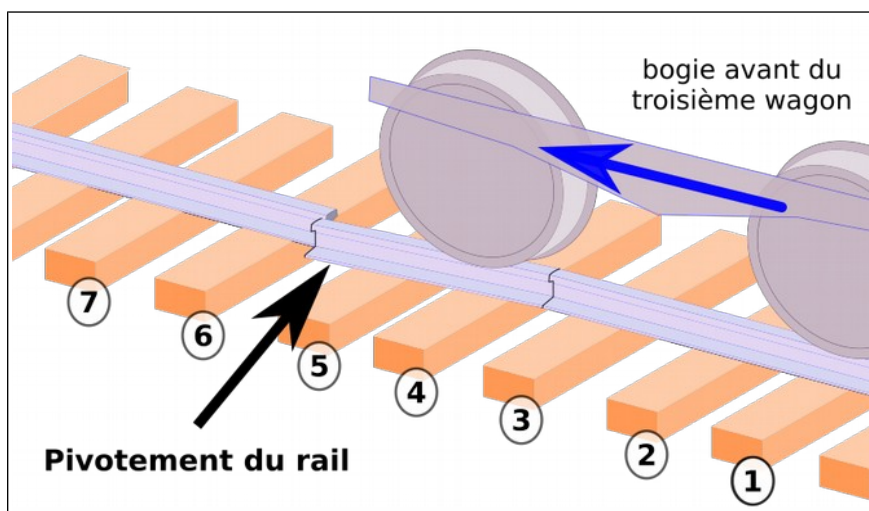


Figure 30 : le pivotement du rail

¹⁷ Dans un rail en porte-à-faux, nous pouvons estimer que les contraintes augmentent d'un facteur 5 par rapport à celles d'un rail continu. En fléchissement par exemple, selon les lois de la mécanique, la contrainte est proportionnelle au moment de flexion du rail. Pour un rail continu, le moment est de l'ordre de 0,2 fois la charge exercée sur le rail. Pour un rail en porte-à-faux de 1,10 mètre, il vaut 1,10 fois cette charge, soit 5,5 fois plus.

Le déraillement des troisième et quatrième wagons

Le pivotement du coupon de rail facilite le déguidage du bogie et entraîne la sortie de voie du bogie avant du troisième wagon. Les autres suivront.

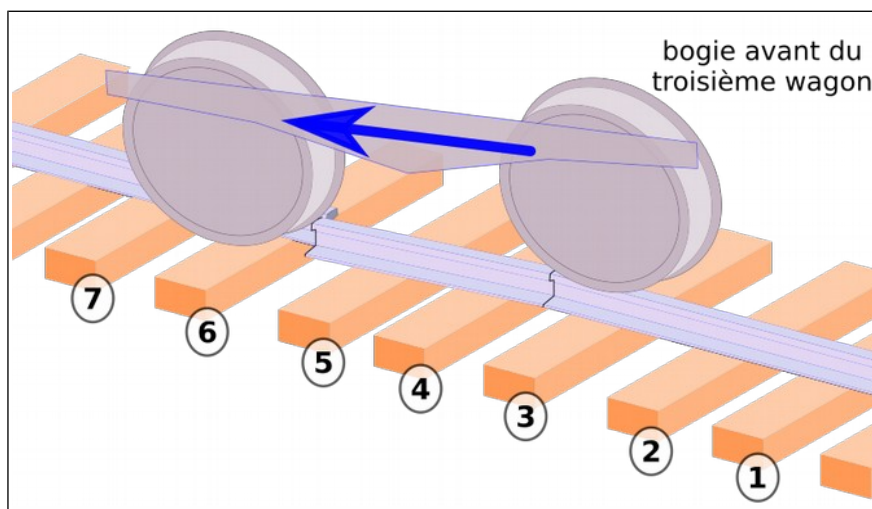


Figure 31 : le déraillement du troisième et du quatrième wagons

Il est possible pour une meilleure compréhension, de reconstituer un enchaînement plausible du renversement des wagons à la suite de la rupture du coupon de rail. Il n'est pas évident de le reconstituer avec exactitude, car certains constats sont restés fragmentaires. Les wagons ont été déplacés très vite après l'accident et la voie a été rapidement remaniée pour être reconstruite. Nous donnons donc la version du déroulement du déraillement telle qu'elle nous paraît émerger des constats recueillis.

Dans un premier temps le troisième wagon quitte la voie. Il se déporte sur la gauche tout en restant accroché au train. Il roule sur les traverses qui offrent une bonne largeur d'appui. Le quatrième wagon déraille à son tour. Les deux wagons ont alors déraillé. Les wagons restent encore verticaux, accrochés aux autres wagons. Ils sont poussés à l'arrière par le reste du train qui est en légère descente. En avançant, ils roulent sur les traverses. Des premiers dégâts sont occasionnés à la voie et ralentissent le train.

Les tampons avant du troisième wagon, et les tampons arrière du deuxième wagon, s'enchevêtrent du fait du décalage latéral et vertical des deux wagons qui gardent un maintien entre eux par l'attelage.

Le bogie avant du troisième wagon qui s'écarte progressivement de l'axe de la voie finit par sortir des traverses sur lesquelles il roule. Les roues externes s'enfoncent dans le ballast (voir la trajectoire des roues sur la figure 18).

Le troisième wagon bascule vers la gauche, entraînant avec lui le quatrième wagon.

Dans le mouvement ascendant de la bascule du troisième wagon, son tampon avant droit, surbaissé par rapport au crochet d'attelage du deuxième wagon, est cassé par celui-ci (voir figure ci-après). Dans l'effort, le crochet est poussé en butée sur le côté droit. Symétriquement, le crochet du troisième wagon légèrement surbaissé par rapport au tampon arrière gauche du deuxième wagon, marque celui-ci lors du mouvement de bascule (cette marque est nettement visible – voir le relevé en annexe 4).

Les attelages, à l'arrière et à l'avant de la paire de wagon qui a basculé se rompent. Le train se désolidarise, provoquant la rupture de la conduite générale, et le freinage général.

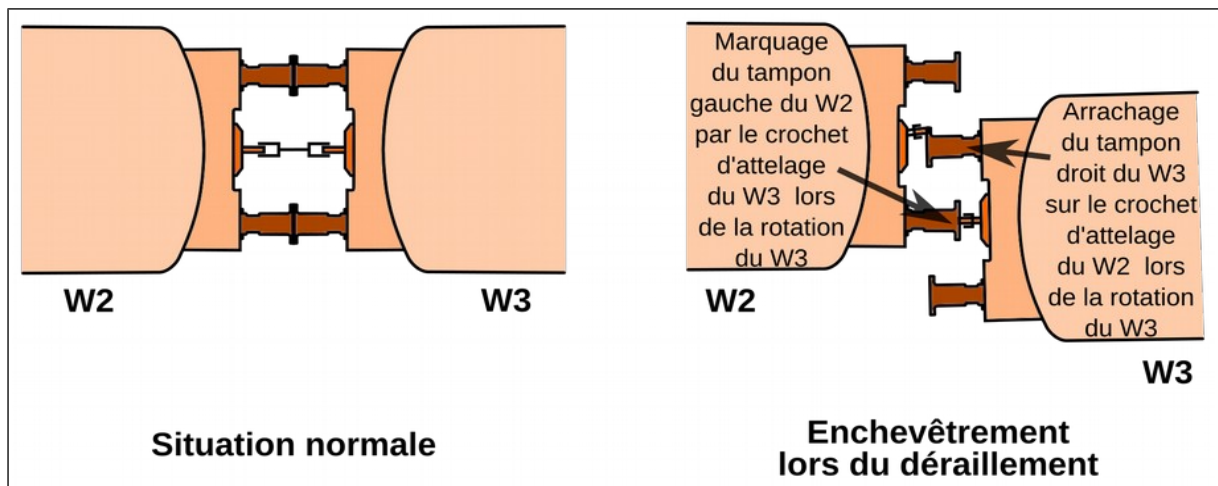


Figure 32 : enchevêtrement des tampons et conséquences lors du basculement

L'arrêt du train et la perforation du cinquième wagon

La locomotive et les deux premiers wagons s'arrêtent, par le freinage commandé par la rupture de la conduite. L'arrêt prend moins d'une dizaine de secondes. Seulement quelques mètres sont parcourus.

Le troisième et quatrième wagons, toujours solidaires, glissent sur leur flanc, non sans avoir labouré la voie 101, notamment au moyen du bogie avant du troisième wagon qui a pivoté à 60°. Les deux wagons s'arrêtent à peu près en même temps que l'avant du train.

L'arrière du train, poussé par l'inertie du convoi et l'effet gravitaire de la descente, continue d'avancer. Le cinquième wagon déraile à son tour sur le rail rompu. Il rattrape le quatrième wagon qui est couché et vient le heurter violemment. Le tampon arrière droit du quatrième wagon, celui qui est en haut, enfonce la citerne du cinquième wagon. Celle-ci se déchire produisant une première ouverture par laquelle s'échappe son contenu inflammable.

Poussé par le choc, le quatrième wagon couché heurte à son tour violemment le troisième wagon lui-même couché. Le tampon arrière droit du troisième wagon, en haut, enfonce la citerne du quatrième wagon qui résiste.

Dans ce nouveau choc, l'arrière du troisième wagon est chassé vers la gauche (dans le sens de la marche) et s'immobilise en position légèrement en biais sur la voie 1ter adjacente.

L'arrière du train avance toujours. Le cinquième wagon vient s'accoler au quatrième wagon couché. Il reste guidé sur son flanc par le quatrième wagon et se maintient debout. Sa citerne racle les roues droites du bogie arrière du quatrième wagon, qui sont en l'air. La citerne se perforé à nouveau au niveau du deuxième anneau de renfort de la cuve.

Dans l'avancée de l'arrière du train, le sixième wagon aborde alors le tronçon de rail rompu. Son premier essieu s'apprête à dérailler à son tour. Toutefois, le convoi constitué par l'arrière du train s'immobilise suite au freinage. Le premier essieu du sixième wagon a tout juste déraillé, en appui fixe sur l'extrémité du tronçon de rail rompu. Ce tronçon de rail finit par s'enfoncer sous la roue et se soulever par effet bascule à son autre extrémité (voir figure 15).

L'alerte des secours

Le conducteur constatant la fuite de la conduite générale du train observe le train et découvre le déraillement. Il avise immédiatement le régulateur qui donne l'alerte d'accident de transport de marchandises dangereuses au service de secours. Ceux-ci interviennent et sécurisent le site en un délai de 24 heures.

6 - L'analyse des causes et les orientations préventives

6.1 - L'arbre des causes

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

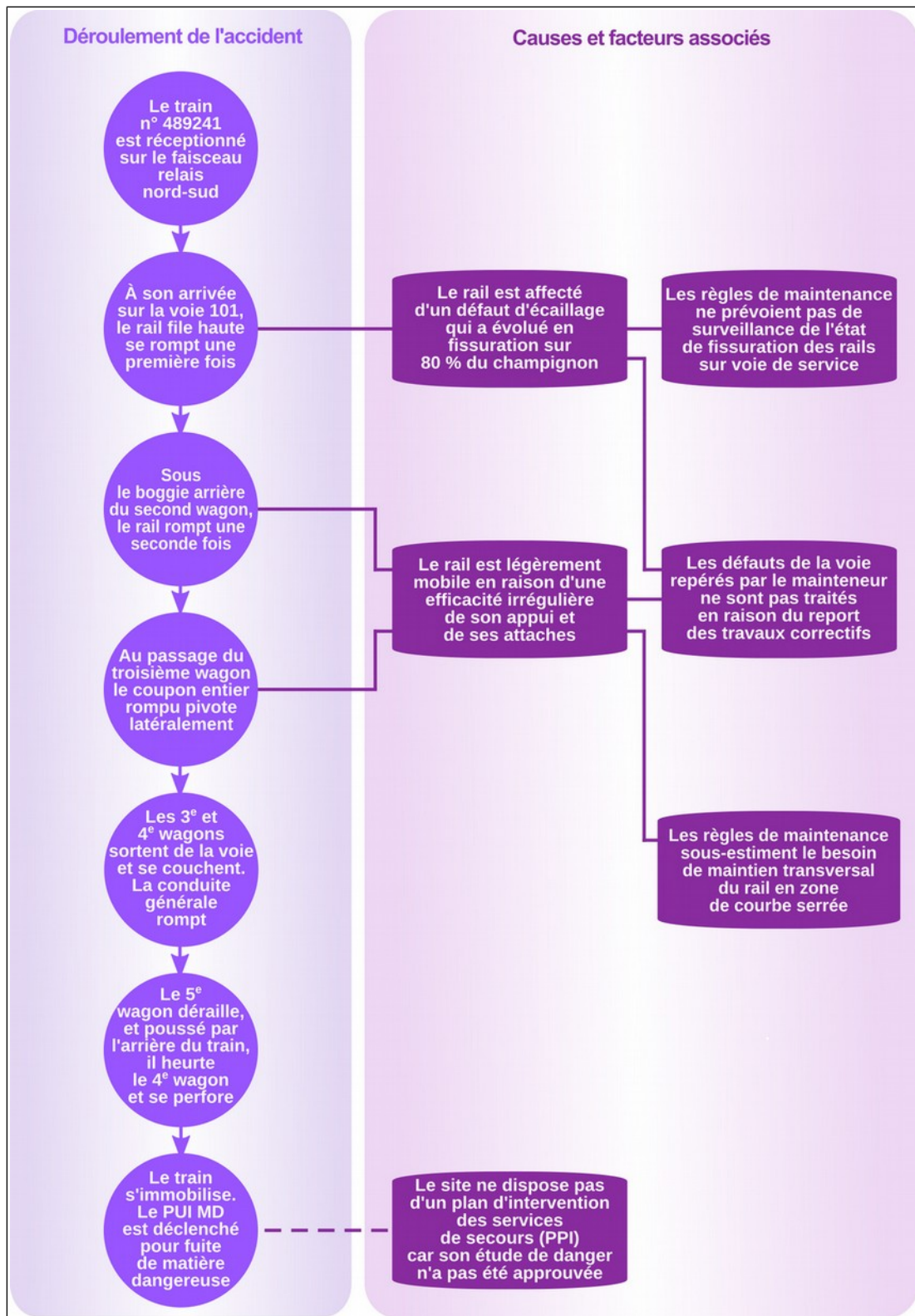


Figure 33 : arbre des causes

6.2 - Les causes de l'accident

La cause immédiate du déraillement est la double rupture d'un tronçon de rail sous le passage du train lourd de marchandises dangereuses.

La première rupture est une rupture en fatigue du rail dont la fissuration était très avancée. La fissuration occupait jusqu'à 80 % de la section du champignon et s'était développée à partir d'un défaut d'écaillage bien visible en surface et connu pour potentiellement conduire à la rupture du rail.

La seconde rupture s'est produite sous l'effet des efforts de guidage des wagons dans la courbe de faible rayon, qui se sont exercés sur un rail affaibli par la première rupture, par une fissuration en développement, et par un maintien amoindri par des attaches et traverses en mauvais état dans cette zone. Le coupon de rail isolé par les deux ruptures a pivoté latéralement sous le chargement, entraînant la sortie de voie des essieux qui sont alors passés dessus.

Plusieurs facteurs, liés à l'infrastructure, ont contribué à la double rupture :

- l'état de fissuration avancé du rail, et l'absence d'opération de recherche des fissures lors des opérations de maintenance ;
- l'insuffisance de maintien du rail ;
- le mauvais état général de la voie qui n'avait pas été corrigé en raison du report de travaux de maintenance.

Les secours se sont déroulés dans un contexte de non-respect de deux obligations réglementaires, concernant la réalisation d'une étude de dangers et d'un plan particulier d'intervention des services de secours sur le site, qui aurait pu perturber les conditions d'intervention des secours, mais qui n'a pas porté à conséquence.

Les orientations préventives sont à rechercher dans les domaines suivants :

- le contrôle de la fissuration des rails sur voie de service ;
- l'efficacité des attaches de rail dans les zones de courbe de faible rayon ;
- l'état général des voies de service où circulent des marchandises dangereuses ;
- la conformité du site de Sibelin à la réglementation.

6.3 - Le contrôle de la fissuration des rails sur voie de service

L'entretien des voies de service s'effectue selon les prescriptions du référentiel IN 0264 du gestionnaire d'infrastructure portant sur « l'organisation de la maintenance des voies de service (voie courante et appareils de voie) ».

Les exigences pour les voies de service sont allégées par rapport à celles des voies principales. Elles ne prévoient notamment aucune surveillance de l'état de fissuration des rails par ultrasons.

Le défaut de fissuration de rail qui a produit l'accident était interne et non visible aux agents lors de leurs tournées de surveillance. Des bavures d'écoulement plastique en surface masquaient le rail et gênaient également son observation visuelle lors de ces tournées. Seule l'organisation d'une auscultation par ultrasons aurait permis de détecter le défaut.

Un écaillage en surface était bien visible et avait été repéré par l'équipe d'entretien. Cet écaillage est décrit dans le référentiel du gestionnaire de l'infrastructure comme évoluant en fissuration transversale du rail jusqu'à la rupture complète. Toutefois pour évaluer la fissuration, il est nécessaire d'organiser une auscultation ultrasonique, qui est difficile à organiser en raison de son caractère non prioritaire, celle-ci n'entrant pas dans le cadre prévu par le référentiel.

L'équipe d'entretien, enfermée dans la nécessité de composer en permanence entre l'état de dégradation important et la faiblesse des moyens pour y faire face, n'a pas été en mesure d'évaluer correctement le niveau de risque.

Un audit a été effectué par le CGEDD en 2014 sur l'état des lieux des infrastructures et des modes d'exploitation ferroviaire dans les triages par lesquels transitent des matières dangereuses. Il avait alors posé une alerte sur ce risque. L'audit avait émis une recommandation visant à « *prévoir un contrôle des rails par ultrasons, au moins par sondage dans un premier temps, et en donnant priorité au voisinage de la bosse sans pour autant s'y limiter* ». Cette recommandation n'a été que partiellement suivie par le gestionnaire d'infrastructure qui a limité sa mise en œuvre au seul voisinage de la bosse contrairement à l'esprit de la recommandation.

Postérieurement à l'accident du 13 mars 2017, le site de Sibelin et les autres principaux sites de triages en France ont fait l'objet d'une campagne de contrôle de l'ensemble des voies de service par ultrasons. Sur le site de Sibelin, 34 défauts de rail préoccupants ont été repérés. Ils ont fait l'objet de travaux de remplacement de rails en urgence.

SNCF Réseau a alors décidé de faire évoluer les règles de maintenance appliquées sur les voies de service circulées par les trains de marchandises dangereuses. Le contrôle à réaliser serait systématique sur les grands triages et à la demande sur les autres sites. Les référentiels intégrant ces dispositions sont en cours de révision. Cette initiative reste à être menée à son terme.

En conséquence, le BEA-TT émet la recommandation ci-après.

Recommandation R1 adressée à SNCF Réseau :

Réviser les règles de surveillance des voies de service accueillant des trains de marchandises dangereuses pour y intégrer un contrôle des rails par ultrasons.

6.4 - L'efficacité d'attache du rail dans les courbes de faible rayon

Les efforts latéraux de guidage des trains lourds dans les courbes de faible rayon sont significatifs.

Les constats sur l'état du rail de la voie 101 de Sibelin ont montré que le rail file haute était affecté de bavures d'écoulement de métal à sa surface et d'une déformation en bascule latérale. Ces défauts témoignent de l'effet des efforts de guidage.

La simulation numérique réalisée dans le cadre de l'expertise de l'accident a évalué les poussées latérales des essieux à une valeur de cinq tonnes.

Une première rupture a affaibli le rail et augmenté les contraintes d'appui ; sous l'effet de la charge et de ces poussées, il a rompu une seconde fois. Deux autres facteurs ont contribué à la rupture : l'existence d'une fissure en cours de développement mais encore limitée, et le maintien amoindri du rail par des attaches et traverses en mauvais état dans cette zone.

Les règles de maintenance sur l'efficacité des attaches spécifient que « *les traverses qui ne permettent pas la tenue d'un tirefond de chaque côté du rail peuvent être maintenues en voie lorsque certaines conditions sont simultanément remplies, comme d'avoir deux traverses les encadrant qui présentent une attache solide, et d'être suffisamment réparties, notamment dans les courbes, pour tenir compte de la nature du trafic.* »

Cette règle de maintenance semble insuffisante pour garantir la résistance du rail dans une courbe très serrée, notamment en cas d'apparition d'une première rupture de rail.

Il n'est pas objectivement établi que la particularité des efforts dans les courbes de faible rayon des voies soit prise en compte dans les règles de dimensionnement. Les règles sont définies avec une relative méconnaissance des efforts réels s'appliquant au rail dans de telles courbes, ainsi que des conséquences sur la résistance du système d'attache.

Il nous semble que ces règles sur l'efficacité des attaches doivent être réévaluées et renforcées pour les zones de courbe de faible rayon.

En conséquence, le BEA-TT émet la recommandation ci-après.

Recommandation R2 adressée à SNCF Réseau :

Réexaminer, et renforcer s'il y a lieu, les règles de maintenance sur l'efficacité des attaches de rail pour tenir compte des sollicitations particulières de guidage des circulations dans les zones de courbe de faible rayon.

6.5 - L'état général de l'infrastructure

L'état général des voies sur le faisceau nord-sud est dégradé.

Les rails sont atteints de « shelling » en file haute des courbes et des fissurations s'y développent. La file basse est écrasée.

Les traverses anciennes sont fendues et dégradées. Les attaches de rails sur ces traverses sont irrégulières et souvent inefficaces. Les traverses neuves injectées en 2006 sont peu nombreuses. Le maintien du rail est insuffisant.

Le mauvais état de surface du rail cumulé à de mauvaises conditions d'appui a contribué au développement d'un endommagement en fatigue du rail qui a évolué jusqu'à la rupture.

Lors de l'accident, le mauvais état du rail et les mauvaises conditions d'appui ont engendré des surefforts dans le rail qui ont provoqué une nouvelle rupture après la première rupture, puis le pivotement du coupon de rail, et qui ont finalement conduit à la sortie de voie des wagons. Les conséquences de la rupture initiale en fatigue du rail ont ainsi été considérablement amplifiées par le mauvais état général de la voie.

Il n'y aurait pas eu de conséquence à une simple rupture si la voie n'avait pas été en aussi mauvais état.

Le vieillissement et la dégradation de l'état général des voies est un facteur de baisse du niveau général de sécurité.

L'équipe d'entretien avait initié plusieurs actions pour améliorer l'état de la voie. Il s'agit des travaux de remplacement du rail file haute dans la courbe d'entrée de la voie 101, commencés 7 mois plus tôt sans être achevés. Il s'agit également de la régénération complète des têtes du faisceau relais nord-sud, demandée depuis début 2014 sans être financée. La réalisation de ces travaux aurait permis d'éviter l'accident.

Le caractère d'urgence des travaux n'avait, nous le savons, pas été détecté, faute d'un contrôle par ultrasons du rail. L'équipe d'entretien n'ayant pas été en mesure d'estimer la gravité du risque, elle a subi passivement les reports de travaux.

L'audit effectué par le CGEDD sur l'état des lieux des infrastructures des triages avait pointé le besoin en renouvellement des infrastructures des triages. Il recommandait de « *Poursuivre et amplifier l'effort de renouvellement de l'infrastructure, notamment par l'amélioration des voies [...]* ». Un programme de renouvellement avait été mis en avant par SNCF Réseau pour y répondre mais à la date de l'accident, le mode de financement restait à définir.

Nous constatons que le report des financements et des travaux conduit au maintien d'un état général insatisfaisant de voies, qui est préoccupant pour la sécurité.

La question du financement du renouvellement de l'infrastructure est toutefois posée de façon globale sur l'ensemble du RFN, dans toutes ses composantes. Cette problématique a été évoquée notamment dans le rapport sur le déraillement d'un train à Brétigny-sur-Orge en 2013. Elle s'est posée à nouveau dans le rapport sur les multiples ruptures de rails au passage d'un train entre Pons et Jonzac en 2016. Elle a fait l'objet

d'une recommandation du rapport sur le déraillement de Brétigny-sur-Orge, adressée à SNCF Réseau, qui a été acceptée, et que nous rappelons ici : « *Faire vérifier régulièrement, par des audits externes et sur la base d'objectifs explicites, que l'évolution de l'âge moyen des différentes composantes du réseau ferré national est conforme aux orientations prises et que les moyens alloués à l'entretien sont cohérents avec les besoins liés à l'état des installations et aux performances attendues.* »

Le BEA-TT ne formule donc pas de nouvelle recommandation.

6.6 - La conformité de l'installation à la réglementation

Comme nous l'avons vu au paragraphe 2.4.3, le gestionnaire de l'infrastructure n'était pas, sur le site de Sibelin, en conformité avec les articles L551-1 et R551-8 du Code de l'environnement. L'étude de dangers du site n'était pas approuvée à la date de l'accident. Des projets avaient bien été élaborés depuis 2008, mais, en raison de plusieurs réserves, ils avaient été jugés non recevables par le service instructeur de la préfecture (DREAL Auvergne-Rhône-Alpes).

En l'absence d'étude de dangers, il n'existait pas non plus de plan particulier d'intervention (PPI), conformément au décret n° 2005-1158 du 13 septembre 2005, qui définit les moyens de secours à mettre en œuvre et les modalités de gestion en cas d'accident.

Ces manquements n'ont pas eu de conséquence aggravante sur l'accident. Nous ne les avons pas examinés plus avant.

Toutefois, de l'avis unanime des collectivités et des services publics consultés dans le cadre de cette enquête, ces manquements ne permettent pas de garantir le traitement exhaustif des risques sur le site, et ils ne sont pas de nature à développer une bonne confiance des parties prenantes sur la circulation en toute sécurité de matières dangereuses.

Le BEA-TT invite SNCF Réseau et les services de la préfecture de région Auvergne-Rhône-Alpes, à finaliser rapidement une étude de dangers du site de Sibelin qui soit recevable, en application des articles L551-1 et R551-8 du Code de l'environnement.

7 - Conclusions et recommandations

7.1 - Conclusions

La cause immédiate du déraillement est la double rupture d'un tronçon de rail sous le passage du train lourd de marchandises dangereuses.

La première rupture est une rupture en fatigue du rail dont la fissuration était très avancée.

La seconde rupture s'est produite sous l'effet des efforts de guidage des wagons dans la courbe serrée, qui se sont exercés sur un rail affaibli par la première rupture, par une fissuration en développement, et par un maintien amoindri par des attaches et traverses en mauvais état dans cette zone. Le coupon de rail isolé par les deux ruptures a pivoté latéralement sous le chargement, entraînant la sortie de voie des essieux qui sont alors passés dessus.

Plusieurs facteurs, liés à l'infrastructure, ont contribué à la double rupture :

- l'état de fissuration avancé du rail, et l'absence d'opération de recherche des fissures lors des opérations de maintenance ;
- l'insuffisance de maintien du rail ;
- le mauvais état général de la voie qui n'avait pas été corrigé en raison du report de travaux de maintenance.

Les secours se sont déroulés dans un contexte de non-respect de deux obligations réglementaires, concernant la réalisation d'une étude de dangers et d'un plan particulier d'intervention des services de secours sur le site, qui aurait pu perturber les conditions d'intervention des secours, mais qui n'a pas porté à conséquence.

7.2 - Recommandations et invitation

Recommandation R1 adressée à SNCF Réseau

Réviser les règles de surveillance des voies de service accueillant des trains de marchandises dangereuses pour y intégrer un contrôle des rails par ultrasons.

Recommandation R2 adressée à SNCF Réseau

Réexaminer, et renforcer s'il y a lieu, les règles de maintenance sur l'efficacité des attaches de rail pour tenir compte des sollicitations particulières de guidage des circulations dans les zones de courbe de faible rayon.

Invitation

Le BEA-TT invite SNCF Réseau et les services de la préfecture de région Auvergne-Rhône-Alpes, à finaliser rapidement une étude de dangers du site de Sibelin qui soit recevable, en application des articles L551-1 et R551-8 du Code de l'environnement.

ANNEXES

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête

Annexe 2 : Échelle européenne de gravité des accidents industriels

Annexe 3 : Les accidents notables de transport de marchandises dangereuses

Annexe 4 : Relevé des dégâts occasionnés aux wagons-citernes

Annexe 5 : Principes de surveillance des voies de service

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête



MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER



Le Directeur

La Défense, le 15 mars 2017

DECISION

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

Vu le code des transports et notamment les articles L. 1621-1 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 du déraillement d'un train de fret survenu le 13 mars 2017 en gare de triage de Sibelin ;





décide

Article 1 : Une enquête technique est ouverte en application des articles L. 1621-1 et R. 1621-22 du code des transports concernant le déraillement de trois wagons d'un train de fret transportant de l'éthanol à l'entrée de la gare de triage de Sibelin, sur la commune de Solaize (69), sur la ligne ferroviaire Lyon-Perrache-Voyageur/Chasse-sur-Rhône, le 13 mars 2017.

Jean PANHALEUX

Annexe 2 : Échelle européenne de gravité des accidents industriels

Les 18 paramètres de l'échelle européenne

 Matières dangereuses relâchées		1	2	3	4	5	6
Q1	Quantité Q de substance effectivement perdue ou rejetée rapportée au seuil haut « Seveso »*	Q < 0,1 %	0,1 % ≤ Q < 1 %	1 % ≤ Q < 10 %	10 % ≤ Q < 100 %	De 1 à 10 fois le seuil	≥ 10 fois le seuil
Q2	Quantité Q de substance explosive ayant effectivement participé à l'explosion (équivalent TNT)	Q < 0,1 t	0,1 t ≤ Q < 1 t	1 t ≤ Q < 5 t	5 t ≤ Q < 50 t	50 t ≤ Q < 500 t	Q ≥ 500 t
* Utiliser les seuils hauts de la directive Seveso en vigueur. En cas d'accident impliquant plusieurs substances visées, le plus haut niveau atteint doit être retenu.							
 Conséquences humaines et sociales		1	2	3	4	5	6
H3	Nombre total de morts :	-	1	2 – 5	6 – 19	20 – 49	≥ 50
	dont : employés	-	1	2 – 5	6 – 19	20 – 49	≥ 50
	sauveteurs extérieurs	-	-	1	2 – 5	6 – 19	≥ 20
	personnes du public	-	-	-	1	2 – 5	≥ 6
H4	Nombre total de blessés avec hospitalisation de durée ≥ 24 h :	1	2 – 5	6 – 19	20 – 49	50 – 199	≥ 200
	dont : employés	1	2 – 5	6 – 19	20 – 49	50 – 199	≥ 200
	sauveteurs extérieurs	1	2 – 5	6 – 19	20 – 49	50 – 199	≥ 200
	personnes du public	-	-	1 – 5	6 – 19	20 – 49	≥ 50
H5	Nombre total de blessés légers soignés sur place ou avec hospitalisation < 24 h :	1 – 5	6 – 19	20 – 49	50 – 199	200 – 999	≥ 1 000
	dont : employés	1 – 5	6 – 19	20 – 49	50 – 199	200 – 999	≥ 1 000
	sauveteurs extérieurs	1 – 5	6 – 19	20 – 49	50 – 199	200 – 999	≥ 1 000
	personnes du public	-	1 – 5	6 – 19	20 – 49	50 – 199	≥ 200
H6	Nombre de tiers sans abris ou dans l'incapacité de travailler (bâtiments extérieurs et outil de travail endommagés...)	-	1 – 5	6 – 19	20 – 99	100 – 499	≥ 500
H7	Nombre N de riverains évacués ou confinés chez eux > 2 heures x nb. d'heures (personnes x nb. d'heures)	-	N < 500	500 ≤ N < 5 000	5 000 ≤ N < 50 000	50 000 ≤ N < 500 000	N ≥ 500 000
H8	Nombre N de personnes privées d'eau potable, électricité, gaz, téléphone, transports publics plus de 2 heures x nb. d'heures (personne x heure)	-	N < 1 000	1 000 ≤ N < 10 000	10 000 ≤ N < 100 000	100 000 ≤ N < 1 million	N ≥ 1 million
H9	Nombre N de personnes devant faire l'objet d'une surveillance médicale prolongée (≥ 3 mois après l'accident).	-	N < 10	10 ≤ N < 50	50 ≤ N < 200	200 ≤ N < 1 000	N ≥ 1 000
 Conséquences environnementales		1	2	3	4	5	6
Env 10	Quantité d'animaux sauvages tués, blessés ou rendus impropres à la consommation humaine (t)	Q < 0,1	0,1 ≤ Q < 1	1 ≤ Q < 10	10 ≤ Q < 50	50 ≤ Q < 200	Q ≥ 200
Env 11	Proportion P d'espèces animales ou végétales rares ou protégées détruites (ou éliminées par dommage au biotope) dans la zone accidentée	P < 0,1 %	0,1 % ≤ P < 0,5 %	0,5 % ≤ P < 2 %	2 % ≤ P < 10 %	10 % ≤ P < 50 %	P ≥ 50 %
Env 12	Volume V d'eau polluée (en m ³)*	V < 1 000	1 000 ≤ V < 10 000	10 000 ≤ V < 0,1 million	0,1 million ≤ V < 1 million	1 million ≤ V < 10 millions	V ≥ 10 millions
Env 13	Surface S de sol ou de nappe d'eau souterraine nécessitant un nettoyage ou une décontamination spécifique (en ha)	0,1 ≤ S < 0,5	0,5 ≤ S < 2	2 ≤ S < 10	10 ≤ S < 50	50 ≤ S < 200	S ≥ 200
Env 14	Longueur L de berge ou de voie d'eau nécessitant un nettoyage ou une décontamination spécifique (en km)	0,1 ≤ L < 0,5	0,5 ≤ L < 2	2 ≤ L < 10	10 ≤ L < 50	50 ≤ L < 200	L ≥ 200
* Le volume est donné par l'expression Q/C _{lim} . Q est la quantité de substance rejetée, C _{lim} est la concentration maximale admissible de la substance dans le milieu concerné fixée par les directives européennes en vigueur.							
 Conséquences économiques		1	2	3	4	5	6
€15	Dommages matériels dans l'établissement (C exprimé en millions d'€ - Réf. 1993)	0,1 ≤ C < 0,5	0,5 ≤ C < 2	2 ≤ C < 10	10 ≤ C < 50	50 ≤ C < 200	C ≥ 200
€16	Pertes de production de l'établissement (C exprimé en millions d'€ - Réf. 1993)	0,1 ≤ C < 0,5	0,5 ≤ C < 2	2 ≤ C < 10	10 ≤ C < 50	50 ≤ C < 200	C ≥ 200
€17	Dommages aux propriétés ou pertes de production hors de l'établissement (C exprimé en millions d'€ - Réf. 1993)	-	0,05 < C < 0,1	0,1 ≤ C < 0,5	0,5 ≤ C < 2	2 ≤ C < 10	C ≥ 10
€18	Coût des mesures de nettoyage, décontamination ou réhabilitation de l'environnement (C exprimé en millions d'€ - Réf. 1993)	0,01 ≤ C < 0,05	0,05 ≤ C < 0,2	0,2 ≤ C < 1	1 ≤ C < 5	5 ≤ C < 20	C ≥ 20

Chaque paramètre est échelonné de 1 à 6, le niveau 6 correspondant aux effets ou conséquences les plus importants. Pour un accident donné, l'indice de gravité correspond au niveau le plus élevé atteint par tous les paramètres.

Annexe 3 : Les accidents notables de transport de marchandises dangereuses

Depuis 1992, le **Bureau d'Analyse des Risques et Pollutions Industriels (BARPI)**, implanté à Lyon, est le service de l'État chargé de rassembler et de diffuser des données sur le retour d'expérience en matière d'accidents technologiques. Il met en forme ces données dans une base de données nommée ARIA (Analyse, Recherche et Information sur les Accidents) accessible sur internet (www.aria.developpement-durable.gouv.fr/le-barpi/la-base-de-donnees-aria).

La base ARIA recense plus de 46 000 accidents ou incidents survenus en France ou à l'étranger, soit environ 1 200 évènements par an.

Les évènements sont classés selon l'*échelle européenne des accidents industriels* qui a été officialisée en 1994 par le Comité des autorités compétentes des États membres pour l'application de la directive SEVESO. L'échelle repose sur 18 critères techniques destinés à caractériser objectivement les effets ou les conséquences des accidents. On trouve parmi ces critères la quantité de substance rejetée, le nombre de morts ou de blessés, le niveau de pollution, le coût des dommages... L'échelle comporte 6 niveaux qui détermine l'indice de gravité de l'accident.

L'accident de déraillement de Sibelin du 13 mars 2017 a un indice de gravité de niveau **3**, déterminé par le montant des dommages matériels de l'accident.

Le tableau ci-après récapitule les accidents de transport ferroviaire recensés dans la base qui ont un indice de gravité supérieur ou égal à **5**, depuis l'année 1987 (30 dernières années). Ils correspondent donc à des accidents d'un niveau de gravité 100 à 1000 fois supérieurs à celui du 13 mars 2017 (l'échelle est logarithmique). Ces accidents lorsqu'ils mettent en jeu un carburant sont comparables à l'accident de Sibelin dans leur scénario initial. Ils diffèrent dans le fait que l'inflammation des substances rejetées a conduit à l'aggravation de l'indice d'accident. Ces accidents donnent une idée précise des conséquences potentielles de la situation du 13 mars 2017. L'efficacité des services de secours et les circonstances favorables ont permis de les éviter.

Accidents ferroviaires de transport de marchandises dangereuses d'indice supérieur ou égale à 5

Date	Pays / Commune	N° en base ARIA	Indice	Description
10/03/17	ETATS-UNIS Graettinger	49364	6	Vers 1 h, 27 des 101 wagons d'un convoi ferroviaire d'éthanol dérailent, provoquant une explosion et un incendie. Les wagons brûlent pendant plusieurs heures.
10/12/16	BULGARIE Hitrino	Hors base	6	À 5 h 37, un train de marchandises dangereuses déraille. Deux wagons de propane-butane et propylène prennent feu et explosent. 50 bâtiments sont touchés. La zone est évacuée. 7 personnes sont tuées et 29 autres blessées.
30/12/13	ETATS-UNIS Casselton	44737	5	Le dernier wagon d'un train de céréales déraille à 14 h 30. Un convoi de 100 wagons de pétrole brut roulant en sens inverse le percute. 20 wagons-citernes se couchent et 1 500 m ³ de pétrole brut se déversent. Des explosions se produisent et un important panache de fumée noire se dégage. Les secours évacuent les 2 400 habitants. Ils laissent brûler les wagons.
06/07/13	CANADA Lac-Mégantic	44026	6	Un train de 72 wagons-citernes de pétrole brut dévale une colline et traverse une agglomération à 100 km/h. 63 wagons dérailent en centre-ville à 1 h 15. 4 explosions se produisent. 5 700 m ³ de pétrole en feu propagent l'incendie en surface et via les égouts. Les secours évacuent 2 000 personnes. La lutte contre l'incendie dure 2 jours. L'accident a causé 47 décès, détruit 30 bâtiments.

Date	Pays / Commune	N° en base ARIA	Indice	Description
04/05/13	BELGIQUE Wetteren	43772	5	Cinq wagons-citernes d'acrylonitrile et un de butadiène appartenant à un convoi de 13 wagons dérailent à 2 h. De l'acrylonitrile s'enflamme et dégage une épaisse fumée. Un riverain meurt intoxiqué, une maison est détruite, 391 riverains et 6 pompiers sont hospitalisés. 2 000 personnes sont évacuées dans un rayon de 500 m.
30/11/12	ETATS-UNIS Paulsboro	43128	6	Un train de matières dangereuses déraile à 7 h au franchissement d'un pont tournant sur MANTUA CREEK. Sur les 7 wagons sortis des rails, 3 sont tombés dans l'eau. Un d'entre eux, contenant 81,5 t de chlorure de vinyle, fuit. Les secours évacuent 500 riverains.
01/09/11	RUSSIE Tcheliabinsk	40876	5	Un choc se produit à 7h35 entre 2 wagons de marchandises dans une gare de triage lors d'une manœuvre d'accrochage. Dans un de ces wagons, des flacons en verre de brome (Br2) se brisent. Les 50 l de produit libérés forment un nuage qui dérive dans la ville. 250 personnes sont intoxiquées ou brûlées chimiquement.
29/06/09	ITALIE Viareggio	36464	6	Vers 23 h 45, à 90 km/h, un convoi de 14 wagons de gaz de pétrole liquéfié (GPL) déraile de 5 citernes qui se couchent sur le côté. Le 1 ^{er} wagon se déchire, entraînant une fuite de GPL et la formation d'un nuage dense qui explose. Un violent incendie embrase les lieux. 2 autres explosions sont entendues un peu plus tard. 32 victimes sont à déplorer, ainsi que 50 blessés. Une villa et 2 immeubles sont détruits.
31/10/07	AUTRICHE Sankt Veit an der Glan	42529	5	Un train de marchandise de 32 wagons déraile vers 2 h 55 peu après son entrée dans le tunnel du Tauern. Les 6 ^e et 7 ^e wagons-citernes transportaient respectivement 62 et 63 t de soude en solution (code ONU 1824). Le déraillement du wagon 7 provoque une fuite sur la citerne n° 6. Aucun blessé n'est à déplorer. Les dommages aux infrastructures sont importants
16/07/07	UKRAINE NC	33274	6	Un train de marchandises circulant entre le Kazakhstan et la Pologne transportant 700 t de phosphore jaune déraile dans l'Ouest de l'Ukraine : 15 citernes se renversent et 6 d'entre elles prennent feu créant un nuage toxique blanc qui couvre un territoire de 86 km ² . 900 personnes sont évacuées. 174 personnes dont 46 enfants et 14 secouristes sont intoxiqués et hospitalisés.
06/01/05	ETATS-UNIS Graniteville	28876	6	À la suite d'une collision entre un train transportant du chlore (Cl2) et un train à l'arrêt dans une usine textile, 8 personnes décèdent, 200 sont blessées et 5 400 sont évacuées dans un rayon de plus de 1,5 km. Excepté le conducteur du train, toutes les personnes sont décédées en inhalant du Cl2.
22/04/04	COREE DU NORD Ryongchon	26980	6	L'explosion de deux trains de marchandise dans une gare aurait entraîné la mort de plus de 161 personnes dont 76 enfants et au moins 1 300 blessés. L'explosion serait due à la collision, durant une manœuvre en gare (changement de voie) vers 13 h, entre 1 wagon d'une rame transportant de l'essence et 2 wagons d'une autre rame transportant chacun 44 t de nitrate d'ammonium. 40 % des bâtiments de la ville seraient détruits.
09/09/02	ALLEMAGNE Bad Münden am Deister	23059	6	Quelque 250 personnes sont évacuées temporairement après une collision entre 2 trains de marchandises dont l'un transportait un wagon-citerne d'épichlorhydrine. Celui-ci explose et provoque une émission de gaz toxique.
07/09/02	ETATS-UNIS Jacksonville	23577	5	Lors du déraillement d'un train de 100 wagons, un réservoir de 40 000 l d'acide sulfurique est perforé ce qui entraîne la formation d'un nuage de fumées visible à plusieurs kilomètres. 24 wagons sont sortis des rails. Plus de 3 000 personnes sont évacuées sur 1,7 km. 20 personnes sont hospitalisées.
02/02/01	CANADA Red Deer	20108	5	À la suite du déraillement de 2 wagons-citernes d'un convoi ferroviaire, une fuite de 75 t ammoniac anhydre se produit. 5 000 personnes sont évacuées et réintègrent pour la plupart leur domicile 24 h plus tard. 6 personnes sont intoxiquées à suite de l'inhalation de cette substance irritante.

Date	Pays / Commune	N° en base ARIA	Indice	Description
05/11/00	ETATS-UNIS Scottsbluff	19780	5	Le déraillement de 18 wagons d'un train en comptant 79 se produit tôt dans la matinée : 3 d'entre eux se déchirent et 300 m ³ de benzène s'écoulent au sol. Les secours évacuent 5 000 personnes. Il n'y a pas de blessé recensé.
28/05/00	ETATS-UNIS Eunice	17848	5	Un train de 113 wagons transportant tous des produits chimiques déraile. Sur les 34 wagons qui ont déraillé, 10 prennent feu. 3 000 personnes sont évacuées pendant plusieurs jours. Cependant aucune victime n'est à signaler. Des wagons explosent 4 jours après. Les secours procèdent à l'inflammation de wagons de manière contrôlée, par explosion de petites charges.
25/04/00	ETATS-UNIS Danville	17648	5	Un feu se produit dans un des wagons contenant des produits chimiques d'un train de marchandises. Le produit impliqué est du dithionite de sodium (hydrosulfide de sodium). Des évacuations massives sont alors engagées (1,5 km ² couvrant des collèges, des écoles et diverses habitations soit 16 000 personnes).
21/03/00	FRANCE Saint-Galmier	17428	5	En zone rurale, 18 des 35 wagons d'un convoi déraillent. Plusieurs wagons se couchent : 4 wagons contenant chacun 54 t d'acide nitrique sont éventrés, libérant le produit. Un épais nuage toxique orangé dérive par vent faible et atmosphère stable, et s'étale sur 2 à 3 km. 1 200 personnes sont évacuées.
14/02/98	CAMEROUN Yaoundé	12470	6	Deux convois de wagons-citernes se heurtent sur une voie ferrée en zone urbaine ; 2 wagons-citernes déraillent et de l'essence s'écoule. Les riverains arrivent en foule pour récupérer le carburant. Les vapeurs d'essence explosent quelques heures plus tard et tout le site de l'accident s'enflamme. On dénombre 220 morts et 130 blessés généralement très gravement brûlés.
01/06/96	ALLEMAGNE Schönebeck	19200	5	Vers 17 h 30, un train comprenant 18 wagons-citernes contenant chacun 58 t de monomère de chlorure de vinyle (CVM) déraile peu après un changement de voie en gare de Schönebeck. Le convoi se sépare en deux après le 6 ^e wagon. Les 12 wagons composant l'arrière du train déraillent sur 300 m, provoquant l'explosion du wagon n° 16. La boule de feu formée entraîne à son tour l'incendie de 5 autres wagons avec émission d'une abondante fumée noire. 65 personnes sont blessées. Un suivi sanitaire de la population exposée durera près de 10 ans.
04/03/96	ETATS-UNIS Weyauwega	8262	6	Au petit matin alors que 16 des 81 wagons d'un convoi ont franchi un aiguillage, 34 wagons dont 7 de GPL, 7 de propane et 2 de soude déraillent. Une explosion d'un des wagons de propane se produit. Trois autres wagons endommagés libèrent peu à peu leur contenu qui alimente les flammes. Les pompiers évacuent 3 200 habitants. Une défaillance de la voie est à l'origine de l'accident.
02/12/94	FRANCE Avignon	6068	5	Une surchauffe est détectée sur un bogie d'un wagon de mono chlorure de vinyle CVM. Le wagon de 70 t (59 t de CVM) est dirigé sur une voie de garage pour transvasement. 4 000 personnes sont évacuées durant l'opération. Il n'y aura pas de fuite de CVM.
08/03/94	SUISSE Zurich	5073	5	Après rupture d'un essieu, l'un des 20 wagons d'un train, contenant chacun 75 m ³ d'essence, déraile, prend feu et explose dans une gare. L'incendie atteint 4 autres wagons, détruit 3 bâtiments bordant les voies. L'essence rejoint les égouts et provoque des explosions. Le quartier est évacué (120 personnes). 1 blessé grave et 2 légers sont à déplorer.
13/01/93	FRANCE La Voulte-sur-Rhône	4225	6	7 citernes de 80 m ³ d'essence d'un convoi de 20 wagons déraillent. Un essieu dont l'une des boîtes de roulement s'est trop échauffée s'est rompu. 4 citernes se vident, un violent incendie se déclare. Une explosion et une boule de feu se produisent. Des ruisseaux d'hydrocarbures en flamme se déversent en contrebas dans une rue. 15 habitations et 15 véhicules sont détruits. 1 000 personnes sont évacuées. 6 sont blessées.
18/12/92	CANADA Oakville	12037	5	À la suite d'une rupture brutale de l'essieu d'une locomotive, 29 wagons-citernes contenant divers produits chimiques déraillent près d'un village. Cinq cents personnes sont évacuées.

Date	Pays / Commune	N° en base ARIA	Indice	Description
30/06/92	ETATS-UNIS Duluth	3671	6	À la suite d'un déraillement, 13 des 57 wagons d'un train de marchandises, dont un wagon-citerne transportant du benzène chutent dans une rivière. Le produit s'écoule et un nuage toxique se forme. La police donne des consignes d'évacuation à 80 000 riverains. Une vingtaine de personnes est hospitalisée.
25/05/92	CANADA Longlac	12036	5	Dix-neuf wagons-citernes dérailent, dont 4 contenant de l'ammoniac. Une fuite d'ammoniac se produit sur 2 wagons-citernes. Huit cents personnes sont évacuées.
27/07/91	ALLEMAGNE Oebisfelde	2724	5	Un télescopage se produit entre un train express de voyageurs et un train de marchandises composé de wagons-citernes d'essence. Les 5 premiers wagons-citernes explosent et provoquent un gigantesque incendie ; 3 personnes sont tuées et 21 autres blessées.
09/07/91	CANADA Saint-Lazare	81	5	Un train de marchandises déraile, 23 wagons sont impliqués dont 2 de chlore, 2 de soude, 2 de glycol, 3 de méthanol et 2 d'anhydride acétique. Un périmètre de protection de 5 km de rayon est établi. 500 personnes sont évacuées.
03/12/90	FRANCE Chavanay	2438	5	Un convoi de 22 wagons déraile à 23 h 50 dans un village de 2 000 habitants ; 9 citernes de 80 m ³ de carburant sans plomb se renversent, s'enflamment et explosent. L'essence en feu incendie des habitations et rejoint les égouts. Un villageois a été blessé.
04/05/90	CUBA Matanzas	5453	5	À la suite du déraillement d'un train, une fuite d'ammoniac se produit sur des wagons endommagés ; 3 personnes sont tuées et 374 autres sont plus ou moins gravement intoxiquées.
03/10/88	RUSSIE Sverdlovsk	434	5	Deux wagons chargés d'explosifs explosent et provoquent l'incendie d'une citerne de fioul. Le bilan fait état de 5 morts, 838 blessés dont 90 hospitalisés, 12 maisons et 8 immeubles détruits.
04/06/88	RUSSIE Arzamas	349	6	L'explosion de 3 wagons de chemin de fer chargés de 120 t d'explosifs provoque le décès de 93 personnes, 700 blessés étant soignés dans des centres de secours et 230 étant hospitalisés. 150 maisons sont détruites. 90 000 personnes sont évacuées.



Accident d'Hitrino en Bulgarie, le 10 décembre 2016 à 5 h 37 (photo internet)



Accident de Lac-Mégantic au Québec, le 6 juillet 2013 à 1 h 14 (photo internet)


Annexe 4 : Relevé des dégâts occasionnés aux wagons-citernes

Avant
Vue de dessus
Arrière

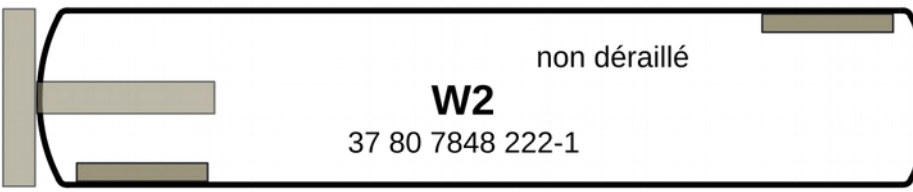
Nota :
certaines prises de vues
sont faites une fois
les wagons relevés

Droite

Gauche




le crochet d'attelage est en butée vers la droite



non déraillé


W2

37 80 7848 222-1



le robinet et le boyau de conduite générale sont arrachés

trace verticale sur le tampon gauche




tampon droit arraché

attelage avarié


châssis de bogie faussé

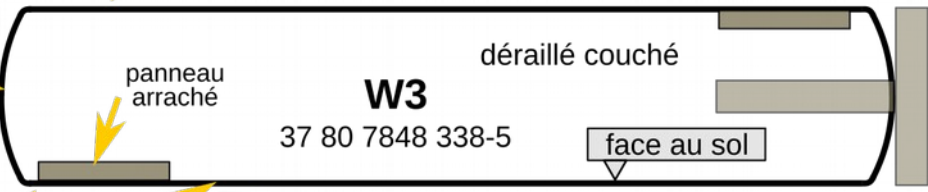
timonerie porte semelle faussée côté gauche



marchepied droit tordu

bogie tourné de 60°






déraillé couché

W3


37 80 7848 338-5

face au sol




panneau arraché

traces sur le bourrelet de la roue (première roue qui déraile)



traces sur le côté gauche suite au renversement



marchepied gauche tordu

Avant

Vue de dessus

Arrière

Droite

Gauche



tampon
heurteur de
la citerne
du W5

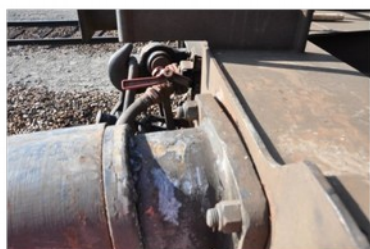
avant
enfoncé
par le
tampon
du W3

Traces sur le
côté suite au
renversement



semelle de frein déformée

marchepied tordu



Nota :
certaines prises de vues
sont faites une fois
les wagons relevés

boggies dérailés

tampon
avant
gauche
forcé

important
enfoncement



choc et
percement
de la citerne



2^{ème} couple
enfoncé et
citerne perforée



Avant

Vue de dessus

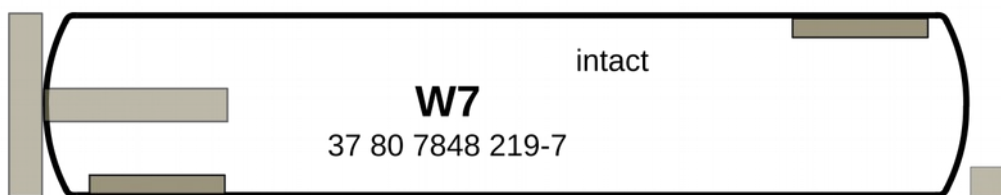
Arrière

Droite

Gauche



boggie déraillé



Annexe 5 : Principes de surveillance des voies de service

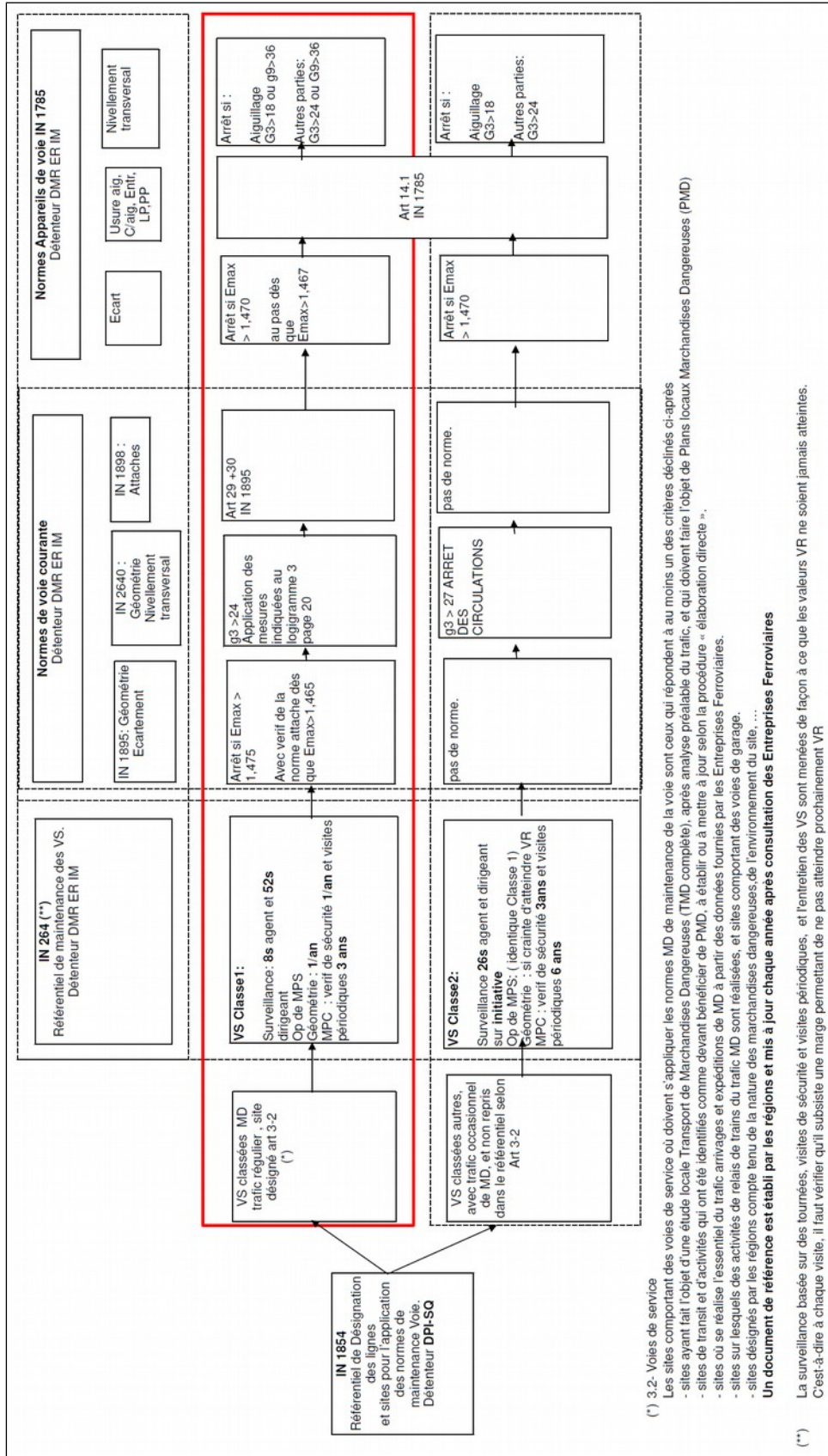


Schéma synoptique des prescriptions des référentiels de SNCF Réseau
(Sur le synoptique, les appellations des entités sont celles à l'écriture des textes.)



Bureau d'Enquêtes sur les Accidents de Transport Terrestre



Grande Arche - Paroi Sud
92055 La Défense cedex

Téléphone : 01 40 81 21 83

Télécopie : 01 40 81 21 50

bea-tt@developpement-durable.gouv.fr

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

