

A large, decorative graphic consisting of several concentric, overlapping circles in shades of light purple and lavender, creating a sense of depth and movement. The circles are centered on the page and extend towards the edges.

**RAPPORT
D'ENQUÊTE TECHNIQUE**
sur le déraillement d'un TGV
le 24 août 2018
en gare de Marseille Saint-Charles

Décembre 2019

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

Affaire n° BEATT-2018-09

**Rapport d'enquête technique
sur le déraillement d'un TGV
survenu le 24 août 2018
en gare de Marseille Saint-Charles (13)**

Bordereau documentaire

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

Titre du document : Rapport d'enquête technique sur le déraillement d'un TGV survenu le 24 août 2018 en gare de Marseille Saint-Charles (13)

N° ISRN : EQ-BEAT--19-12--FR

Proposition de mots-clés : déraillement, appareil de voie, déviation, rupture de rail, surveillance

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 certaines ou probables de l'événement 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 - CONSTATS IMMÉDIATS ET ENGAGEMENT DE L'ENQUÊTE.....	13
1.1 - Les circonstances de l'accident.....	13
1.2 - Le bilan de l'accident.....	13
1.3 - Les mesures prises après l'accident.....	14
1.4 - L'engagement et l'organisation de l'enquête.....	14
2 - LE CONTEXTE DE L'ACCIDENT.....	15
2.1 - La gare de Marseille Saint-Charles.....	15
2.2 - Le poste d'aiguillage de la gare.....	16
2.3 - Le TGV 6145.....	17
2.4 - Généralités sur les aiguillages.....	19
2.5 - Le risque de rupture de rail.....	22
3 - LES INVESTIGATIONS SUR LA CAUSE IMMÉDIATE DE L'ACCIDENT.....	23
3.1 - Les résumés des déclarations.....	23
3.1.1 -Le témoignage du conducteur du train.....	23
3.1.2 -Le témoignage du chef-circulation du poste d'aiguillage.....	24
3.1.3 -Le témoignage du contrôleur présent dans la rame de queue.....	24
3.1.4 -Le témoignage de la contrôleuse titulaire présente dans la rame de tête.....	25
3.2 - Commentaire sur l'évacuation de la rame.....	25
3.3 - Les conditions météorologiques.....	26
3.4 - Les constats sur la rame accidentée.....	27
3.5 - Les constats sur l'infrastructure.....	30
3.6 - L'examen des enregistrements du TGV.....	32
3.7 - Le désarchivage du poste Mistral.....	34
3.8 - L'expertise métallurgique du rail rompu.....	38
3.8.1 -La morphologie de la rupture.....	38
3.8.2 -L'examen de la fissure de fatigue dans l'aile de patin.....	39
3.8.3 -L'examen des marques de choc sur le patin.....	39
3.8.4 -L'examen de la surface de roulement.....	41
3.8.5 -Constat sur la rupture.....	41
3.9 - L'analyse du matériel de voie.....	42
3.9.1 -L'examen des selles d'appui.....	42
3.9.2 -L'examen des traverses.....	42
3.9.3 -L'examen du contre-rail en vis-à-vis.....	43
3.10 - Conclusion sur les causes immédiates du déraillement.....	44

4 - LES INVESTIGATIONS SUR LES CAUSES DE LA RUPTURE DU RAIL.....	47
4.1 - La fréquentation de l'aiguillage 312a.....	47
4.2 - L'évaluation numérique des efforts sur le rail de déviation.....	48
4.3 - Généralités sur la maintenance des appareils de voie.....	50
4.3.1 -La surveillance systématique.....	51
4.3.2 -Les interventions programmées.....	52
4.3.3 -La régénération.....	52
4.4 - La maintenance de l'aiguillage 312a.....	52
4.4.1 -Le schéma de maintenance.....	52
4.4.2 -Les constats sur le rail rompu en zone de voie intermédiaire.....	53
4.4.3 -Les constats sur les selles et le plancher.....	53
4.4.4 -Les constats sur le contre-rail gauche.....	54
4.5 - Le suivi des « évolutions rapides » sur appareil de voie.....	55
4.5.1 -Le retour d'expérience.....	55
4.5.2 -Le classement du branchement 312a.....	56
4.5.3 -Les nouvelles règles de maintenance pour les branchements à faible rayon.....	57
5 - ANALYSE DU DÉROULEMENT DE L'ACCIDENT ET DES SECOURS.....	59
6 - ANALYSE DES CAUSES ET FACTEURS ASSOCIÉS, ORIENTATIONS PRÉVENTIVES..	61
6.1 - L'arbre des causes.....	61
6.2 - Les causes de l'accident.....	62
6.3 - La surveillance et la maintenance des branchements simples de faible rayon.....	62
6.4 - L'attache des rails des branchements simples de faible rayon.....	63
7 - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	65
7.1 - Conclusions.....	65
7.2 - Recommandations.....	65
ANNEXES.....	67
Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête.....	69
Annexe 2 : Fiche de vérification « famille A » de l'appareil 312a.....	70

Glossaire

- **AER** : Appareil (de voie) à Évolution Rapide
- **MISTRAL** : Module Informatique de Signalisation et de TRaitement des ALarmes
- **MSC** : gare de Marseille Saint-Charles
- **NAT** : Nouvelle Automotrice Transilienne
- **PK** : Point Kilométrique
- **RFN** : Réseau Ferroviaire National français
- **SNCF** : Société Nationale des Chemins de Fer français
- **SNCF Mobilités** : Entreprise ferroviaire du groupe SNCF
- **SNCF Réseau** : Gestionnaire d'infrastructure du groupe SNCF
- **TGV** : Train à Grande Vitesse
- **UIC** : Union Internationale des Chemins de fer

Résumé

Vendredi 24 août 2018 peu avant 18 h, le TGV 6145 en provenance de Paris arrive en gare de Marseille Saint-Charles, son terminus. Le TGV est constitué de deux rames élémentaires couplées en une unité multiple. Alors que le train roule à 28 km/h et que l'avant a déjà atteint le quai, la rame située en queue déraile des sept dernières remorques et de la dernière motrice.

Avant de s'arrêter, le TGV parcourt 155 mètres, entraînant d'importants dégâts aux appareils de voie causés par les roues déraillées. Les remorques et la motrice qui ont déraillé subissent plusieurs avaries en parties basses. Aucun voyageur n'est blessé. Les opérations d'évacuation se déroulent sans difficulté.

Quatre voies du plateau de la gare restent inutilisables jusqu'à réparation complète de l'infrastructure. Les dessertes et les horaires sont réaménagés pendant une semaine, avec suppression de nombreux trains.

La cause origine du déraillement est la rupture, lors du passage du train, d'un rail d'un aiguillage du faisceau d'entrée de gare.

Les investigations ont permis d'établir que ce rail, situé dans la courbe extérieure de la voie déviée de l'aiguillage, était soumis à un niveau de sollicitation élevé. Divers indices de dégradation de l'aiguillage comme l'apparition d'un jeu dans les selles d'appui du rail rompu ou l'usure anormale d'un contre-rail en vis-à-vis, témoignent de l'intensité des sollicitations subies et sont révélateurs d'un maintien insuffisant du rail qui s'est développé en conséquence.

Trois facteurs se sont combinés pour provoquer la rupture du rail :

- l'intensité des efforts de guidage des roues qui s'exercent sur le rail en forte courbure ;
- la mobilité latérale du rail résultant du développement d'un jeu dans le système d'attache dans le temps ;
- l'affaiblissement de la résistance du rail en raison de l'amorce d'une fissure qui a pris naissance dans une blessure au rail résultant d'une opération de bourrage ancienne.

Les divers indices de dégradation de l'aiguillage observés, qui sont l'usure du contre-rail, le fluage des selles d'appui du rail, le desserrage des tirefonds, l'état de l'encoche des traverses et les blessures au rail, n'avaient pas été identifiés comme à risque lors des opérations d'entretien. Les prescriptions du gestionnaire de l'infrastructure n'énonçaient pas explicitement ces indices comme critiques.

Depuis l'accident, des directives ont été données, par le gestionnaire de l'infrastructure en interne, pour renforcer le contrôle et l'entretien des aiguillages de même modèle.

Le BEA-TT émet une unique recommandation concernant le renfort du système d'attache, ou à défaut le renforcement de la maintenance, pour le rail extérieur de déviation des aiguillages de faible rayon.

1 - Constats immédiats et engagement de l'enquête

1.1 - Les circonstances de l'accident

Vendredi 24 août 2018 peu avant 18 h, le TGV 6145 en provenance de Paris arrive en gare de Marseille Saint-Charles, son terminus. Le TGV est constitué de deux rames élémentaires couplées en une unité multiple. Alors que le train roule à 28 km/h et que l'avant a déjà atteint le quai, la rame située en queue déraile des sept dernières remorques et de la dernière motrice.

Avant de s'arrêter, le TGV a parcouru 155 mètres, entraînant d'importants dégâts aux appareils de voie causés par les roues déraillées.

Les opérations d'évacuation du TGV sont lancées dès l'arrêt du train par le conducteur. Elles s'effectuent avec l'assistance des agents commerciaux du train et ceux de la gare. Elles s'achèvent 25 minutes après l'accident.

Les opérations de remise en marche de trois autres trains immobilisés en avant-gare à la suite du déraillement, s'achèvent à 19 h 05.



Figure 1 : la rame déraillée en entrée de gare

1.2 - Le bilan de l'accident

Aucun voyageur n'est blessé.

Les premiers constats effectués ont permis d'identifier plusieurs avaries et chocs en sous-face des voitures déraillées.

Pour l'infrastructure, une dizaine d'aiguillages sont endommagés ainsi que du matériel de signalisation disposé en voie. Il est aussi immédiatement repéré une rupture de rail sur un aiguillage qui est identifié comme le point d'origine du déraillement.



*Figure 2 : l'arrière de la rame qui a déraillé.
Au premier plan à droite, cerclée en rouge, la rupture de rail*

1.3 - Les mesures prises après l'accident

L'opération de relevage de la rame a débuté le soir même. Elle s'est terminée le surlendemain, 26 août, au soir.

La réparation de l'infrastructure a suivi les jours suivants. Quatre voies du plateau de la gare sont restées inutilisables pendant ce temps, obligeant à un réaménagement des dessertes et des horaires avec suppression de nombreux trains.

L'exploitation a repris normalement, après remise en état des installations, le 30 août à 18 h 30.

Une enquête interne de l'audit de sécurité du groupe SNCF a conclu en première analyse que le déraillement avait bien été provoqué par la rupture du rail observée sur le site, la détermination des raisons de cette rupture nécessitant des investigations complémentaires.

1.4 - 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 27 août 2018 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 de la SNCF. Ils ont recueilli les témoignages ou déclarations écrites des opérateurs impliqués et visionné les documents vidéos. Ils ont eu communication des pièces et documents nécessaires à leur enquête.

2 - Le contexte de l'accident

2.1 - La gare de Marseille Saint-Charles

La gare de Marseille Saint-Charles est la principale gare de l'agglomération de Marseille. Avec 19 millions de voyageurs par an, elle est la dixième gare la plus fréquentée du réseau ferroviaire français. Sa fréquentation s'est considérablement accrue avec la mise en service, en juin 2001, de la LGV Méditerranée mettant Marseille à 3 h de Paris par le TGV.

C'est une gare en « cul-de-sac ». Cinq lignes y convergent : la ligne à grande vitesse Méditerranée, la ligne classique venant de Lyon, la ligne classique venant de Nice, et les deux lignes régionales venant de Miramas par la côte bleue et d'Aix-en-Provence.

Immédiatement en sortie de gare, une première bifurcation s'opère vers l'ouest pour la ligne de Miramas par la côte bleue, puis une seconde vers l'est pour la ligne vers Nice et la Côte d'Azur.

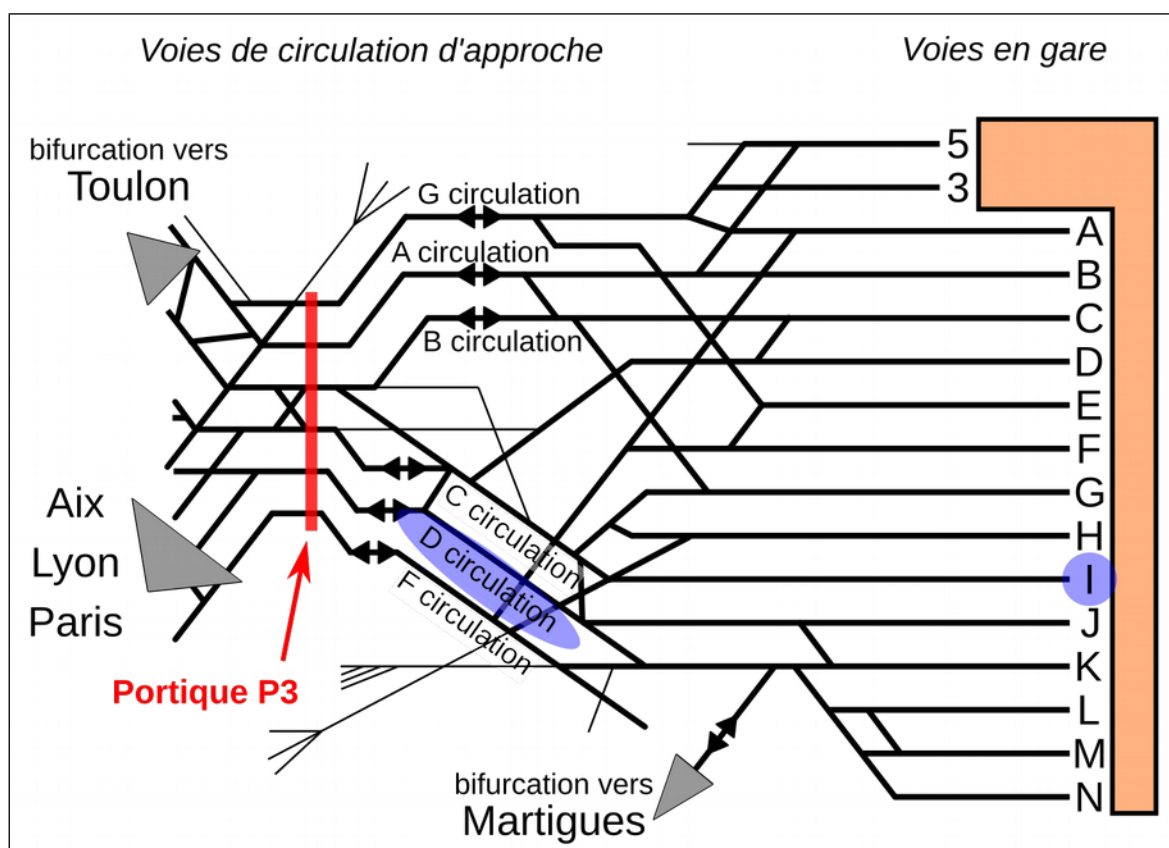


Figure 3 : plan de situation de la gare de Marseille Saint-Charles

Le trafic moyen journalier de la gare est de 500 circulations en cumul d'entrées et de sorties. Environ 20 % de ces circulations sont des TGV et 80 % des TER. Ces chiffres incluent les circulations de manœuvre de ces trains vers les garages et ateliers.

La gare de Marseille Saint-Charles dispose de 16 voies à quai numérotées 3 et 5 puis de A à N. Les TGV en unité simple sont reçus sur les voies B à L. Les TGV en unité multiple sont reçus uniquement sur les quatre voies à quai de grande longueur, à savoir F, G, H et I.

Le plan de voie d'entrée de gare comprend, de façon assez classique pour une gare terminale, un réseau de voies traversantes disposées en « X » qui assurent la jonction entre les voies de circulations en approche de la gare, au nombre de 6, et les 16 voies à quai.



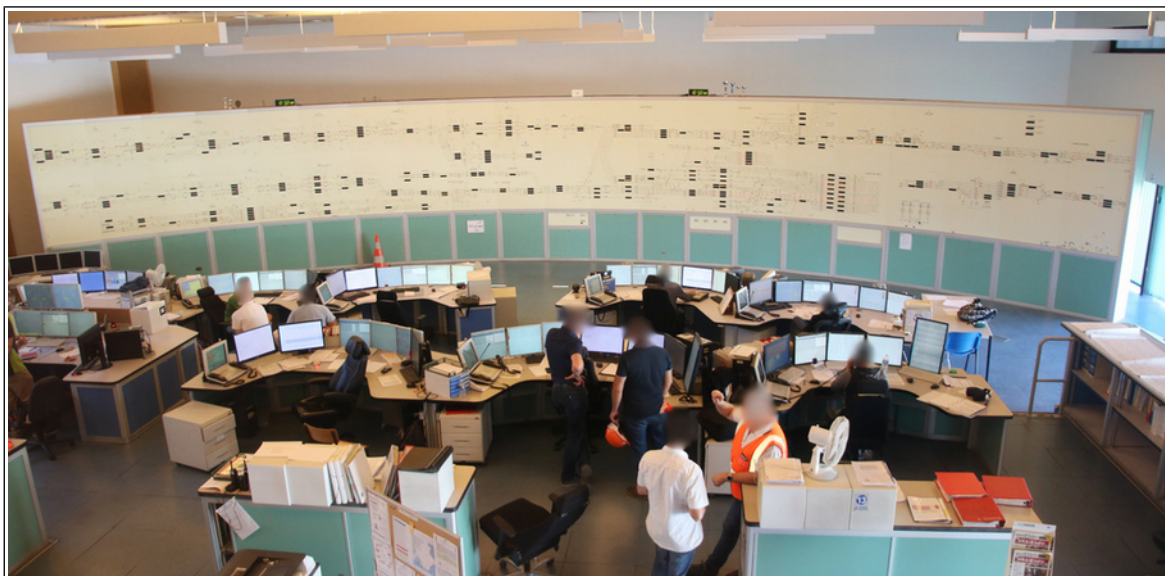


Figure 5 : la salle de commande du poste d'aiguillage

La commande de la signalisation s'effectue par un système électro-informatique, de type « PRCI », qui signifie Poste d'aiguillage tous Relais à Commande Informatique. Ce système combine des technologies de modules informatiques et des armoires à relais électromécaniques. Le dialogue avec les opérateurs s'effectue par des écrans et des claviers, selon un système d'interface homme-machine dénommé « MISTRAL » (pour Module Informatique de Signalisation et de TRaitement des ALarmes) mis en service en 2001 et dont le poste de Marseille a été la tête de série.

L'utilisation de l'informatique permet une programmation préalable des itinéraires à emprunter par les trains, mais également un archivage complet de toutes les opérations réalisées en exploitation.

Le 28 août 2018 peu avant 18 h, le poste fonctionnait en mode automatique « programmation ». Lorsque le TGV 6145 s'est annoncé, son itinéraire préenregistré s'est automatiquement tracé vers la voie I, les opérateurs n'ayant alors qu'à surveiller le déroulement normal de l'opération.

2.3 - Le TGV 6145

Le TGV 6145 était constitué de deux rames élémentaires couplées en une unité multiple.

La rame avant était la rame automotrice Duplex de numéro de série **259**. La rame arrière était la rame automotrice Euroduplex de numéro de série **818**.

Les rames TGV Duplex constituent la première génération de rames TGV à deux niveaux. Elles ont été construites par Alstom à partir de l'année 1995.

Les rames TGV Euroduplex, aussi appelées TGV 2N2, appartiennent à une génération ultérieure de TGV à deux niveaux, construite par Alstom à partir de 2011. Ces rames ont la caractéristique d'être « interopérables », c'est-à-dire d'être aptes à circuler dans plusieurs pays européens aux alimentations électriques et aux signalisations variées.

La rame Duplex 259, de livrée bleue dite « Atlantique », est celle qui était située à l'avant et qui est restée sur les rails jusqu'à l'arrêt du train.

La rame Euroduplex 818, de livrée noire et blanche dite « Carmillon », est celle qui a déraillé. Elle a été mise en service en mars 2015. Elle a parcouru un cumul de 1 759 023 km, soit un rendement moyen annuel très élevé qui avoisine les 480 000 km/an.



Figure 6 : rame TGV Euroduplex 818

Les deux types de rames, Duplex et Euroduplex, contiennent 510 places de voyageurs et ont une longueur de 200 m. Elles sont constituées de deux motrices encadrantes et de huit remorques intermédiaires. Chaque motrice repose sur deux bogies à deux essieux. Les remorques s'appuient sur des bogies communs à deux caisses adjacentes. Les remorques sont ainsi solidaires entre elles et forment un tronçon articulé. Chaque rame comporte au total 13 bogies de deux essieux, soit 26 essieux.

La figure ci-dessous donne la composition du TGV Euroduplex 818 qui a déraillé, avec la numérotation de ses voitures, bogies et essieux. La marche du train était dans le sens inverse de la numérotation croissante conventionnelle des éléments.

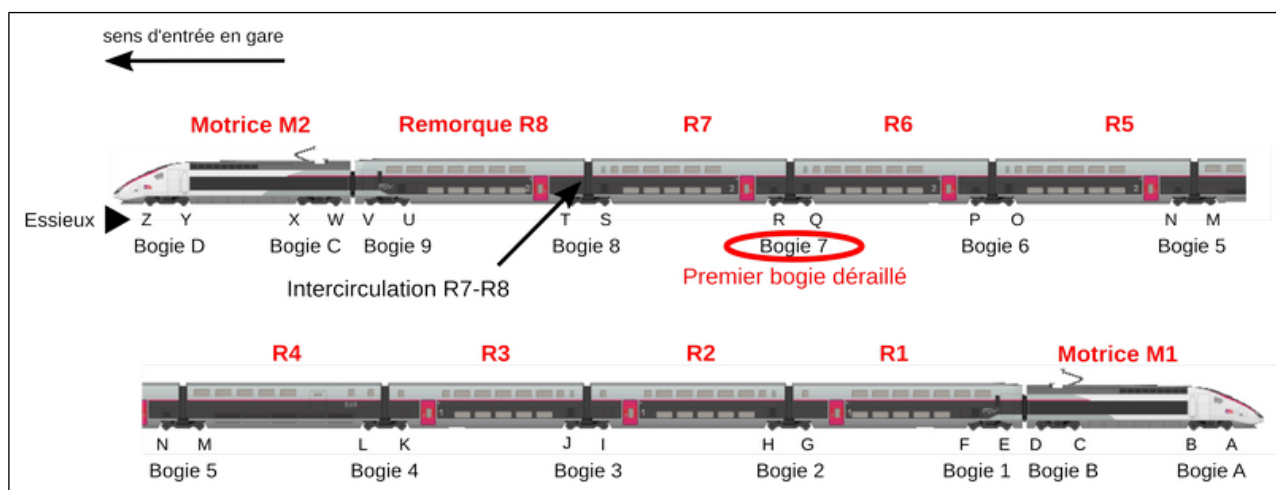


Figure 7 : composition de la rame 818

Le déraillement s'est produit du bogie 7 au bogie A (essieux R à A), c'est-à-dire de l'intercirculation R7-R6 jusqu'à la motrice de queue M1, soit neuf bogies. Sur ces bogies, le bogie 4 était toutefois sur rail après l'accident. Il a, en toute vraisemblance, déraillé comme les autres puis s'est ré-enrillé.

2.4 - Généralités sur les aiguillages

La figure de la page suivante donne l'itinéraire détaillé suivi par le train en entrée de gare ce 24 août 2018 avec les différents appareils de voie franchis sur son trajet.

Dans le plan de voie d'avant-gare, il existe plusieurs natures d'appareil de voie.

Un « branchement simple » (BS) est l'appareil de voie le plus courant du réseau, communément appelé l'aiguillage. Il permet d'aiguiller un train d'une voie vers une autre. Le branchement simple comporte, dans le cas général, une voie rectiligne, dite voie directe, et une voie courbe, dite voie déviée.

La figure ci-dessous montre le branchement simple n° 312a, avec déviation à gauche, en entrée de gare. Il a été emprunté par le TGV 6145 dans le sens de la photographie en étant dévié vers la gauche (nota : sur la photographie l'aiguillage n'est pas positionné en voie déviée mais en voie directe). Il s'agit de l'aiguillage sur lequel s'est produit la rupture de rail et le déraillement.



**Figure 8 : branchement simple n° 312a en gare de Marseille, à déviation à gauche.
Cerclé en rouge, l'emplacement de la rupture de rail.**

Les trois figures ci-contre se lisent en continuité l'une de l'autre

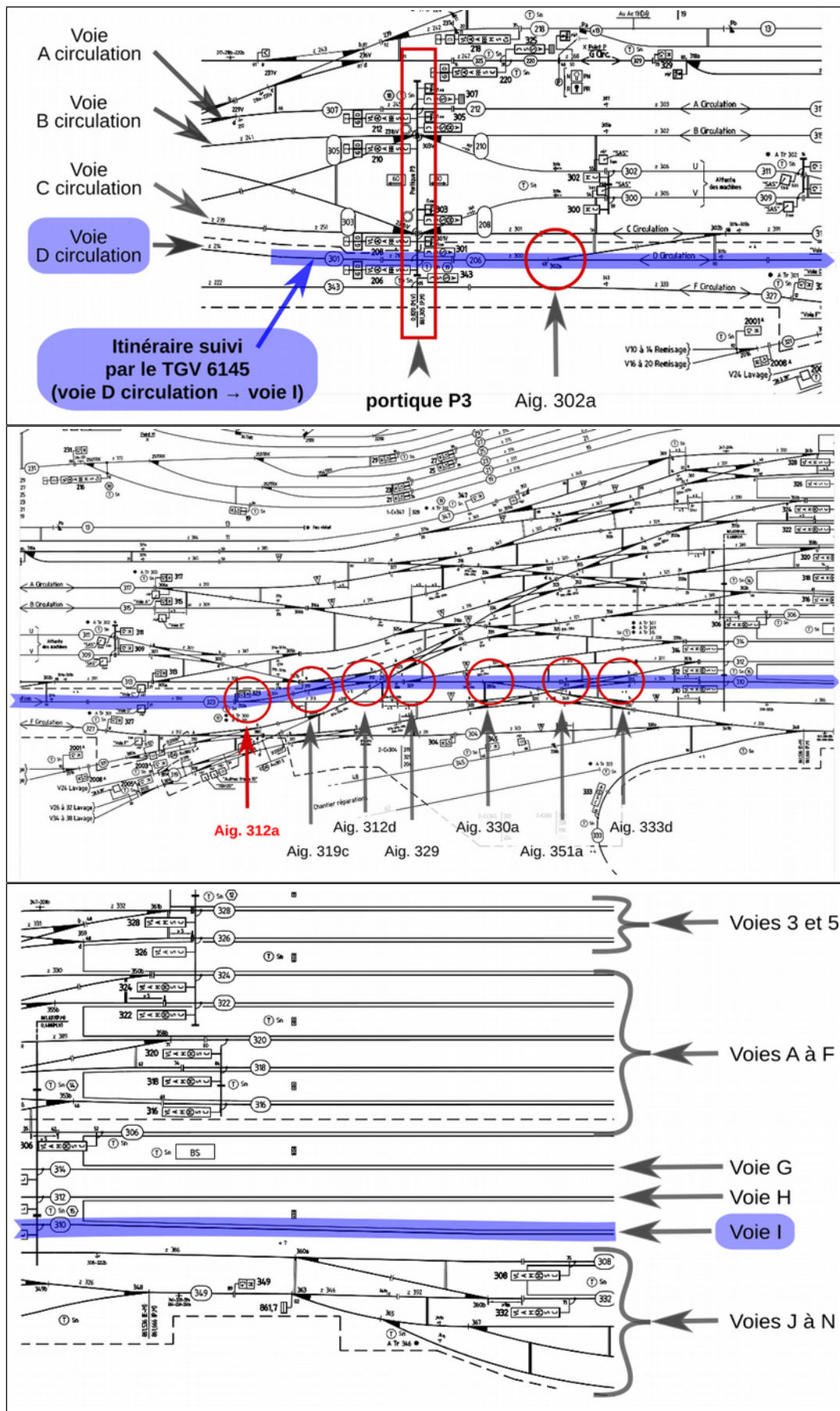


Figure 9 : extrait du schéma de gare et itinéraire emprunté par le TGV 6145

Il existe d'autres types d'appareil de voie en gare. La « traversée oblique » (TO) permet d'assurer le croisement sans échange de deux voies (un spécimen est visible sur la figure 8 au-dessus du BS 312a en voie directe). La « traversée jonction double » (TJD) est un appareil plus complexe. Il permet d'assurer le croisement de deux voies, ainsi que tous les mouvements d'aiguillage entre ces deux voies (un spécimen est visible sur la photo de la figure 8 au-dessus du BS 312a en voie déviée à gauche).

De façon précise, l'itinéraire d'entrée en gare du TGV 6145 empruntait le BS 302a en voie directe, puis le BS 312a et la TJD 319c/312d en voie déviée, puis le BS 329, le BS 330a et enfin la TJD 351a/333d en voie directe.

Dans la suite du rapport nous allons particulièrement nous intéresser à l'appareil de voie sur lequel s'est produit le déraillement, qui est le branchement simple **312a** à déviation vers la gauche, montré sur la figure 8.

Nous donnons ci-après quelques notions plus détaillées sur le fonctionnement d'un tel aiguillage.

Un branchement simple se compose de trois parties (voir figure ci-dessous) :

- la partie **aiguillage** avec deux aiguilles mobiles en rail usiné qui viennent s'appuyer l'une ou l'autre contre les rails extérieurs et qui permettent d'assurer la continuité de l'un ou l'autre des itinéraires. Des contrôleurs, appelés « Paulvé », s'assurent du collage effectif des aiguilles avant d'ouvrir les itinéraires au passage des trains sur l'aiguillage ;
- la partie de **voie intermédiaire** assimilable à deux voies courantes imbriquées ;
- la partie **croisement** avec le cœur, qui est une pièce, généralement en acier moulé, garantissant le croisement des deux files de rail qui se rencontrent. Le guidage des essieux au passage du cœur est assuré par des contre-rails disposés en vis-à-vis le long des rails extérieurs.

La rupture de rail, identifiée immédiatement après l'accident comme étant le point d'origine du déraillement, s'est produite dans la partie de voie intermédiaire de l'aiguillage 312a, juste avant le cœur (voir la localisation en rouge sur la figure ci-dessous).

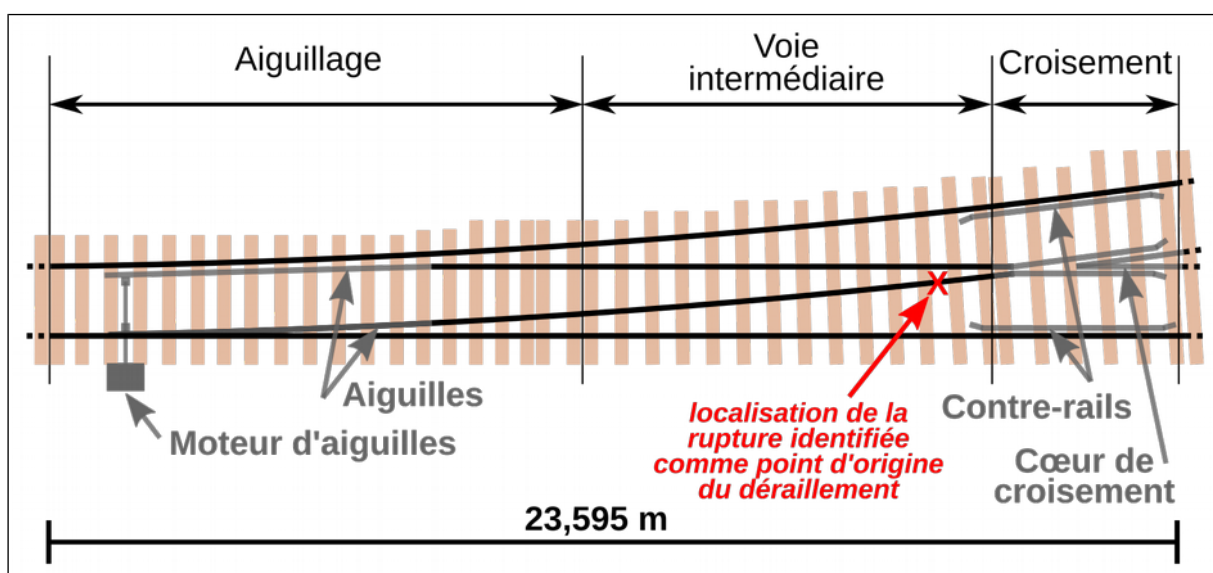


Figure 10 : principaux constituants de l'aiguillage et localisation de la rupture

L'aiguillage 312a est du modèle « tangente 0,13 court » selon le catalogue des aiguillages de SNCF Réseau. La désignation « tangente 0,13 » signifie que la voie déviée en fin d'aiguillage fait un angle avec la voie directe dont la tangente est 0,13, soit environ 7,5°. Le qualificatif « court » est en rapport avec la longueur, ici 23,595 m, par rapport à des modèles qui sont plus longs ou extra-courts.

Le rayon de courbure de cet aiguillage est de 190 m. C'est un des aiguillages aux rayons de courbure les plus faibles du réseau. Il doit être circulé à une vitesse maximale de 30 km/h. Le plancher de l'aiguillage est constitué de traverses en bois.

Dans la zone de voie intermédiaire, la fixation des rails sur les traverses est similaire à celle d'une pose de voie courante avec des attaches de type Nabla. Dans ce type d'attache, chaque rail est interfacé avec la traverse bois par une selle d'appui métallique surmontée d'une semelle de caoutchouc (voir figure ci-après). Le rail est fixé sur les côtés au moyen de griffons, qui sont des petites plaques métalliques de forme trapézoïdale (autrement dit de Nabla : ▽), serrés par des tirefonds.

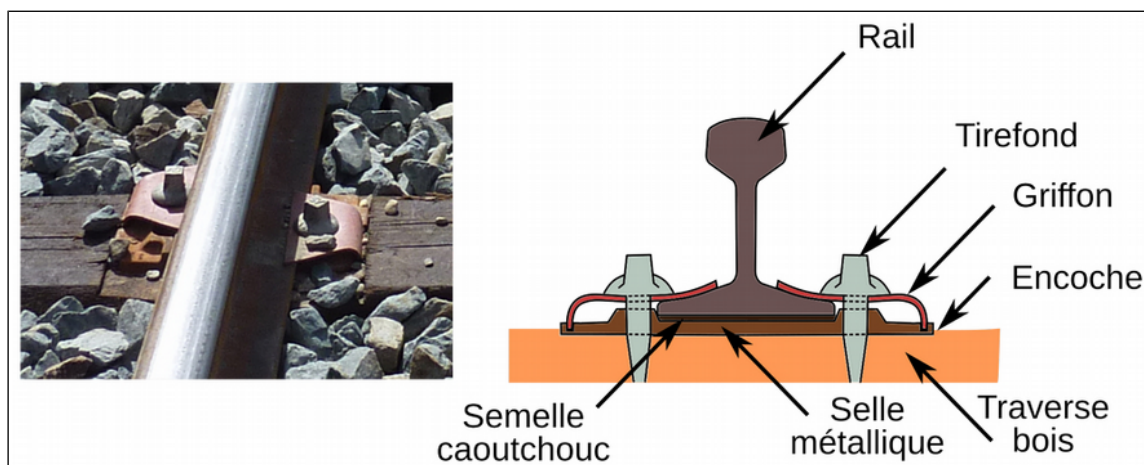


Figure 11 : principe d'attache du rail en partie de voie intermédiaire

2.5 - Le risque de rupture de rail

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 la réparation, à des accidents plus catastrophiques. Le BEA-TT a produit plusieurs rapports d'enquête sur des accidents consécutifs à des ruptures de rail.

Le dernier concerne 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 Solaize¹. Cet accident, sur voie de service, a un point commun avec le déraillement du 24 août 2018 à Marseille, c'est de s'être produit dans une courbe de voie de faible rayon.

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

La maîtrise du risque de rupture est obtenue par une surveillance de l'état et du réglage du rail et de ses attaches au moyen de tournées d'engins de surveillance et d'agents en voie. Nous entrerons plus en détail au chapitre 4 dans la politique du gestionnaire d'infrastructure permettant de mettre en œuvre cette prévention.

L'accident du 24 août 2018 à Marseille s'est de plus produit dans un appareil de voie. Un rapport du BEA-TT a déjà concerné un déraillement survenu dans un appareil de voie. Il s'agit du déraillement dramatique d'un train Intercités en gare de **Brétigny-sur-Orge** survenu le 12 juillet 2013, au bilan humain très lourd. Les conditions du déraillement étaient notablement différentes : le train roulait à grande vitesse, et la rupture qui a eu lieu ne s'est pas produite sur un rail mais au niveau d'un joint de rails. Nous serons également amenés à examiner plus en détail les conditions de surveillance et de maintenance des aiguillages au chapitre 4, et notamment les dispositions de renforcement de la maintenance prises à la suite de l'accident de Brétigny-sur-Orge.

¹ Ces rapports sont consultables sur le site internet du BEA-TT : www.bea-tt.developpement-durable.gouv.fr

3 - Les investigations sur la cause immédiate de l'accident

3.1 - Les résumés des déclarations

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 - *Le témoignage du conducteur du train*

Le conducteur du TGV 6145 a obtenu sa licence de conduite en 2000. Il conduit les TGV depuis juin 2016.

Le train est parti à l'heure à 14 h 37 de Paris-Gare de Lyon, et est arrivé à 17 h 59 à Marseille Saint-Charles pour un horaire prévu à 18 h.

Dans la périphérie de Marseille, la ligne TGV emprunte un long tunnel, puis il y a une succession de limitations de vitesse, 140 km/h, 90 km/h, 60 km/h et enfin 30 km/h au niveau du portique n° 3 qui est le dernier signal avant le heurtoir. Le conducteur a abordé ce portique à une vitesse inférieure à 30 km/h. L'itinéraire n'était pas direct vers le quai. Il y avait plusieurs prises d'aiguilles. Il a roulé sur l'erre sans tractionner. Il analysait la vitesse, main positionnée sur le frein, prêt à s'arrêter. Il a constaté qu'il arrivait « voie I ». Le quai était à sa gauche. Il a appuyé sur le bouton de verrouillage des portes droites pour que celles-ci restent verrouillées à l'arrivée en gare.

Il a ressenti une retenue faible qu'il a attribué au passage des voitures dans les lacets des aiguilles. Il a remis en traction en arrivant au quai. Le quai fait juste la longueur de son train. Il devait absolument ne pas s'arrêter avant l'atteinte du butoir. Il a alors perçu une résistance anormale à l'effort de traction. Il a ramené la traction à zéro. Le train s'est arrêté. Quatre voyants se sont allumés successivement à savoir : « défaut traction », « défaut disjoncteur continu », « défaut suspension » et « défaut anti-enrayage ».

L'avant du train était à quai, l'arrière non. Étant en partie hors quai, il a appuyé sur le bouton de verrouillage des portes gauches pour que les voyageurs ne descendent pas. Il redoutait une descente des voyageurs situés à l'arrière dans les voies. Quelques secondes après, les deux voyants « signal d'alarme voyageur » et « portes ouvertes » ont clignoté. Il a alors envisagé un danger potentiel de voyageurs dans les voies et a activé l'alerte radio².

Il est entré en relation avec le poste d'aiguillage par la radio sol-train. Il a expliqué qu'il avait eu une retenue de son train, qu'il s'était arrêté à moitié du quai, puis qu'il y avait eu un signal d'alarme et l'ouverture de portes justifiant l'activation de l'alerte radio. Le conducteur d'un autre train, le n° 9829, est immédiatement intervenu dans la conversation radio (entendue de tous les trains) pour dire qu'il voyait que le TGV avait déraillé.

Dès lors, le conducteur s'est concentré sur la gestion des voyageurs. Il a appelé les contrôleurs présents dans les deux rames du TGV. Il a demandé que la rame de queue soit d'abord vidée par l'avant par la première porte qui était à quai. Une fois cette opération terminée, il a déverrouillé les portes côté gauche pour que la rame de tête soit vidée. L'évacuation s'est achevée à 18 h 23.

2 L'alerte radio est un signal sonore de danger envoyé par radio à tous les trains du secteur ainsi qu'aux agents en charge de gérer les circulations. Lorsqu'elle est activée, les conducteurs la recevant arrêtent leur train et les opérateurs des postes d'aiguillage ferment les signaux donnant accès au secteur.

3.1.2 - Le témoignage du chef-circulation du poste d'aiguillage

Le chef-circulation du poste est entré à la SNCF en 1999. Il est au poste de Marseille depuis 2004. Il assure la mission de chef-circulation, c'est-à-dire d'encadrement du poste, depuis 3 ans.

La journée était normale. Aucun incident n'était en cours. Huit personnes étaient présentes en fin d'après-midi dans le poste : cinq aiguilleurs, un assistant faisant le lien avec les équipes commerciales de la gare, un chef de secteur et lui-même.

Le TGV 6145 est arrivé à l'heure, par la voie « D circulation ». Son itinéraire s'est tracé automatiquement par la programmation, vers la voie I en gare.

Une minute avant 18 h, alors que le train arrivait en gare, une sonnerie de discordance³ d'aiguille a retenti. Le voyant central de discordance du tableau de contrôle s'est allumé et de multiples aiguilles se sont affichées en discordance. Le chef de secteur s'est approché du tableau et a relevé dix discordances sur les aiguilles n° 327bd, 323ac, 319ac, 330a, 330bd, 333bd, 351ac, 349ac, 312bd et 329.

Il s'est alors produit une alerte radio en provenance du TGV 6145, puis un appel par la radio sol-train du conducteur du train. Le chef-circulation a répondu à l'appel. Le conducteur lui a dit qu'il avait ressenti une retenue de son train, qu'il était arrêté à moitié du quai, et qu'il y avait eu un signal d'alarme ainsi que l'ouverture de portes. Le conducteur d'un autre train, le TGV 9829, est immédiatement intervenu dans la conversation pour dire qu'il voyait le TGV déraillé.

Le chef-circulation a fait mettre en place la protection des trains en bloquant la programmation. Trois trains, autres que le TGV 6145, étaient arrêtés en voie d'avant-gare : le TGV 9829, le TER 17482 et le TER 881050.

Il s'est alors chargé des opérations de remise en marche des trois trains immobilisés suite à l'alerte radio, pour les évacuer ou les rapatrier en gare, ce qui a pu s'achever à 19 h 05.

3.1.3 - Le témoignage du contrôleur présent dans la rame de queue

Juste avant l'arrivée à Marseille, le contrôleur a entendu l'annonce du terminus aux voyageurs qui a été effectuée par la contrôleuse de la rame en tête, titulaire du train.

Lui-même se trouvait dans l'escalier. Le TGV s'est mis à se balancer violemment de gauche à droite, accompagné de bruits stridents. Il est tombé, puis s'est relevé et s'est tenu à la rampe.

À peine le TGV immobilisé, encore sous le choc, il a regardé à travers la vitre et a constaté le déraillement. Lorsqu'il a pu joindre à l'interphone la contrôleuse titulaire en rame de tête, celle-ci lui a demandé d'aller en voiture 5 où un signal d'alarme venait d'être tiré.

Lors de son déplacement dans le train, il croisait des voyageurs paniqués lui demandant ce qui se passait.

Arrivé en voiture 5, des voyageurs lui ont dit que d'autres voyageurs étaient descendus. Il a demandé à toutes les personnes rencontrées d'aller en tête du train pour l'évacuation. Il a alors été alerté qu'il y avait une odeur de fumée en voiture 2 (vers la queue). Il s'y est rendu. Il y a effectivement constaté une légère odeur de fumée, accompagnée d'un bruit de fuite d'air.

Sur demande du conducteur, il a ensuite réarmé le signal d'alarme en voiture 5 et a vérifié que son train était bien vide pour autoriser le déblocage général des portes du train et l'évacuation de la rame de tête.

³ La discordance d'un appareil de voie signifie qu'un écart est détecté par le contrôleur d'aiguille entre la position commandée et la position réelle.

3.1.4 - Le témoignage de la contrôleuse titulaire présente dans la rame de tête

Deux contrôleurs étaient présents dans la rame de tête, une contrôleuse titulaire et un contrôleur assistant dit « agent B ».

Le voyage s'était déroulé normalement et la titulaire a fait l'annonce réglementaire à l'approche du terminus. Le train est entré à vitesse normale en gare de Marseille avec le ballotement habituel dans le passage des aiguilles.

Soudain le train s'est immobilisé, une partie seulement à quai. Le tableau de contrôle a affiché un signal d'alarme provenant de la voiture 5 de la rame arrière. L'assistant a bloqué les portes au moyen de sa clef de Berne⁴. La titulaire a fait une annonce qu'un signal d'alarme avait été tiré et que les voyageurs allaient devoir attendre la mise à quai complète de la rame.

Puis la titulaire a demandé au contrôleur de la rame de queue d'aller réarmer le signal d'alarme de la voiture 5. Apprenant alors le déraillement après contact avec le conducteur, elle a fait une annonce demandant aux voyageurs de la rame de queue d'évacuer par l'avant de leur rame. Puis, elle a ouvert manuellement des portes de la rame de tête pour commencer l'évacuation des voyageurs qui ne comprenaient pas qu'ils soient retenus.

3.2 - Commentaire sur l'évacuation de la rame

À la lecture des témoignages, l'opération d'évacuation de la rame peut donner le sentiment d'être un peu complexe. Le conducteur et les contrôleurs se sont en fait très bien coordonnés pour garantir à chaque instant la sécurité des voyageurs.

Il s'est agi dans un premier temps de bloquer les portes du train pour éviter toute descente intempestive de voyageur dans les voies, à l'arrière du train arrêté hors quai. Avant de débloquent les portes, il a d'abord fallu évacuer toute la rame de queue. Cette évacuation s'est faite par la porte avant de la rame, seule porte déjà à quai (voir en figure ci-dessous). Un agent de la gare, venu immédiatement au moment des faits, l'avait pour cela déverrouillé manuellement de l'extérieur. Pendant ce temps les contrôleurs de la rame de tête ouvraient aussi manuellement les portes de leur rame pour commencer l'évacuation directement sur le quai. Ce n'est qu'après avoir obtenu l'assurance de l'évacuation complète de la rame de queue par son contrôleur, que le conducteur a appuyé sur la commande à sa disposition pour déverrouiller l'ensemble des portes du train côté quai, permettant ainsi la descente des derniers voyageurs de la rame de tête.



Figure 12 : position de la première porte de la rame de queue en extrémité de quai

4 Une clé de Berne est une clé utilisée par les personnels cheminots pour les serrures des portières des voitures des trains de voyageurs standardisées.

L'évacuation s'est déroulée en toute sécurité en 23 minutes. De l'avis des enquêteurs du BEA-TT, il s'agit d'une bonne performance. Nous n'avons pas mené d'investigation plus approfondie sur les opérations d'évacuation.

L'odeur de fumée perceptible en voiture 2 aurait eu pour origine des arcs électriques provenant des appareillages électriques situés en voie et écrasés par le déraillement. Le dégagement de fumée a été stoppé à l'extincteur par les premiers agents de gare arrivés sur place.

3.3 - Les conditions météorologiques

La journée du vendredi 24 août 2018 a été ensoleillée sur Marseille. Le soleil s'est levé à 6 h 53. À 7 h, il faisait 25 °C. Il y a eu quelques nuages par intermittence en matinée. Puis à midi le ciel s'est complètement dégagé.

Les températures ont atteint un maximum de 30,6 °C à 13 h, avec un léger vent de 20 km/h. La température était de 0,3 °C au-dessus de la moyenne saisonnière. Le 24 août clôturait la deuxième, et dernière, vague de chaleur du mois d'août. La première vague, en première semaine d'août, avait été plus chaude avec une température de 4 °C au-dessus de la moyenne saisonnière.

À 18 h, heure de l'accident, la température était descendue à 26,8 °C avec un ciel toujours dégagé. Le soleil s'est couché à 20 h 27.

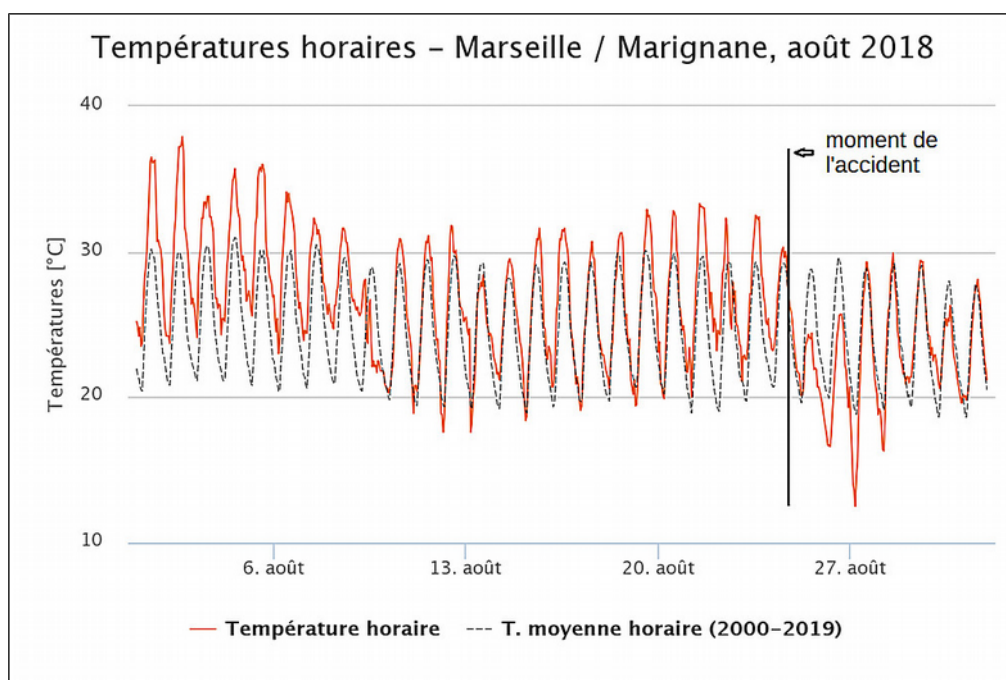


Figure 13 : températures horaires à Marseille sur le mois d'août 2018

3.4 - Les constats sur la rame accidentée

Après l'accident, la rame 259 en tête est positionnée correctement sur les rails.

Le premier bogie de la rame 818 qui a déraillé est le bogie 7, situé entre les remorques 6 et 7. Tous les bogies suivants ont déraillé. L'emplacement des différents bogies de la rame 818 en queue est décrit sur la figure 15.

Deux bogies, le 6 et le 2, sont entièrement sortis des deux files de rail de leur voie, le bogie 2 vers la gauche et le bogie 6 vers la droite. Le bogie 4 est sur rail, il s'est en toute vraisemblance réenraillé. Les autres bogies déraillés ont conservé une ligne de roue entre les deux rails de leur voie et se sont déportés vers la droite.

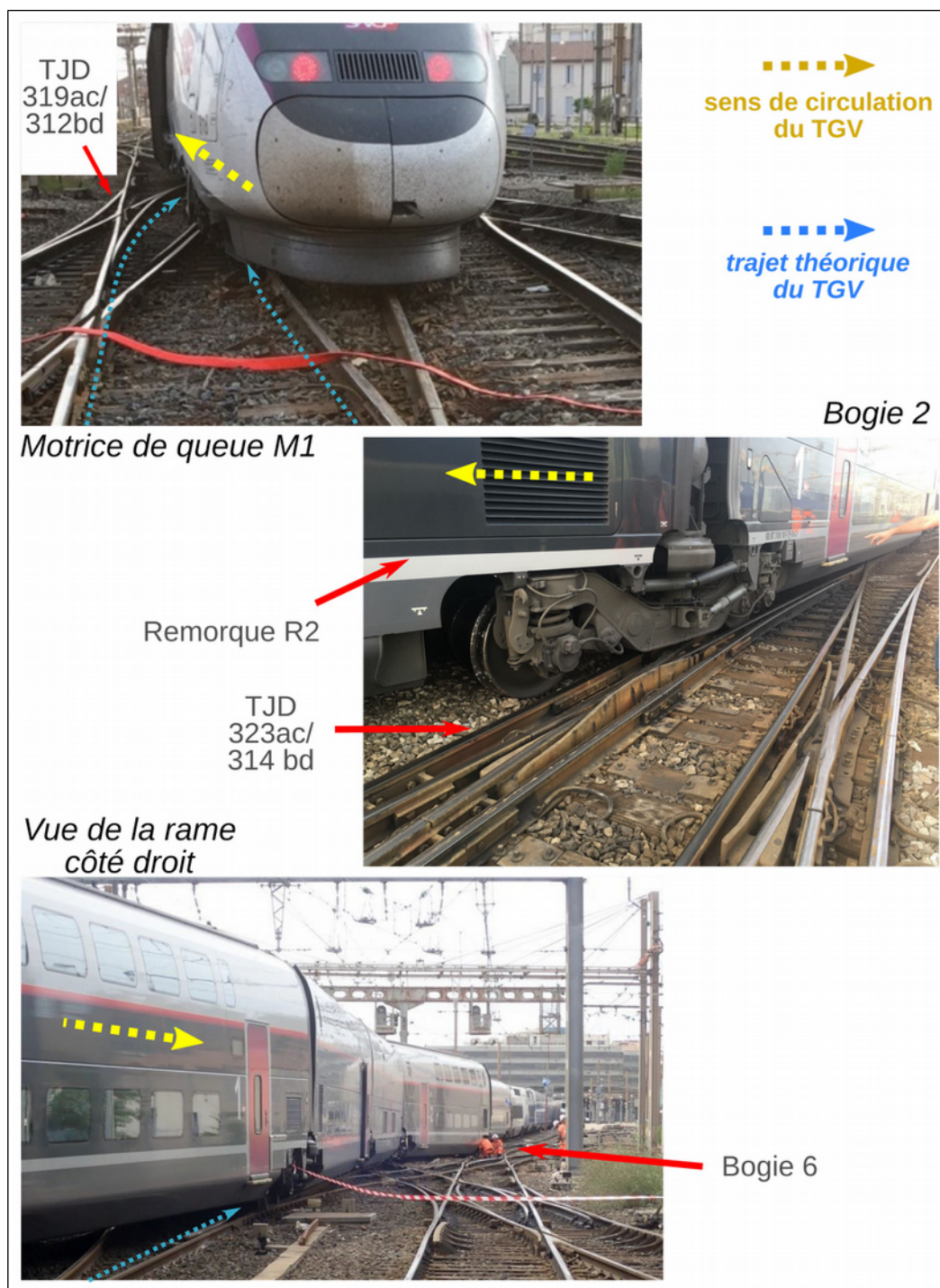


Figure 14 : vues des bogies les plus déportés

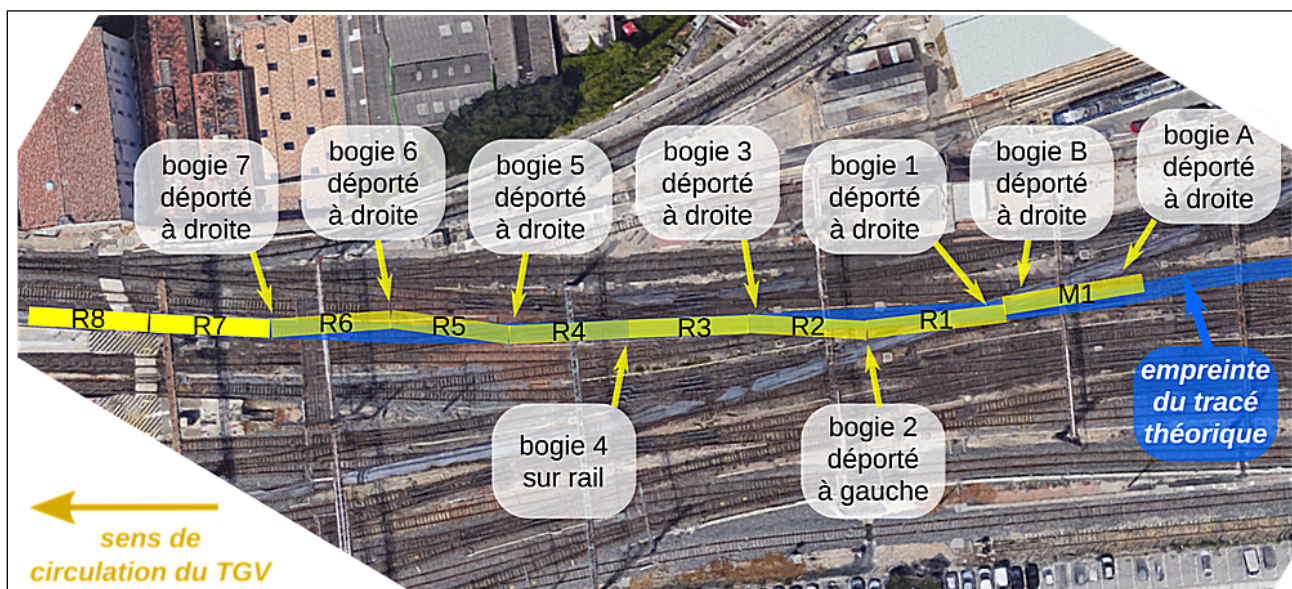


Figure 15 : situation des bogies déraillés de la rame de queue

La rame de queue, ainsi que la rame de tête, ont fait l'objet d'un examen détaillé sur site, puis en atelier.

Sur la rame 259 de tête, aucune anomalie qui aurait pu être une conséquence ou à l'origine du déraillement n'a été constatée. À la suite de l'expertise, elle a été réengagée en service commercial.

Sur la rame 818 de queue, l'accident a causé des dégradations sérieuses sur plusieurs remorques et sur plusieurs bogies, depuis le bogie 7 jusqu'à la queue. Une synthèse de ces dégradations est donnée dans le tableau ci-dessous. Quelques illustrations sont données sur la figure suivante.

Élément de rame		Nature des dégradations (numéro de photo en figure suivante)		Localisation
Bogies	Châssis	1	Choc avec support d'amortisseur Enfoncement de longeron	Bogies 7 à A
	Butées de rotation	4	Butée(s) arrachée(s)	Bogies 1, 2 et 4 à 7
	Butée transversale		Butée détruite	Bogie 2
	Disques de frein	5	Désolidarisation(s) de disque de frein	Bogies 1, 3, 4, 6 et 7
	Essieu	6	Blessures	Bogies 7 à A
Liaisons mécaniques	Amortisseur transversal		Choc	Bogies 3 à 7
	Bielle de barre anti-roulis		Rupture de fixation(s) de bielle	Bogies 1 à 6
	Suspension secondaire	2	Membrane sortie de son logement ou déchirée	Bogies 2, 4 et 6
	Bogies moteur		Frottement sur carter de pont moteur	Bogie A et B
	Amortisseurs	3	Anti-lacets détruit	Bogies 2, 6 et 7
Caisse et structure de caisse	Butées de caisse	7	Choc ou butée rompue	R1 à R7
	Sous-caisse	8	Traces de frottement et éraflures	M1, R1, R2, R4 à R6
	Châssis		Structure de caisse déformée ou localement perforée	R2 à R7

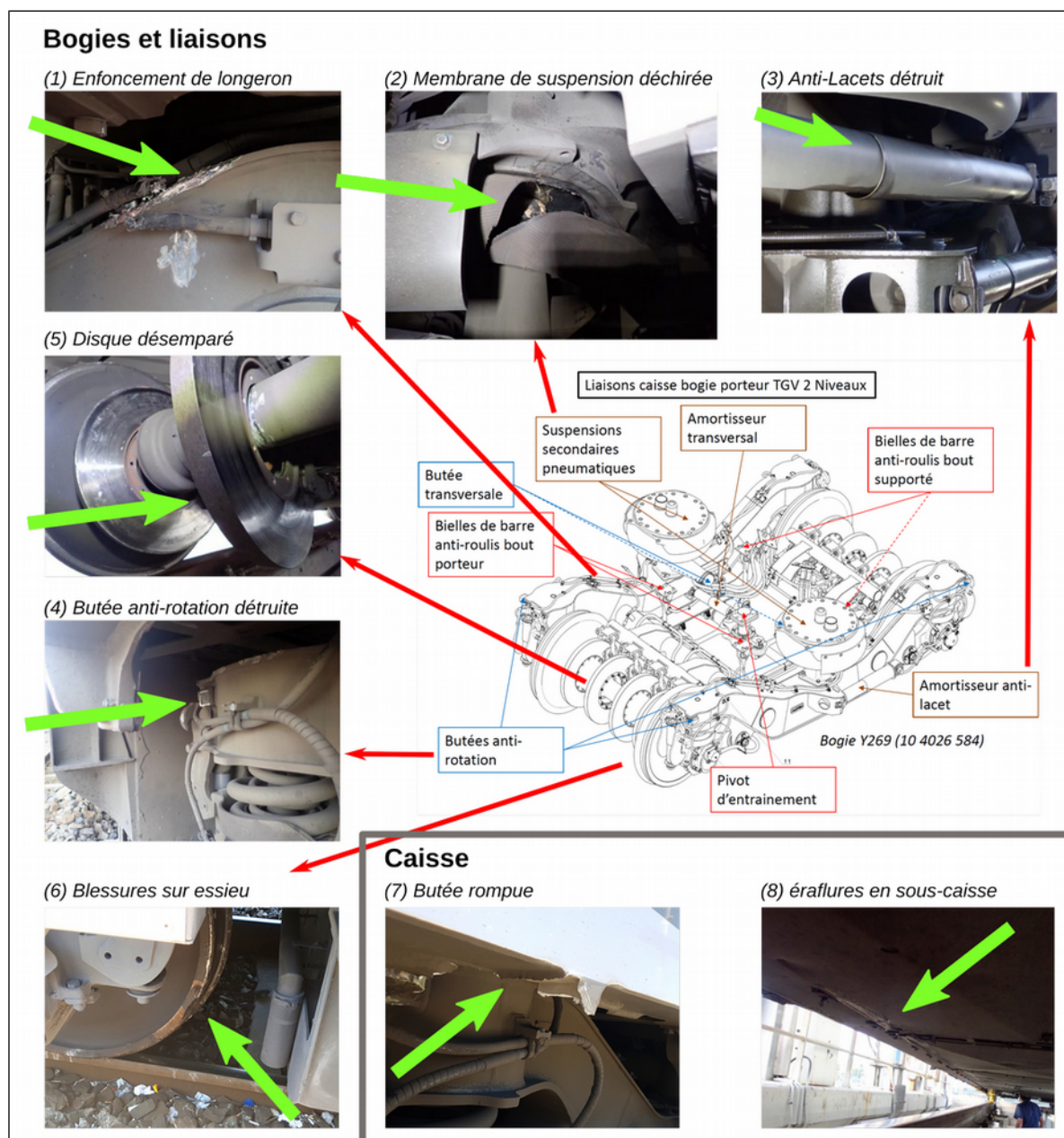


Figure 16 : dégradations constatées sur la rame de queue

Ainsi, au-delà du bogie 7, tous les véhicules déraillés présentent des dégradations au niveau des bogies et de la structure de caisse. Toutes sont une conséquence du déraillement. Parmi les dégâts les plus notables qui restent toutefois limités, nous notons :

- plusieurs butées anti-rotation cassées ou fortement endommagées ;
- des profilés de structure de caisse endommagés ;
- plusieurs essieux fortement marqués et avec des disques de frein désemparés.

Une expertise sur banc de mesure des amortisseurs anti-lacets du TGV a été réalisée. L'objectif était de rechercher une anomalie, de raideur par exemple, qui aurait pu engendrer des contraintes anormales sur le rail. L'expertise a concerné les bogies 7 à 9, c'est-à-dire le premier bogie déraillé et les deux derniers bogies non déraillés.

L'expertise a montré que les courbes d'effort des amortisseurs des bogies 8 et 9 sont proches des valeurs minimum requises, et ne présentent aucun effort anormalement élevé. Les amortisseurs du bogie 7 déraillé sont trop endommagés pour être testés suite à la forte rotation du bogie dans le déraillement.

3.5 - Les constats sur l'infrastructure

La première dégradation rencontrée est une rupture de rail sur le branchement 312a. Elle est localisée sur la file de droite de la voie déviée dans la partie intermédiaire, 1 160 mm avant le joint avec le cœur. Les quatre tirefonds en place sont sortis de leur logement au droit de la rupture. Les attaches sont ainsi libres.

La rupture présente un désaffleurement latéral de 25 mm des deux éléments de rail sectionnés. Des traces attestent du martellement du désaffleurement du côté intérieur de la voie par le passage de plusieurs boudins d'essieux. Le désaffleurement a produit une butée favorisant la montée des roues sur le rail. D'autres traces de roue à la surface du rail sont observables immédiatement après la section de rupture, attestant de la montée de roue.

Un marquage sur un câble de retour traction fixé sur la traverse suivant la rupture atteste de la chute d'au moins un essieu dès cette traverse. D'autres traces sur le contre-rail situé immédiatement après cette traverse, en vis-à-vis de la rupture, attestent du passage d'autres boudins sur le contre-rail et de leur retombée au droit du contre-rail. Le contre-rail est déformé et les supports de fixation sont cassés.

Ces traces de retombée se retrouvent en vis-à-vis sur le joint avec le cœur. Deux boulons, trois têtes de tirefonds et une connexion de retour de courant-traction sont cassés par la retombée des roues. Le patin est également marqué. Il est possible d'en conclure que la retombée des roues s'est produite entre 50 cm et 1,50 m après la rupture, vers la droite de la voie.

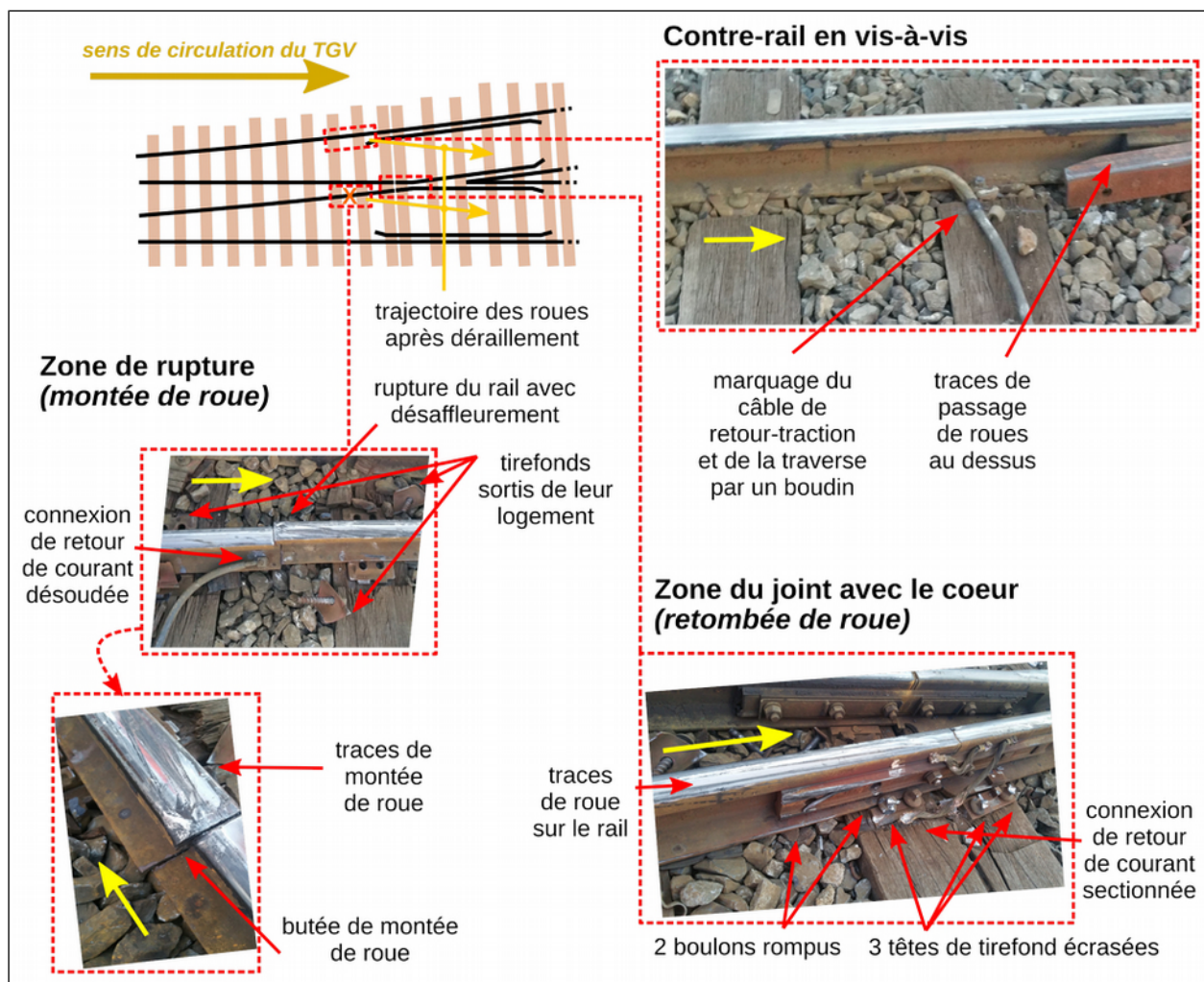


Figure 17 : dégradations constatées sur l'aiguillage 312a

Au-delà de l'aiguillage 312a, de nombreux dégâts sont constatés sur l'ensemble de l'infrastructure au sol. Les plus significatifs portent sur une voie ripée, 9 aiguillages endommagés (aiguille, contre-aiguille, moteur, contrôleurs « Paulvé » et tringlerie), une artère de câbles et une chambre de raccordement écrasées entre la voie I et J, ainsi que divers matériels de signalisation et de circuit de retour de courant traction en voie détruits. La caténaire n'est pas affectée.

L'ensemble de ces dégâts à l'aval de l'aiguillage 312a sont des conséquences du passage des roues déraillées.

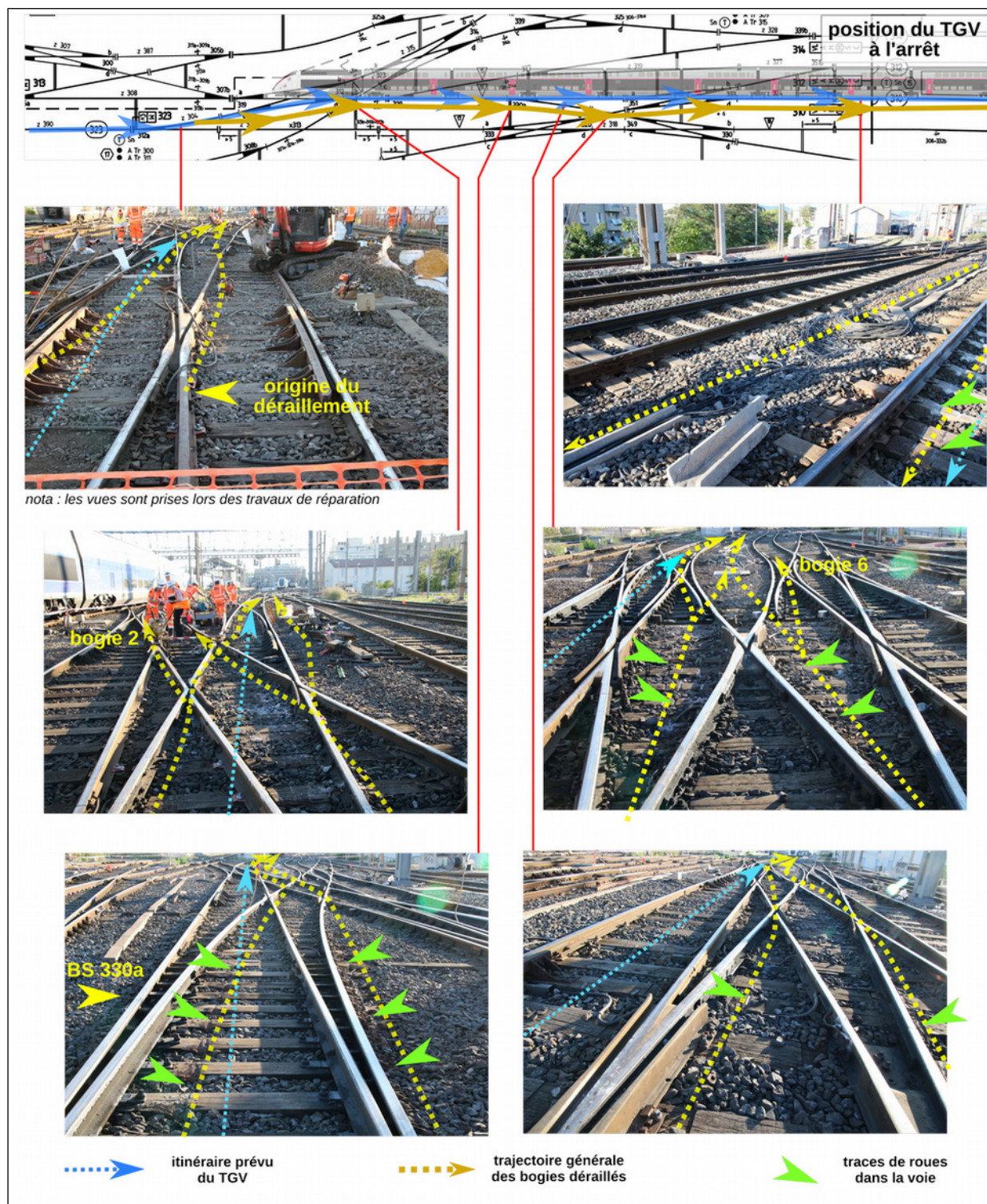


Figure 18 : dégradations sur la trajectoire après déraillement

3.6 - L'examen des enregistrements du TGV

La rame TGV Euroduplex 818 est équipée d'un enregistreur ATESS⁵ qui sauvegarde les paramètres de conduite tout au long du trajet. L'exploitation de l'enregistrement ATESS du TGV 6145 permet les constats suivants :

- La conduite lors du trajet de Paris à Marseille s'effectue sans utiliser le régulateur de vitesse (la « vitesse imposée ») et en anticipant les zones de limitation de vitesse tout en respectant les horaires. Son allure est celle d'une conduite économique et confortable pour les voyageurs.
- Le dernier arrêt intermédiaire s'effectue en gare d'Aix-en-Provence.
- L'approche sur Marseille alterne freinages et marches sur l'erre. Les limitations de vitesse successives sont respectées : 160 (tunnel de Marseille), puis 140, 90, 60 et 30 km/h.

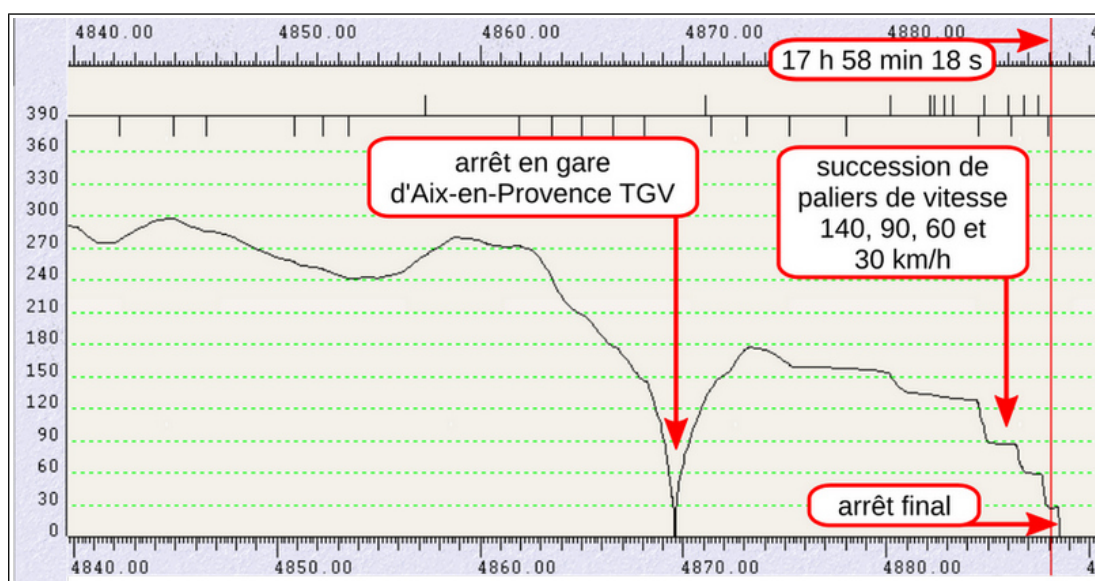


Figure 19 : bande ATESS du TGV 6145

Le tableau ci-après décrit les toutes dernières données d'arrivée du TGV en gare.

Heure	Évènement
17:57:58	Le train franchit le portique P3 sur l'erre à 29 km/h.
17:58:18	155 m après le P3, le conducteur remet en position de traction.
17:58:58	460 m après le P3, à 28 km/h, le conducteur coupe la traction. Le train perd 4 km/h en 45 m.
17:59:04	505 m après le P3, à 24 km/h, le conducteur remet en position de traction. Malgré l'effort de traction, la vitesse tombe de 10 km/h en 65 m.
17:59:16	570 m après le P3, à 14 km/h, le conducteur coupe la traction. Le train perd 9 km/h en 15 m parcourus.
17:59:22	585 m après le P3, soit à 215 m du heurtoir, le conducteur actionne le freinage à 5 km/h. Le train s'arrête immédiatement.
17:59:42	À l'arrêt depuis 20 secondes, un signal d'alarme est tiré en compartiment voyageur.
17:59:54	Le conducteur déclenche l'alerte radio.

5 ATESS : Acquisition et Traitement des Évènements de Sécurité en Statique

Les principales séquences de conduite en entrée de gare sont reprises dans le graphique espace-temps ci-après.

Le passage du bogie 7 de la rame 818, le premier qui a déraillé, s'effectue à 17 h 58' 54" au droit de l'aiguillage 312a. Le train a roulé à basse vitesse pendant 30 secondes jusqu'à son arrêt, entraînant à la suite du bogie 7 le déraillement de l'ensemble de l'arrière du train. 155 m ont été parcouru après le déraillement du bogie 7.

L'ensemble de ces éléments conforte le témoignage du conducteur.

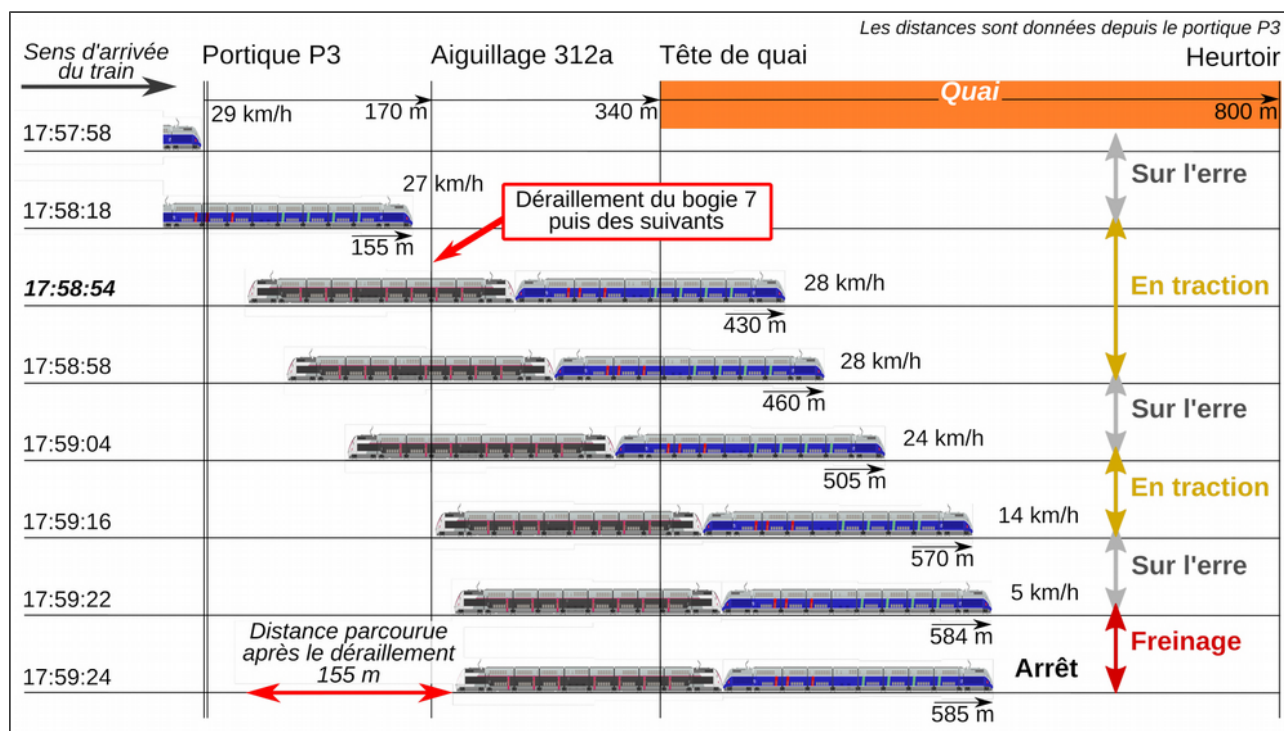


Figure 20 : graphique espace-temps de l'entrée du TGV 6145 en gare

En sus de l'enregistrement ATESS, les deux TGV composant la rame possèdent un enregistrement de l'état de leurs nombreux organes télé-surveillés : équipements de traction, de conversion d'énergie, portes, équipements informatiques, bogies...

L'examen détaillé de ces fichiers montre qu'après un parcours sans anomalie remarquable sur le trajet Paris – Marseille, de nombreux défauts sont apparus dès le moment du déraillement. Ils ont concerné : les sondes de détection de boîtes chaudes des bogies arrière, des anomalies de vitesse des roues et essieux arrière, le pantographe arrière qui ne touchait plus la caténaire, et des problèmes de suspension sur plusieurs bogies arrière.

Ces défauts sont immédiatement postérieurs au déraillement et en sont la conséquence sur les organes de la rame. L'enregistrement ne révèle aucun défaut susceptible d'avoir favorisé ou provoqué le déraillement.

3.7 - Le désarchivage du poste Mistral

Le poste d'aiguillage informatique archive l'ensemble des opérations et des états du système tout au long de l'exploitation. Le fichier d'archivage du 24 août 2018 a fait l'objet d'une extraction suivie d'un dépouillement.

Le fichier permet de reconstituer les mouvements des aiguillages et les ouvertures de signaux au-devant du train pour tracer son itinéraire. Il reconstitue également les occupations (puis libérations) de zone, ainsi que les fermetures de signaux lors du passage du train.

Au moment de l'arrivée du TGV 6145 en gare, quatre autres trains effectuent un mouvement dans la zone d'avant-gare délimitée par le portique P3 :

- le TER 879630, en direction d'Avignon, quitte la voie N vers la voie *F circulation* à 17:58:24, 30 secondes avant le déraillement ;
- le TER 881632, en provenance d'Hyères, arrive par la voie *A circulation* sur la voie 3. Il entre sur la voie 3 à 17:58:34, 20 secondes avant le déraillement ;
- le TGV 9829, en direction de Nice, quitte la voie C vers la voie *B circulation* à 17:58:37, 17 secondes avant le déraillement. C'est le conducteur de ce TGV qui est intervenu à la radio sol-train pour confirmer le déraillement ;
- le TER 880176, en direction d'Aix-en-Provence, quitte la voie E vers la voie *C circulation*. Il quitte la voie E à 17:58:49, 5 secondes avant le déraillement.

Aucun de ces trains n'est entré en collision avec le TGV 6145 puisqu'ils ne roulaient pas sur les voies adjacentes à la voie du quai I.

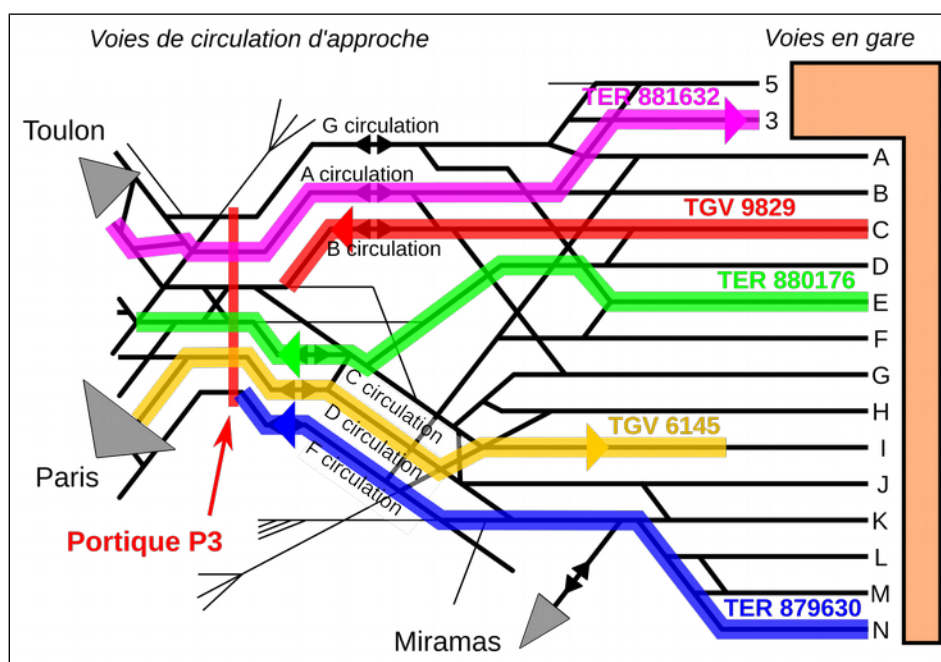


Figure 21 : circulation des trains en gare au moment de l'accident

L'examen séquence par séquence du fichier a montré un enchaînement normal des états du système concernant l'arrivée ou le départ de ces quatre trains. Ces circulations n'ont pas de lien avec l'accident.

Pour le TGV 6145 les informations données par le fichier sont récapitulées dans le tableau ci-dessous.

Les différents éléments de signalisation cités dans le tableau sont repérés selon le schéma ci-après.

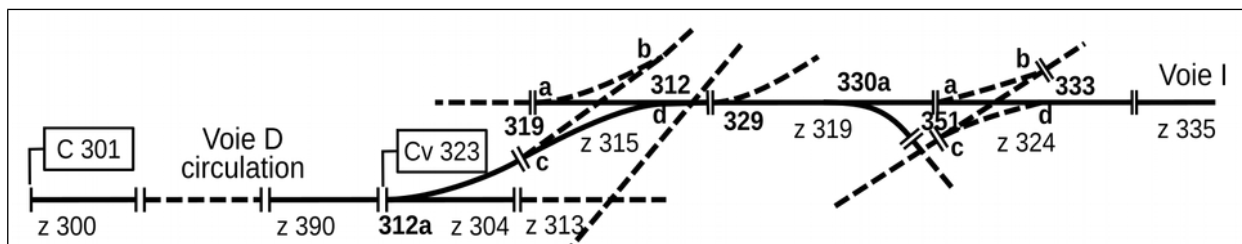


Figure 22 : schéma simplifié de signalisation sur l'itinéraire du train

Heure	Évènement
17:56:09	Mouvement des aiguillages 312a et 312bd en position gauche, et de l'aiguillage 329 en position droite (la numérotation des aiguillages et autres éléments de signalisation est reprise sur la figure ci-après). Ouverture du signal Cv 323 situé à l'aplomb de l'aiguillage 312a. Il s'agit d'un signal de manœuvre, positionné au raz du sol, dit « carré violet ». Il n'est observé que par les conducteurs effectuant une manœuvre en gare (coupe-accroche par exemple). Ouverture du signal C 301. Il s'agit du dernier signal observé par les conducteurs de ligne avant la gare. L'itinéraire du TGV de la voie D circulation vers la voie I à quai est tracé.
17:58:02	Occupation de la zone z300 à l'aval du C 301. Fermeture du signal C 301.
17:58:14	Occupation de la zone z390 à l'amont du Cv 323, indiquant l'approche du TGV 6145 de l'aiguillage 312a.
17:58:21	Occupation de la zone z304 indiquant le passage de l'avant du TGV 6145 sur l'aiguillage 312a.
17:58:25	Occupation de la zone z315 indiquant le passage du TGV 6145 sur les aiguillages 319ac et 312bd.
17:58:27 à 17:58:55	Perte de contrôle par intermittence de l'aiguillage 312bd (14 pertes de contrôle) et battement du feu Cv 323 (13 battements).
17:58:30	Occupation de la zone z319 indiquant le passage du TGV 6145 sur les aiguillages 329 et 330a.
17:58:36	Occupation de la zone z324 indiquant le passage du TGV 6145 sur les aiguillages 351ac et 333bd.
17:58:43	Occupation de la zone z335 indiquant l'arrivée du TGV 6145 sur la voie I.
17:58:57	Fermeture (sans battement) du signal Cv 323.
17:58:57 à 18:00:00	Perte de contrôle avec quelques intermittences de 13 aiguillages 319ac, 312bd, 329, 330a, 349ac, 330bd, 333bd, 327bd, 317ac, 310 ac, 308b, 351ac, 323ac.
17:58:59 à 17:59:20	Dérangement intermittent (3 battements) puis définitif de la zone z313 (en direction de la voie J).
17:59:16	Libération de la zone z390 par le TGV.

Ces éléments confortent le témoignage de l'agent-circulation.

Jusqu'à 17 h 58 min 27 s, l'enchaînement des séquences est nominal.

Un premier décontrôle d'aiguille se produit au passage du TGV à 17 h 58 min 27 s, 27 secondes avant le déraillement. Il concerne l'aiguille **312bd** qui est empruntée par le TGV. Elle est située juste à la suite de l'aiguillage 312a où a eu lieu le déraillement. La perte de contrôle s'est renouvelée, de manière intermittente, 13 fois pendant les 30 secondes entre 17 h 58 min 27 s et 17 h 58 min 57 s. Puis à 17 h 58 min 59 s, la perte de contrôle est devenue permanente en même temps que de nombreux autres pertes de contrôle d'aiguilles sont apparues.

Simultanément aux décontrôles de l'aiguille 312bd, il se produit un battement du carré de manœuvre Cv 323 qui est situé à l'aplomb de l'aiguillage 312a. Les cycles de battement sont corrélés à la perte de contrôle de l'aiguille 312bd. Lorsque le contrôle de l'aiguille est perdu, le carré se ferme.

Même si le carré de manœuvre n'a pas à être observé par le conducteur de ligne, les battements ne sont pas visibles par lui. Ils se produisent à l'arrière de sa cabine.

Le graphique temporel sur la figure ci-dessous représente la mise en correspondance du segment du train qui passe à chaque instant donné à l'aplomb de l'aiguille 312bd (partie supérieure avec le visuel du train) avec les plages de perte de contrôle de l'aiguille 312bd, celles de battement du feu Cv323, celles de battement de la zone z313 et celles de perte de contrôle des autres aiguilles en fonction des mêmes instants (partie inférieure de la figure).

Nous pouvons distinguer deux périodes séparées par la ligne verticale rouge :

- sur les 30 secondes entre 17 h 58 min 27 s et 17 h 58 min 57 s (partie gauche du graphique), des anomalies se produisent au passage de l'avant du train. Il s'agit de la perte de contrôle de l'aiguille 312bd et du battement du signal Cv 323. Les anomalies se produisent en correspondance exacte avec le passage des 13 bogies de l'avant du train sur l'aiguille 312bd qui perd son contrôle ;
- à partir du passage du bogie 7 de la rame 818, bogie qui a déraillé, de nombreuses anomalies de signalisation se produisent. Plusieurs aiguilles perdent leur contrôle en continu, certaines après quelques intermittences. La zone z303 sur la voie adjacente est occupée par intermittence puis en continu. Il s'agit de conséquences directes du déraillement du bogie 7 et des suivants.

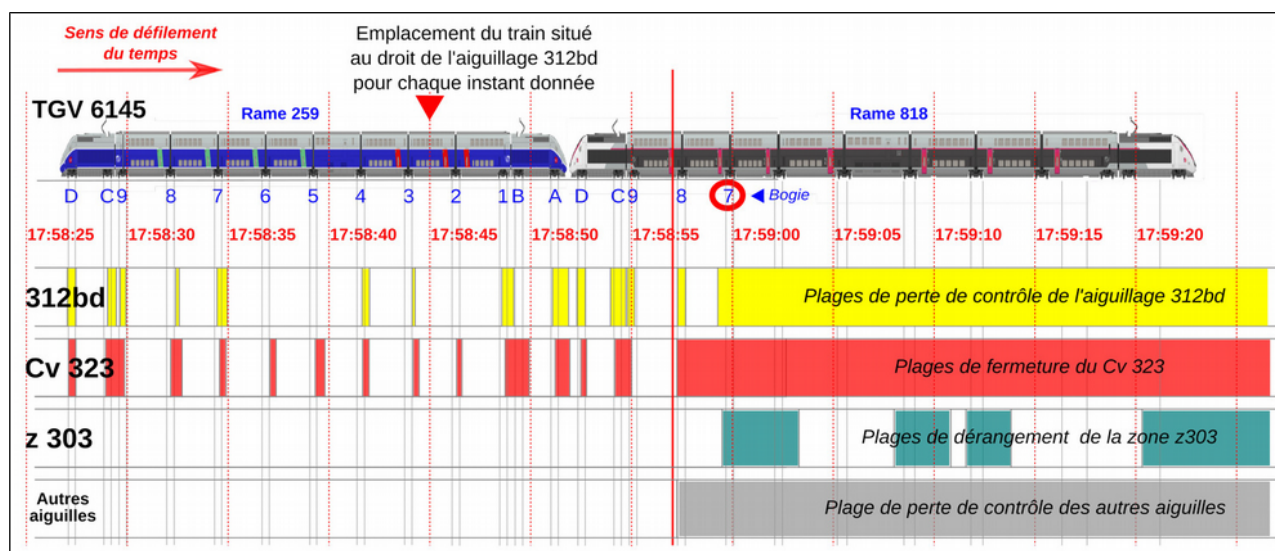


Figure 23 : correspondance du décontrôle de l'aiguille 312bd avec le passage des bogies de l'avant du train

Dans le cadre de nos investigations, nous avons recherché si les décontrôles en **première période**, antérieurs au déraillement, pouvaient avoir un lien de cause à effet avec le déraillement.

Des informations recueillies sur les archivages Mistral pendant les 15 jours qui ont précédé l'accident, il s'avère que les décontrôles des aiguilles 312bd étaient extrêmement fréquents lors des passages des trains. Ils concernaient environ un train sur trois entrant en gare par la voie D circulation.

Les décontrôles, lorsqu'ils se produisent, ne délivrent pas automatiquement une alarme de discordance aux agents d'exploitation. En effet, si c'était le cas, à chaque manœuvre d'aiguille il y aurait la sonnerie et l'allumage du voyant de discordance dans le poste. La discordance est alarmée avec une temporisation de 9 secondes. Les décontrôles intempestifs que l'on observe ci-dessus ont eu une durée bien inférieure. Ainsi, ils sont enregistrés dans le système informatique, mais ils ne produisent pas d'alarme auprès des agents en charge des circulations. Seuls les derniers décontrôles après le déraillement, qui sont devenus permanents, ont activé l'alarme de discordance.

Les décontrôles intempestifs de l'aiguille 312bd étaient connus de longue date du service de maintenance électrique, détecté par leur analyse périodique des désarchivages du poste. Ces décontrôles sont la conséquence de la grande sensibilité des capteurs des contrôleurs d'aiguille aux déformations de l'aiguillage lors du passage des roues. L'aiguille 312bd avait été équipée de contrôleurs renforcés sans que cette action ne règle le défaut.

En synthèse de ces analyses, il apparaît que les décontrôles intempestifs de l'aiguille 312bd qui ont précédé le déraillement n'ont aucun lien direct avec l'accident.

La figure ci-après donne la localisation des décontrôles (permanents) observés en **deuxième période** à la suite du déraillement. Certains aiguillages sont sur l'itinéraire du TGV 6145, d'autres en sont écartés. Les aiguilles décontrôlent en raison de l'endommagement d'une artère de câbles de signalisation entre la voie I et J par les roues déraillées du train, qui a conduit au sectionnement des câbles de contrôle-commande de ces aiguillages. Ces défauts sont tous des conséquences de l'accident.

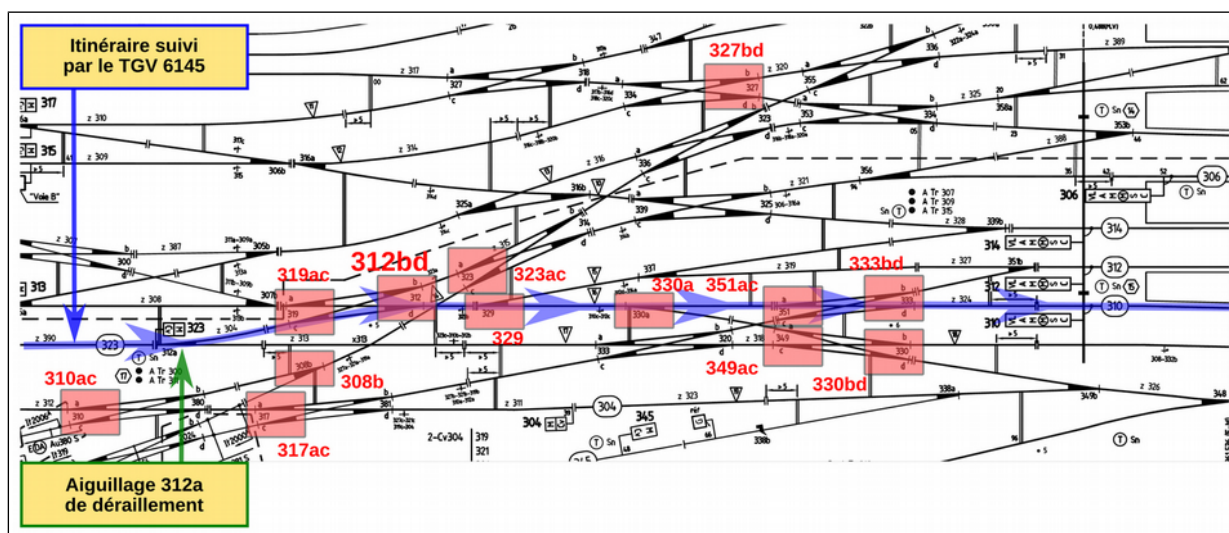


Figure 24 : aiguillages ayant perdu leur contrôle après le déraillement

3.8 - L'expertise métallurgique du rail rompu

Le rail rompu dans l'aiguillage 312a a été démonté et envoyé au Laboratoire d'Expertise Métallurgique du gestionnaire d'infrastructure SNCF Réseau.

L'expertise a comporté un examen visuel permettant une identification et une caractérisation des désordres apparents. Il a été complété par des examens techniques de science des matériaux, d'analyse fractographique, micrographique, et au microscope électronique à balayage.

3.8.1 - La morphologie de la rupture

L'examen des sections amont et aval de rupture permet d'établir les constats suivants (voir la figure ci-dessous avec la numérotation en correspondance des paragraphes) :

- ❶ une **fissuration** s'est développée, selon un processus lent de type **fatigue**⁶, dans l'aile de patin⁷ du côté extérieur à la voie (en bas à gauche de la section visualisée sur la figure). La zone fissurée est oxydée. Elle est de développement ancien ;
- ❷ en extrémité de cette zone fissurée, il y a une **blessure** se présentant sous l'aspect d'une trace de choc, qui est le point de départ du développement de la fissure ;

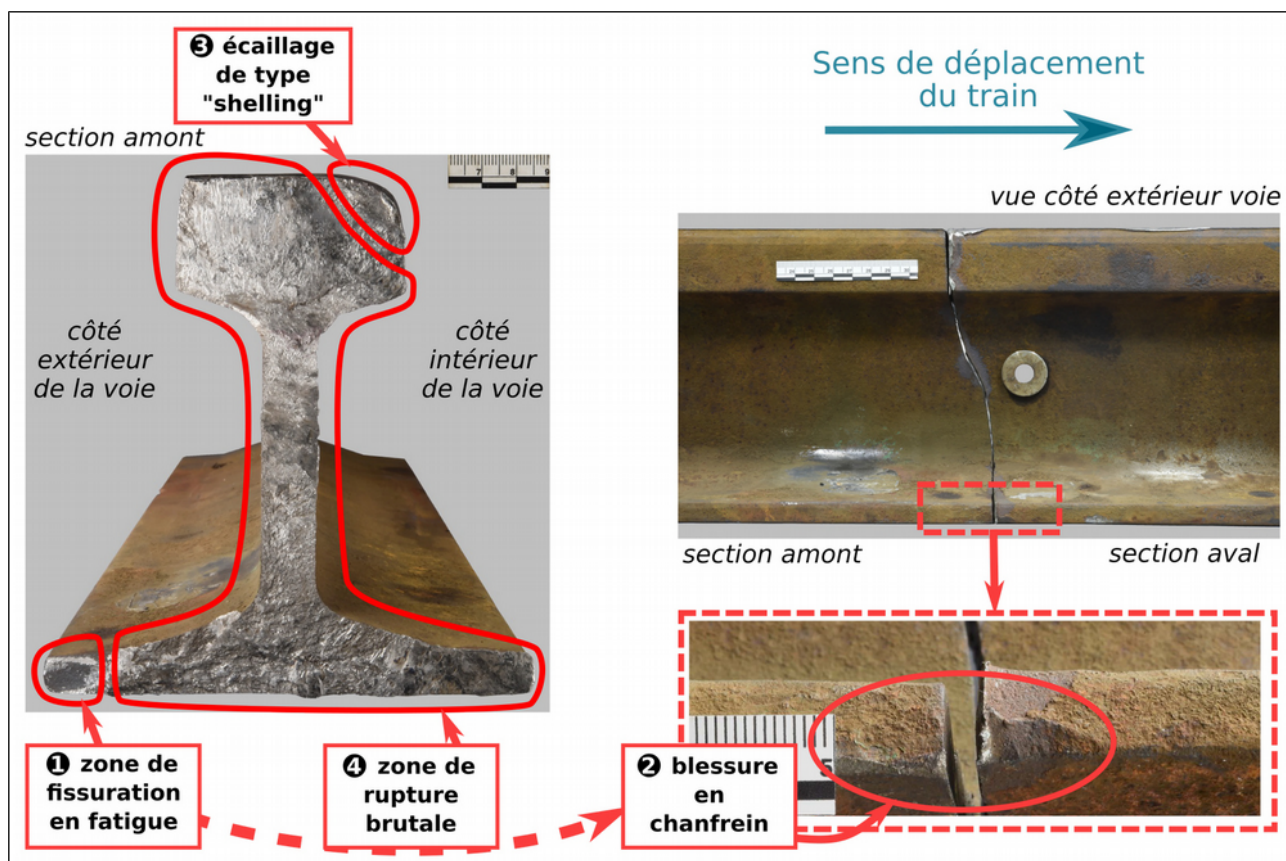


Figure 25 : examen général de la section de rail rompu

6 La fatigue désigne l'endommagement du matériau par la répétition de sollicitations mécaniques telles que le passage cyclique des essieux sur le rail sur une longue durée.

7 Dans un rail de chemin de fer, de profil dit « Vignole », le *patin* désigne la partie basse du rail qui appuie à plat sur les traverses, et comportant deux ailes latérales. La partie centrale amincie du rail est l'*âme*, et la partie supérieure, où roule la roue, le *chamignon*.

- ③ le bord supérieur du champignon côté intérieur de la voie (dit le congé de roulement), présente un défaut d'écaillage de type « **shelling** ». Ce défaut est en général observé sur le rail file haute en zone de voie de forte courbure, ce qui est le cas ici. Il provient d'une fatigue de surface du métal dans la durée sous les efforts latéraux de guidage des roues ;
- ④ le reste de la section est en **rupture brutale**.

3.8.2 - L'examen de la fissure de fatigue dans l'aile de patin

L'examen de la fissure en fatigue de l'aile du patin (❶) montre que sa longueur de développement ne peut être déterminée visuellement en raison d'un « matage » important des deux faces, autrement dit un écrasement des faces l'une contre l'autre qui s'est produit lors du passage des essieux après la rupture. L'analyse en laboratoire, notamment au microscope électronique, révèle cependant que la fissuration s'est amorcée à partir de la blessure en bord inférieur de patin, et qu'elle s'est développée lentement sur une longueur d'environ 12 mm dans l'aile du patin (voir figure ci-dessous).

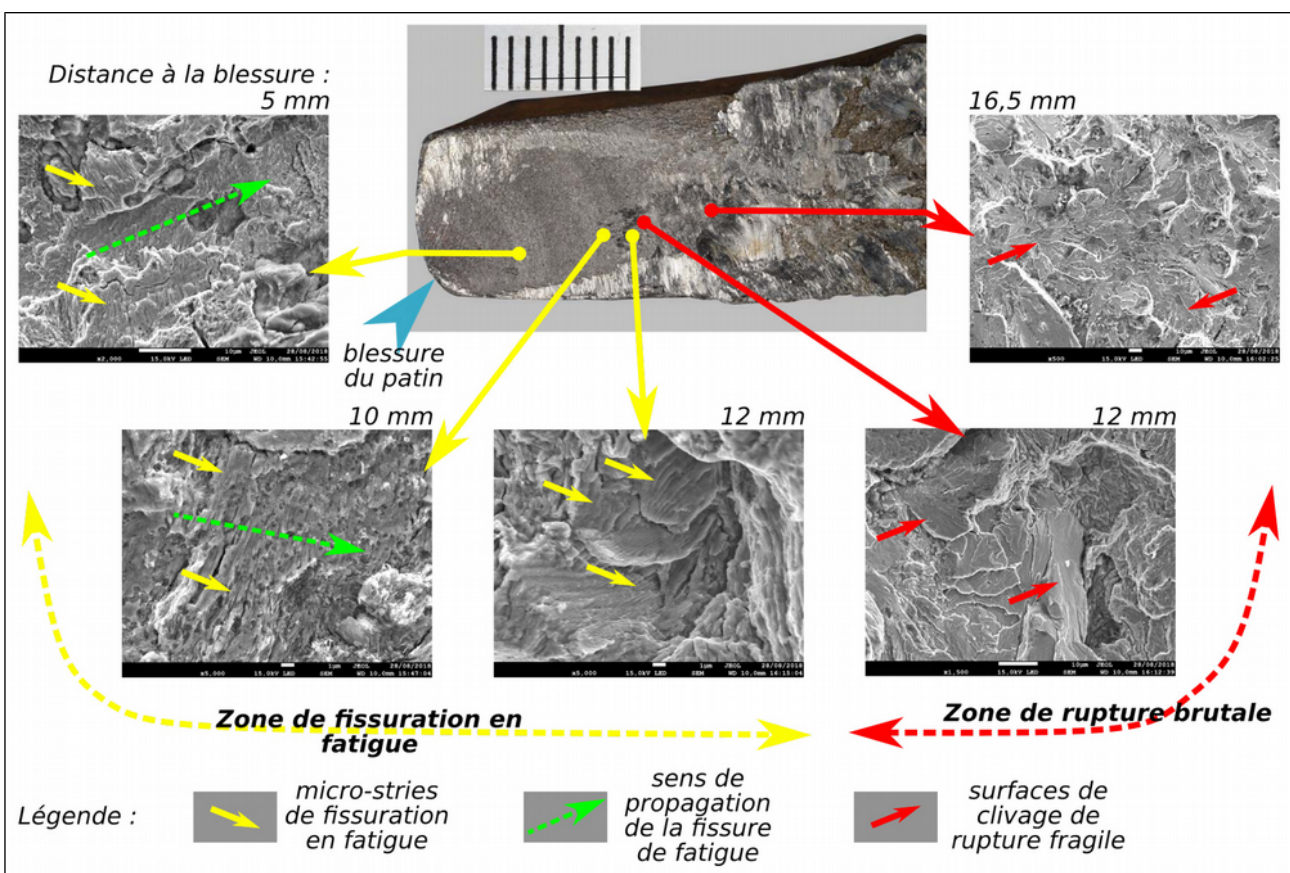


Figure 26 : examen microfractographique de la fissure

3.8.3 - L'examen des marques de choc sur le patin

L'examen du patin (❷) montre que la **blessure** sur l'aile de patin au droit de la rupture, dont nous avons vu que la fissuration de fatigue y avait pris naissance, n'est pas isolée sur la longueur du rail. Elle se reproduit en de nombreux endroits, côté extérieur (repères (1) à (3) en rouge sur la figure ci-après) comme côté intérieur du rail. Pour l'une de ces blessures (repère (1) sur la figure 27), localisée près de l'about, une ouverture d'une fissure dans le creux de la blessure est bien visible. L'examen micrographique révèle que cette seconde fissure est similaire à celle de la section rompue. Elle a toutefois une profondeur de 4 mm, ce qui est moins développé.

Ces multiples blessures, initiatrices de fissures, sont situées au droit des vides entre les traverses. Les blessures sont la conséquence de chocs appliqués en sous-face du patin qui semblent avoir été produits par les bourroirs des engins de bourrage mécanique lorsqu'ils plongent ou réémergent du ballast.

D'autres **encoches** coïncident avec le positionnement des selles d'appui du rail (repères (4) à (6) sur la figure 27). Ces encoches latérales témoignent que la butée latérale du rail s'effectue sur les selles et les tirefonds avec un niveau de contrainte conduisant au fluage de l'acier du rail. Ces encoches sont présentes sur toute la longueur du rail extérieur courbe en portion de voie intermédiaire.

Enfin, deux autres **empreintes** sont visibles sur la face supérieure de l'aile extérieure du patin, de part et d'autre de la section rompue. Elles correspondent à des soudo-brasures de connexions électriques (repère (7) sur la figure 27), la plus proche de la rupture ayant été démontée. L'analyse micrographique ne révèle pas de structure fragilisante du matériau qui aurait pu intervenir dans le processus de rupture du rail dans cette zone.

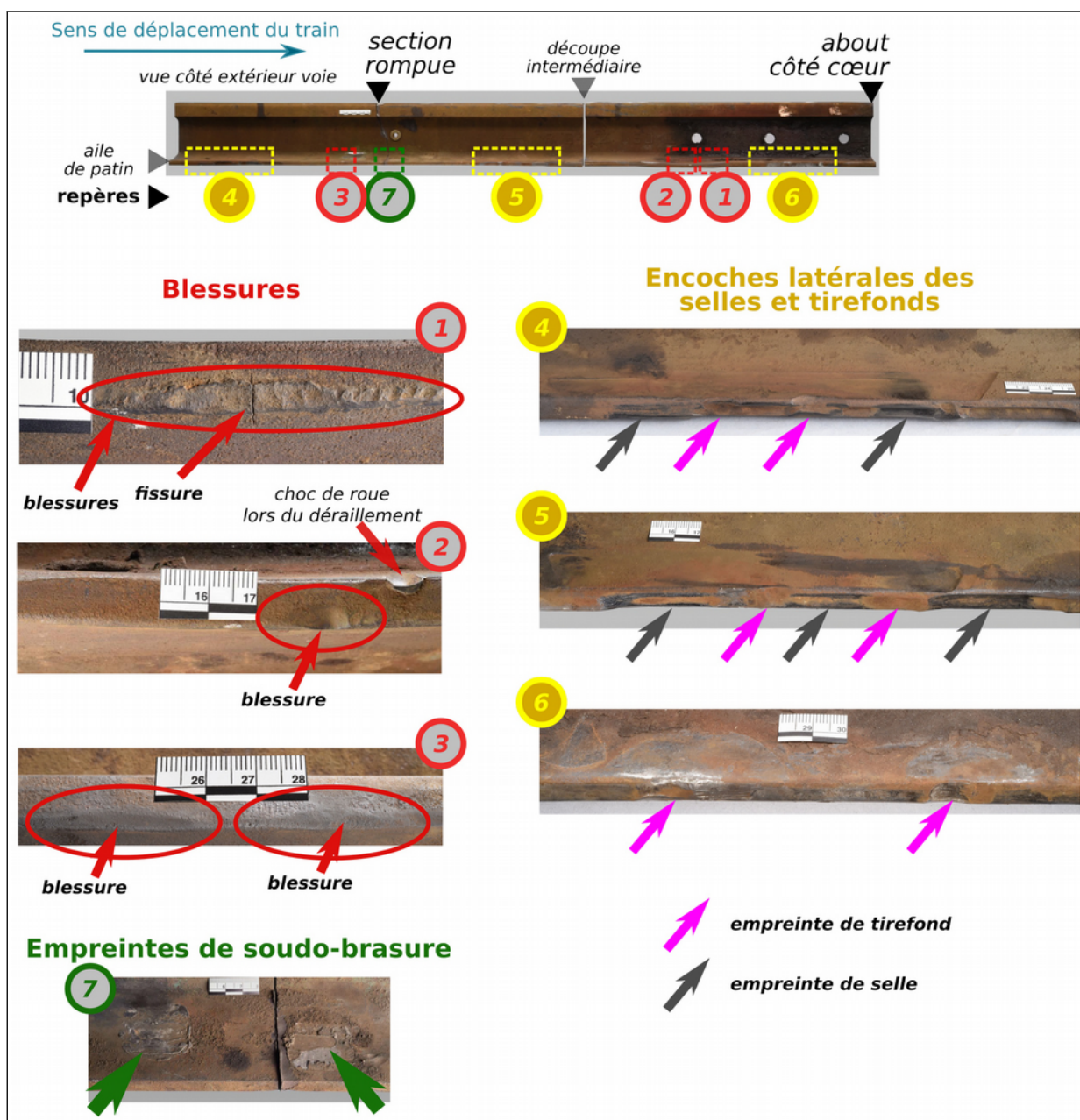


Figure 27 : examen de l'aile extérieure de patin

3.8.4 - L'examen de la surface de roulement

L'examen de la surface de roulement (❸ de la figure 25) montre que l'écaillage, sur le congé de roulement, est visible depuis l'emplacement de la rupture jusqu'à l'about du rail côté cœur situé à 1,15 mètre (voir figure ci-après).

Le référentiel de SNCF Réseau sur la « Codification des défauts de rail », qui classe les défauts identifiables sur le réseau, décrit le défaut d'écaillage de type « shelling » comme pouvant évoluer en une fissuration se propageant dans le cœur du champignon. Cependant, en raison du matage important de la section rompue, ni l'observation visuelle, ni l'analyse au microscope électronique, ne permettent de valider cette hypothèse. Il demeure une incertitude sur l'existence ou non d'une fissuration pénétrante dans le champignon en prolongement du shelling. Une telle fissuration aurait pu amoindrir la résistance de la section déjà affaiblie par la fissuration du patin vue précédemment.

De légères bavures de fluage du métal s'écoulent du congé de roulement (voir l'image du bas sur la figure ci-après). Elles témoignent de l'intensité des efforts transversaux de guidage des roues dans cette zone.

Il peut aussi être observé des impacts de montée de roue sur la surface de roulement. Contrairement aux défauts précédents, ils sont la conséquence du déraillement.

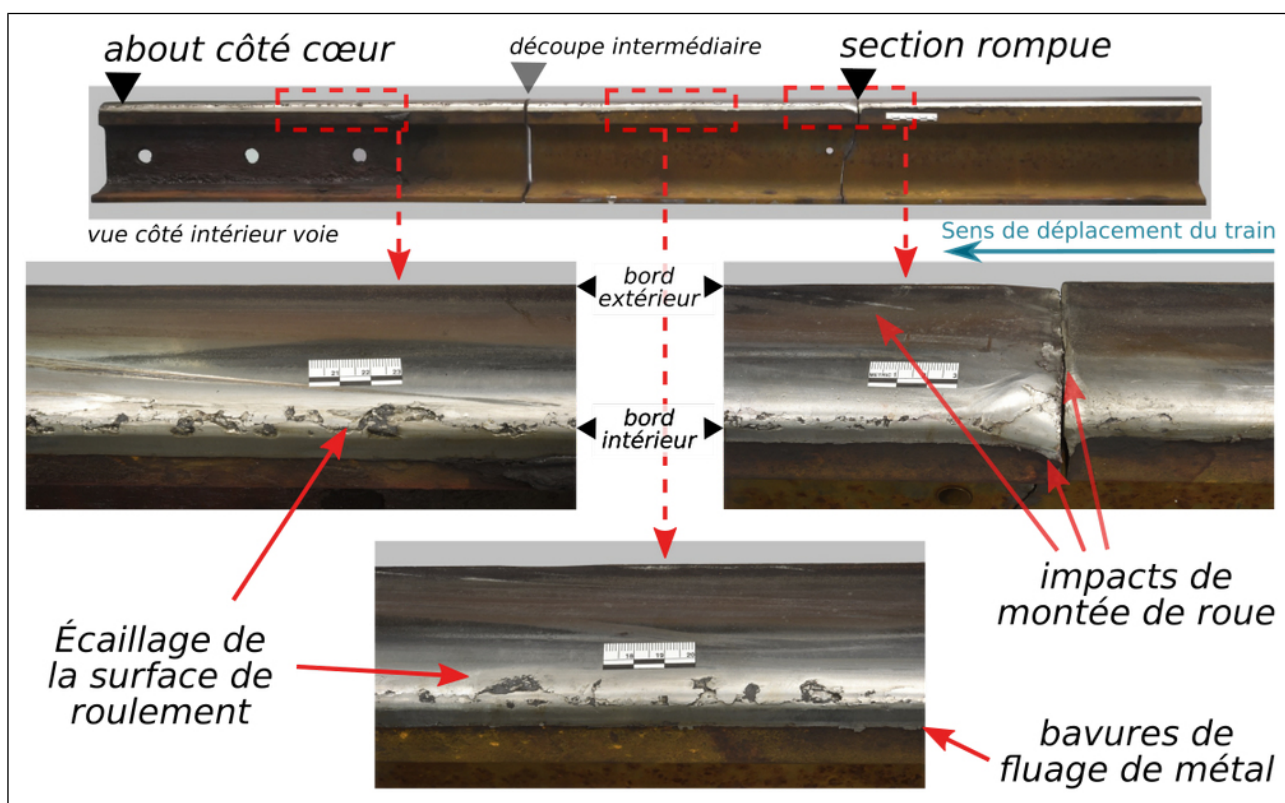


Figure 28 : examen de la surface de roulement

3.8.5 - Constat sur la rupture

En synthèse de l'ensemble de ces analyses sur le rail, le BEA-TT privilégie la thèse d'une rupture brutale du rail sous le passage du train, dans une section fragilisée par une fissuration de fatigue préalable. L'expertise classe le défaut initial, selon l'IN 0285 qui est le référentiel interne de SNCF Réseau pour la codification des défauts de rail, avec le code « 3013 », c'est-à-dire « une blessure provoquée par un contact accidentel au rail ». Selon ce même référentiel, « lorsque les blessures présentent une forme aiguë, elles peuvent être à l'origine de fissures et de rupture par effet d'entaille ».

3.9 - L'analyse du matériel de voie

3.9.1 - L'examen des selles d'appui

Les selles d'appui du rail rompu présentent une dégradation significative (voir figure ci-dessous). Il s'agit d'une usure latérale prononcée, d'une profondeur de 6 mm, sur la butée du côté extérieur à la courbe. L'usure s'est produite avec un repli de matière au niveau des perçages ce qui témoigne d'un fluage du métal dans la durée. L'aspect oxydé de la matière usée confirme la progression lente dans le temps du repli. Plusieurs selles ont cette dégradation.

Ce défaut résulte de la poussée du rail vers l'extérieur de la courbe de l'aiguillage. Elle correspond par symétrie aux encoches observées sur le bord latéral extérieur du patin du rail rompu, décrites dans le paragraphe 3.8.3 (visualisées en jaune sur la figure 27).

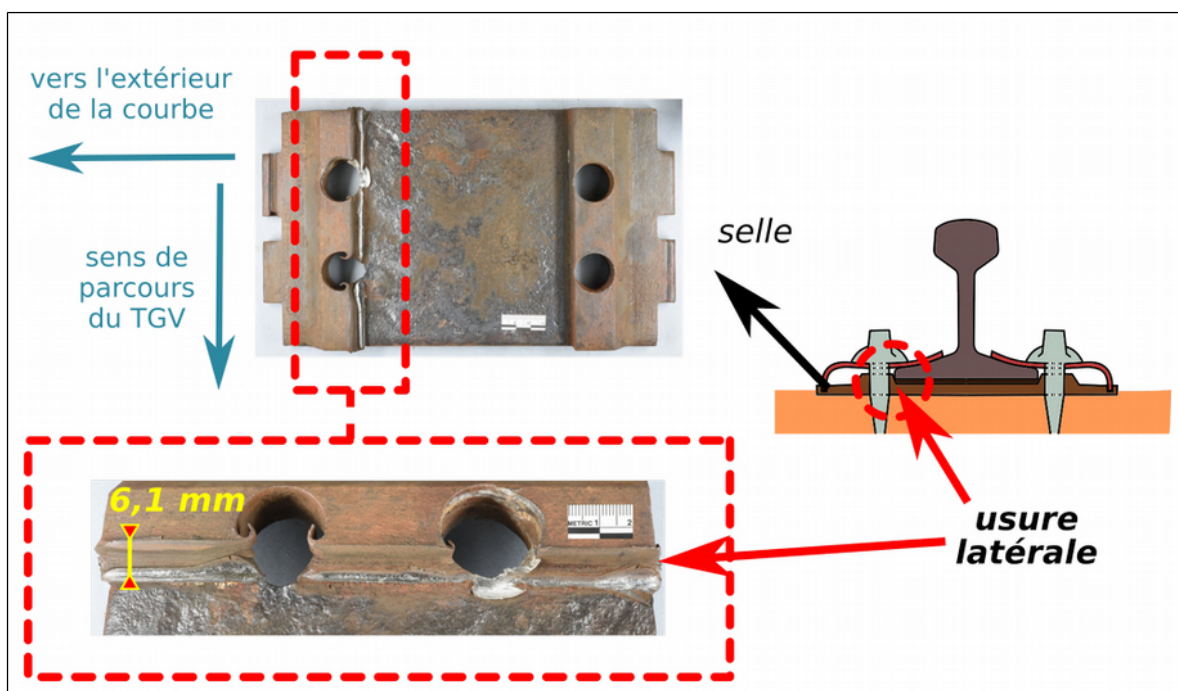


Figure 29 : dégradation des selles d'appui

3.9.2 - L'examen des traverses

Les traverses en bois sur lesquelles reposent les selles présentent une dégradation significative. Les encoches d'encastrement des selles ont un surévidement latéral d'une profondeur de 10 à 15 mm du côté extérieur à la courbe. La matière est évidée dans la même direction que la poussée du rail lors de la déviation des trains. Par endroit, en partie supérieure, le bois se déchiquette par morceau entier.

Cette dégradation confirme la mise en évidence d'un jeu latéral constitué dans le temps de l'ensemble selle plus rail vers l'extérieur de la courbe. Il n'est toutefois pas à exclure que ces dégradations ne proviennent de selles plus anciennes et antérieures de géométrie différentes.

Rappelons aussi qu'après l'accident, il a été retrouvé quatre tirefonds sortis des traverses de part et d'autre de la section de rupture. Le rail étant toujours en place, cela semble indiquer que leur résistance à l'arrachement était atténuée. L'intensité de la sollicitation qui s'exerçait sur eux a rendu leur serrage moins efficace dans le temps.

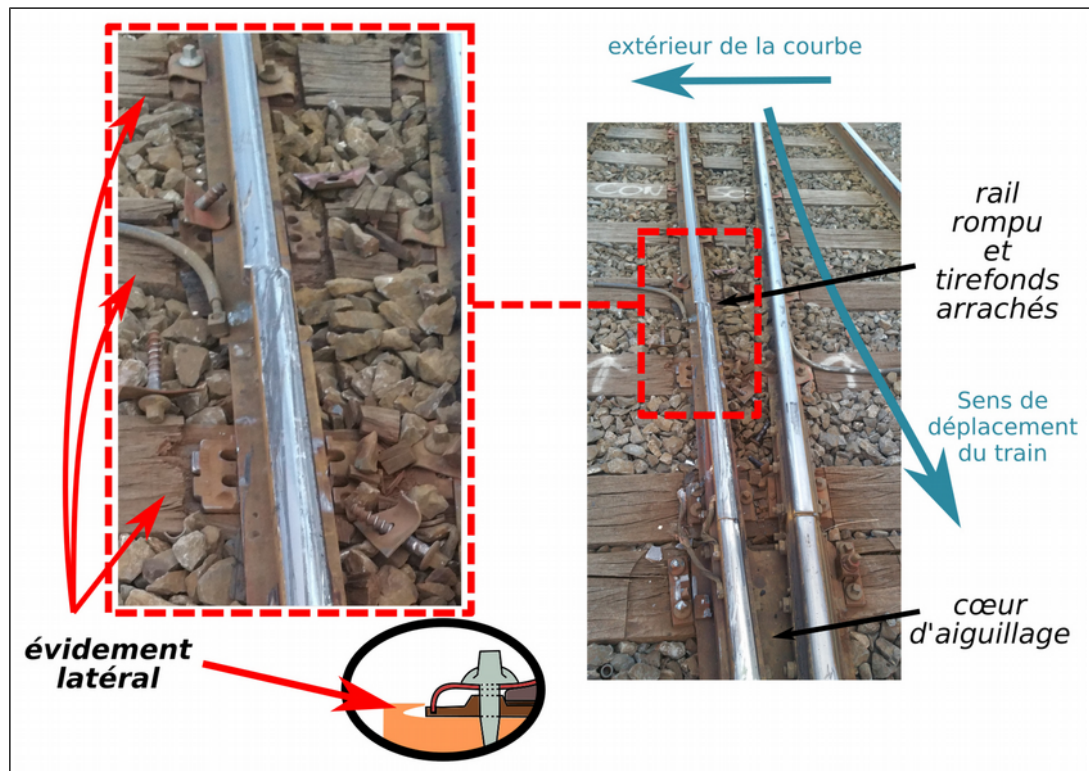


Figure 30 : dégradation des traverses

3.9.3 - L'examen du contre-rail en vis-à-vis

Par construction, un branchement simple possède deux contre-rails disposés en vis-à-vis du cœur sur les files de rail extérieures. Sur le branchement 312a, l'un de ces contre-rails est en vis-à-vis immédiat de la rupture de rail, celle-ci étant très peu distante du cœur.

Il peut être constaté des traces d'usure du contre-rail sur la zone canal en partie centrale, et également sur la pente d'entrée du côté de l'aiguille. Cette usure est marquée bien que le contre-rail soit neuf. A contrario les 80 cm de la pente d'entrée de l'autre côté ne présentent aucune trace. Cette usure indique un frottement de l'intérieur des roues de train au passage du contre-rail. Il témoigne d'un effet de rattrapage de la poussée latérale de bogies vers l'extérieur de la courbe.

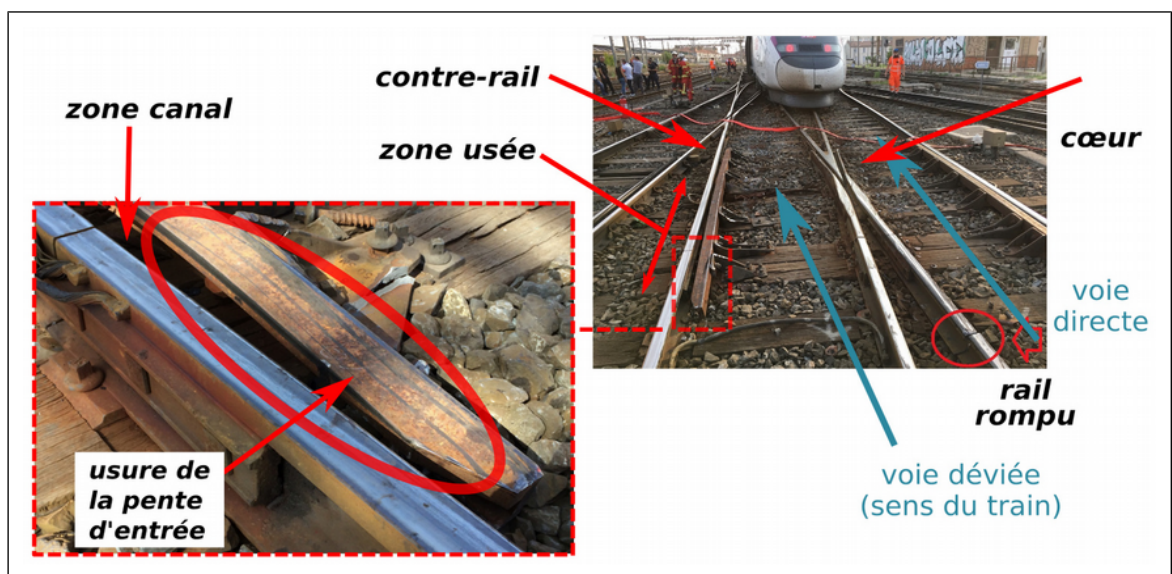


Figure 31 : usure du contre-rail

3.10 - Conclusion sur les causes immédiates du déraillement

L'ensemble des constatations immédiates décrites ci-dessus, sur l'infrastructure et sur le matériel roulant, conduit aux enseignements suivants :

- Il n'y a pas d'indice sur le train permettant de suspecter une cause venant du matériel roulant (par exemple la casse d'un élément, une pièce traînante ou un organe bloqué). Les dégâts au matériel roulant sont des conséquences du déraillement.
- Le **déraillement résulte d'une rupture du rail** située sur la file extérieure de la voie déviée de l'aiguillage 312a, dans la partie de voie intermédiaire. La rupture sous le train a produit un désaffleurement du rail. Celui-ci a favorisé la montée de roue sur le rail et le déraillement des essieux de l'arrière du train.

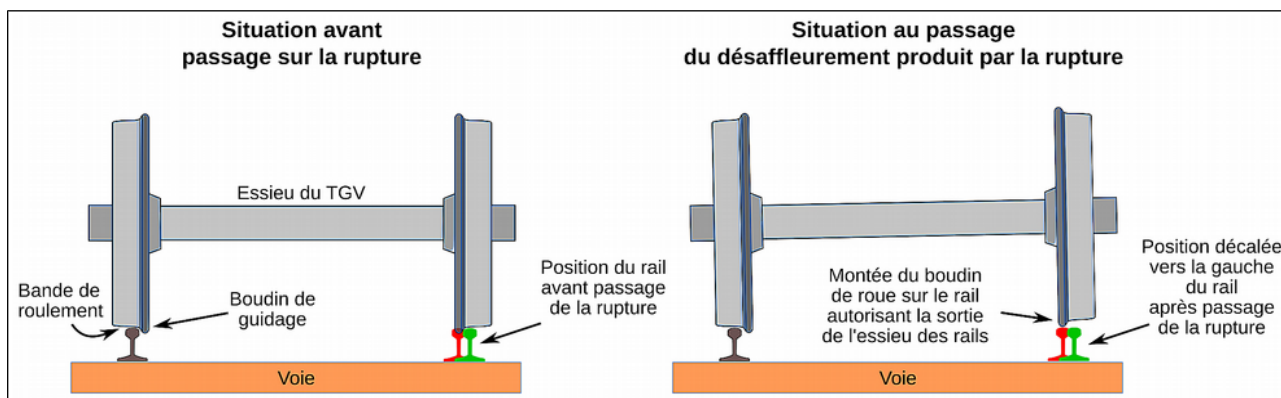


Figure 32 : mise en évidence du déraillement par montée de la roue

- La rupture du rail est de nature brutale due à l'**intensité des efforts appliqués** au rail. Elle est survenue avant le passage du bogie 7 qui est entièrement monté sur le rail.
- La rupture s'est produite dans une **section affaiblie par une fissuration** de fatigue, cette fissuration occupant une portion de patin, et peut-être du champignon aussi. La fissuration n'entamait toutefois pas grandement la résistance nominale du rail.

La fissure du patin a pris naissance dans une blessure de rail résultant vraisemblablement d'un choc lors d'un bourrage mécanique.

- Divers indices d'usure, de déformation et de dégradation, touchant plusieurs éléments du matériel de voie viennent témoigner de l'intensité des efforts appliqués dans la durée au rail par chaque passage de roue. Ces indices sont :
 - le fluage du métal du patin de rail au droit des selles d'appui ;
 - le fluage de la butée des selles d'appui ;
 - le creusement latéral d'encoches dans les traverses ;
 - la mauvaise résistance à l'arrachement des tirefonds encadrant la rupture, résultant d'un excès de sollicitations dans le temps ;
 - le développement de la fissure dans le patin du rail sous la flexion du rail.

L'effort concerné est l'**effort de guidage du train dans la courbe**. Il est la résultante de la force centrifuge s'exerçant sur le train, du couple de rotation du bogie lié à l'action des amortisseurs anti-lacet, de la poussée latérale de la roue guidante liée à l'empattement du bogie, ainsi que de l'effort d'inscription de la rame articulée dans un itinéraire sinueux.

- Les défauts de tenue des selles, des tirefonds et des traverses montrent aussi, au-delà de l'intensité de l'effort appliqué qu'il s'est produit une **mobilité latérale relative du rail**. Cette mobilité est à mettre en relation avec l'usure du contre-rail en vis-à-vis : le contre-rail exerce un rappel d'autant plus important que le bogie se déporte.

- Le rail ayant un maintien latéral dégradé, il se produit une modification et une redistribution des réactions d'appui latérales du rail sur les selles. Les réactions d'appui s'exercent avec un bras de levier augmenté sur le rail. **La flexion du rail est majorée** (voir la représentation schématique sur la figure ci-dessous).

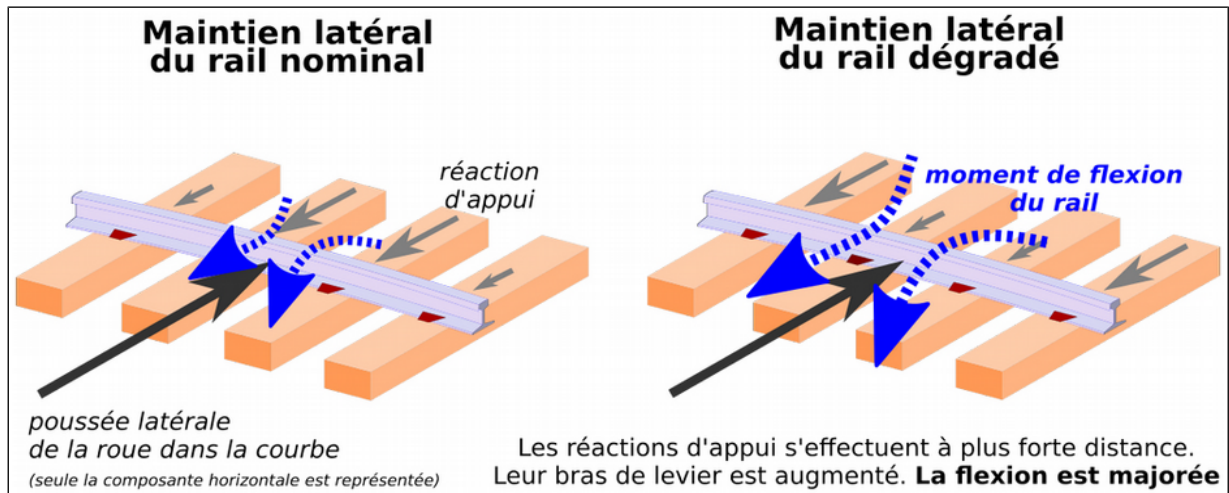


Figure 33 : mise en évidence de la majoration de la flexion du rail

Il apparaît donc que **trois facteurs** peuvent avoir contribué à la rupture du rail. Ces facteurs sont par ordre décroissant d'importance :

- **l'intensité des efforts de guidage** des roues qui s'exerce dans la forte courbe ;
- une certaine **mobilité latérale du rail** qui majore la flexion du rail. Cette mobilité est le résultat d'une perte d'efficacité du système d'attache qui provient de l'apparition d'un jeu entre le rail et les selles par fluage du métal, et, d'une diminution du serrage des tirefonds ;
- l'affaiblissement de la résistance du rail en raison d'une **fissuration**.

C'est une combinaison de ces facteurs qui a conduit à la rupture.

Afin de mieux cerner pourquoi ces facteurs ont conduit à la rupture, nous avons poursuivi nos investigations dans deux directions :

- d'une part, en recherchant une évaluation du niveau d'intensité des efforts auxquels est soumis le rail ;
- d'autre part, en analysant la manière dont les opérations de maintenance ont traité les signaux de dégradation préalable observés lors de l'analyse de la rupture.

4 - Les investigations sur les causes de la rupture du rail

4.1 - La fréquentation de l'aiguillage 312a

Pour évaluer l'intensité d'utilisation de l'aiguillage 312a, nous avons dénombré les trains ayant circulé avant le déraillement en entrée et sortie de gare, par itinéraire et par aiguille.

Le comptage a concerné les neuf mois précédant le déraillement. La période d'avril à juin, perturbée par des mouvements sociaux, a été neutralisée. Chaque passage sur aiguille a été compté en distinguant la position de l'aiguille, directe ou déviée, ainsi que le sens de circulation du train, en talon (vers la convergence) ou en pointe (vers la divergence). Seuls les passages sur les branchements simples ont été exploités, les traversées jonction double n'ayant, par conception, pas de partie de voie intermédiaire qui est la zone identifiée comme sensible dans les causes du déraillement.

Les résultats sont synthétisés sur la figure ci-dessous qui donne les numéros des aiguillages les plus sollicités en position déviée, par ordre décroissant d'utilisation, en cumul des passages en pointe et en talon. Un passage en déviation en pointe (en rouge) correspond à la situation d'utilisation de l'aiguillage 312a par le TGV 6145.

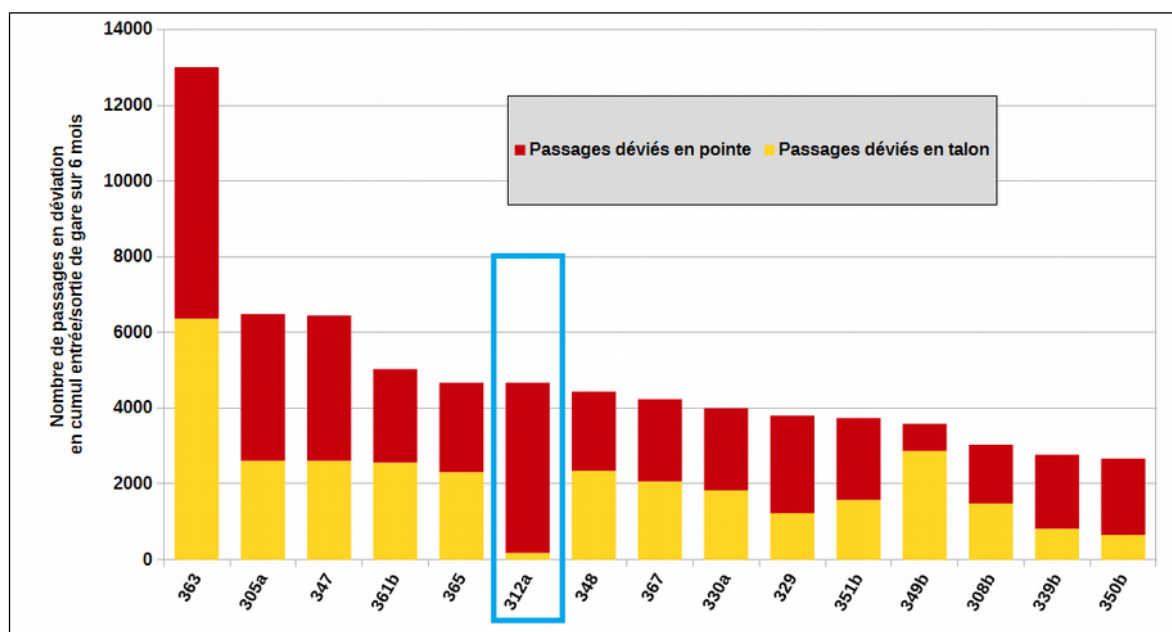


Figure 34 : classement des 15 aiguillages les plus utilisés

L'aiguillage le plus fréquenté de la gare, avec 13 011 passages en déviation, est le **363**. L'aiguillage **312a** arrive en 6^e position pour sa fréquentation globale, et en 2^e position pour les passages en déviation en pointe avec 4 497 passages.

Le tableau ci-après décrit, pour les aiguillages les plus sollicités qui sont tous de tangente 0,13, les caractéristiques des circulations les empruntant dans l'exploitation de la gare.

Branchement simple	Fonction	Caractéristique des circulations
363	Accès aux quais K à N,	TER ; tonnage et nombre d'essieux faible.
305a	Accès aux quais A et I, pour l'arrivée par les voies C et D circulation.	TGV et TER ; tonnage et nombre d'essieux fort. Équilibre entre prise en pointe et en talon.
347	Accès aux quais courts 3, 5 et A.	TER ; tonnage et nombre d'essieux faible.
361b	Aiguillage en sortie du quai 5.	TER ; tonnage et nombre d'essieux faible.
365	Dans la continuité du 363 pour l'accès aux voies L à N	TER ; tonnage et nombre d'essieux faible.
312a	Accès aux quais A à I, pour l'arrivée par la voie D circulation.	TGV et TER ; tonnage et nombre d'essieux fort. Pris en pointe en entrée de gare.

Les TGV ont de nombreux essieux par rame (26 sur une unité simple et 52 sur une unité multiple). Ils ont également des bogies à empattement large de 3 mètres s'inscrivant peu facilement dans les aiguillages très courbes. Ce sont des circulations très agressives. Les TER ont moins de tonnage et un empattement de bogie plus faible (1,80 mètre). Ce sont des circulations moins agressives.

Lorsque l'on couple le nombre de passages vu dans la figure précédente et l'agressivité des circulations donnée dans le tableau ci-dessus, il apparaît que l'aiguillage 312a connaît un degré de sollicitation (fréquentation x agressivité) qui est le plus élevé parmi tous les branchements simples de la gare. Il est suivi de l'aiguillage 305a, qui lui est voisin dans le plan de voie.

Nous pouvons donc affirmer que l'aiguillage 312a a une intensité d'utilisation, en déviation en pointe, la plus élevée de tous les branchements simples de la gare.

4.2 - L'évaluation numérique des efforts sur le rail de déviation

À la suite de ce déraillement, la division « Interaction Véhicule Voie » de l'ingénierie de SNCF Réseau a effectué une simulation numérique de l'arrivée du TGV 6145 en gare. L'objectif était d'étudier l'inscription du convoi ferroviaire dans le tracé et d'évaluer les efforts transversaux, en particulier au niveau du rail intermédiaire, générés par les caractéristiques du tracé.

La simulation a mis en œuvre un modèle multi-corps, voie et matériel roulant, au moyen du logiciel de simulation dynamique « Vampire pro ». La sensibilité du modèle à divers paramètres, tels que les défauts de géométrie ou le graissage du rail, a été vérifiée afin de retenir les valeurs les plus pertinentes.

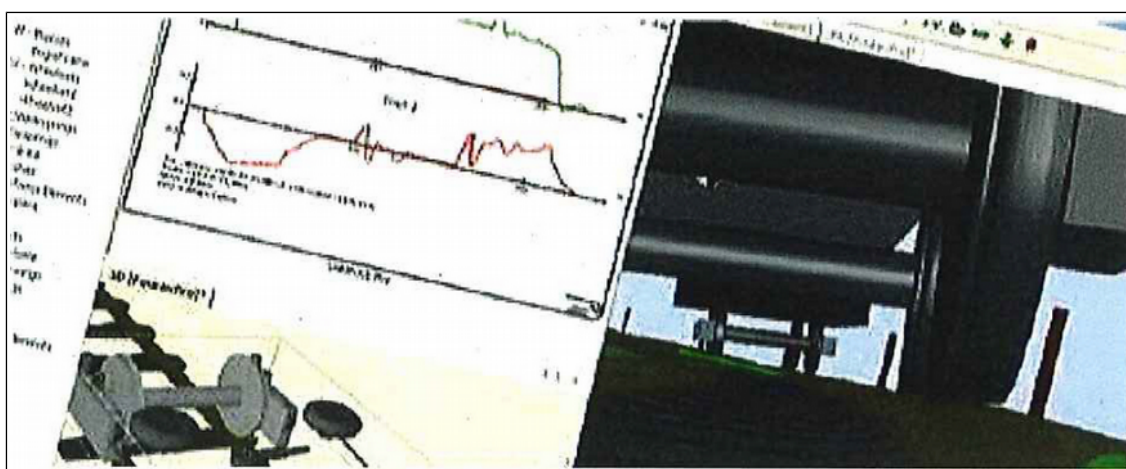


Figure 35 : illustration du logiciel Vampire pro

La figure ci-après représente une extraction des résultats du calcul fournissant l'effort transversal Y (à gauche), et l'effort vertical Q de contact roue/rail (à droite), au passage du TGV.

Le maximum d'effort transversal se produit au passage du premier essieu du TGV. La valeur de l'effort est donné en fonction de la distance de parcours (delta x) sur le tracé en « S » qui comprend une première courbe avec le branchement simple 312a (BS sur la figure) et une contre-courbe avec la traversée jonction double 319c/312d (TJ sur la figure). Pour rappel, l'itinéraire emprunté par le TGV est donné en figure 9.

Un premier pic d'effort transversal sur le rail (graphique de gauche) se produit dès l'aiguille de déviation à l'entrée du branchement 312a, sur la roue droite (RD sur la figure). Cet effort se maintient quasiment avec la même intensité sur la partie intermédiaire où la courbe est forte. C'est l'endroit de la rupture du rail. Sur toute cette portion l'effort vertical est également maximal sur la roue droite par effet de l'effort de guidage vers la droite.

Puis le contre-rail du branchement 312a (premier pic en vert) joue un effet de rappel, l'effort transversal se déporte sur la roue gauche (RG sur la figure). Pour la traversée jonction double 319c/312d, l'effort horizontal maximum est obtenu en fin de celle-ci sur la roue gauche, avec, comme pour le branchement mais en inversé, un effet de rappel sur la roue droite au passage du dernier contre-rail. L'effort vertical devient maximal sur la roue gauche par effet de contre-guidage vers la gauche dans la courbe inversée.

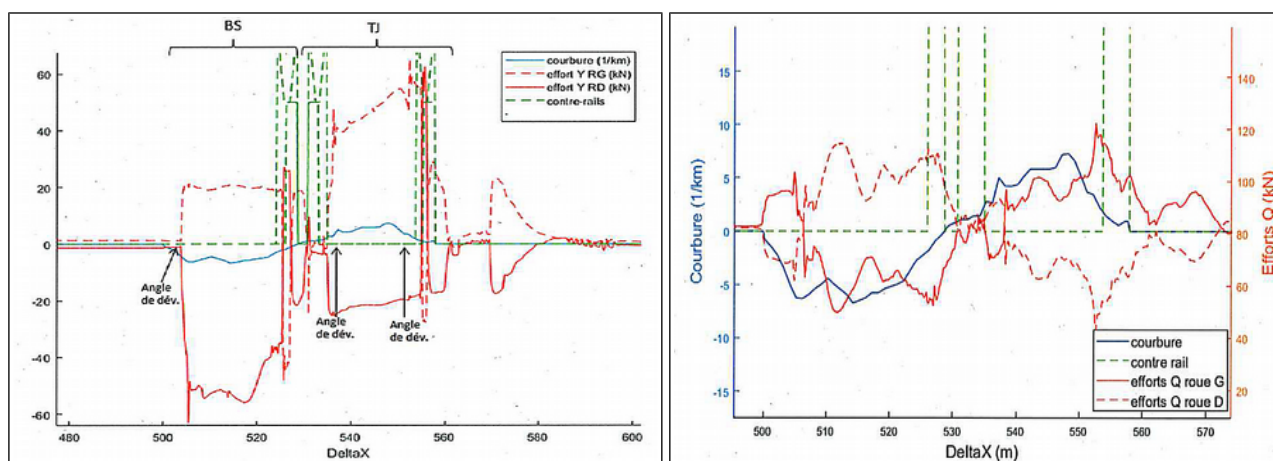


Figure 36 : effort transversal Y et vertical Q de contact roue/rail

Le tableau ci-dessous récapitule les valeurs données par le résultat de la simulation. Les valeurs « avec défauts » correspondent à une enveloppe de résultats de calcul en corrigeant les paramètres de base de défauts éventuels.

		Effort horizontal $Y_{\max}$ en kN	Effort vertical $Q_{\max}$ en kN	Combinaison ($ Y + 0,5 Q$) $_{\max}$
Seuils indicatifs donnés par la norme (fiche UIC 518)		100	200	150
BS 312a	sans défaut	63	105	114.3
	avec défauts	68.8	115.7	118.3
TJ 319c/312d	sans défaut	65.2	109.4	119.8
	avec défauts	99.1	123.1	160.5

Ces résultats sont ceux d'une simulation et ils doivent être analysés avec tout le recul nécessaire propre aux nombreuses approximations de calcul. Nous observons néanmoins que, en ordre de grandeur, les efforts de contact roue/rail sont élevés, notamment dans la

partie courante du branchement 312a. La sollicitation la plus forte est obtenue en sortie de traversée jonction double, où elle dépasse même certains seuils indicatifs. La traversée n'est toutefois empruntée en voie déviée à la suite du branchement 312a que pour la seule entrée des trains vers le quai I. La traversée ne comporte pas non plus, par construction, de partie de voie intermédiaire mais un double cœur.

Nous confirmons donc en conclusion de ces deux parties que l'aiguillage 312a, et plus particulièrement la zone de voie intermédiaire du 312a, connaît un niveau de sollicitation très important dans le plan de voie de la gare, tant en termes de fréquentation que d'intensité d'effort.

4.3 - Généralités sur la maintenance des appareils de voie

Afin de comprendre les effets, dans le temps, des intenses sollicitations qui s'exercent sur l'aiguillage 312a telles que nous venons de les voir, nous avons examiné les données de la maintenance de l'aiguillage. En préalable, nous rappelons dans ce chapitre quelques généralités sur l'organisation de la maintenance par SNCF Réseau

Sur le réseau ferroviaire national, la maintenance des appareils de voie sur les lignes classiques (ainsi que sur les lignes à grande vitesse) est organisée selon une structure définie dans un référentiel interne de SNCF Réseau numéroté **IN 2951** : « *Organisation de la maintenance des appareils de voie sur voies principales des Lignes Classiques et des Lignes à Grande Vitesse* ». La dernière version est datée du 21 novembre 2008.

Le principe développé est celui d'une maintenance de type préventif dont l'objectif est de se prémunir de toute défaillance qui pourrait compromettre la sécurité et la régularité des circulations. La maintenance s'articule autour de plusieurs cycles d'opérations, donnés ci-dessous par ordre décroissant de périodicité :

- la **surveillance systématique** : il s'agit de tournées réalisées à pied ou par engin, et d'opérations de contrôle spécifiques aux appareils de voie, sur leurs cotes et sur les constituants, appelées les « **vérifications** » ;
- les travaux d'entretien appelés aussi **interventions programmées** ;

(Les deux opérations ci-dessus sont qualifiées de **maintenance préventive**)

- la **maintenance corrective**, à savoir le remplacement partiel des constituants évalués comme défectueux lors de la surveillance systématique ;
- et à périodicité très longue, la **régénération**, c'est-à-dire le renouvellement de l'appareil en totalité ou par constituant selon leurs échéances de validité.

Nous revenons ci-après plus en détail sur chacune de ces opérations.

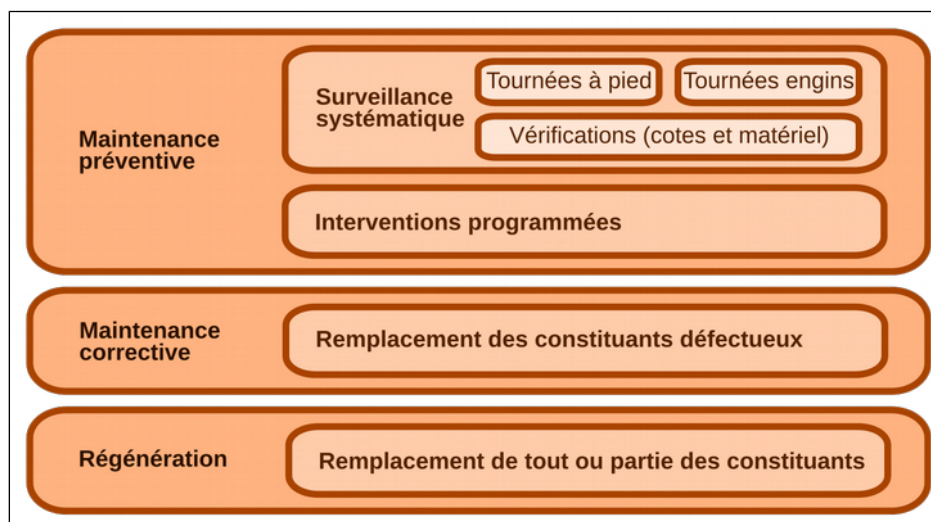


Figure 37 : schéma d'organisation de la maintenance des appareils de voie

4.3.1 - La surveillance systématique

Les **tournées de voie « à pied »** ont pour but de garantir qu'aucune défaillance n'interviendra entre deux vérifications ou interventions programmées. Si la périodicité pour la voie courante est comprise entre 4 et 10 semaines selon le niveau de trafic et l'armement, la périodicité pour les appareils de voie est de moitié moindre. Dans le cas du branchement simple 312a, la fréquence des tournées est de deux semaines. Ces tournées incluent des contrôles spécifiques à la saison chaude et à la saison froide, dans les détails desquels nous n'entrerons pas. Une tournée annuelle, dite « rail », est aussi spécifiquement organisée pour l'examen attentif des rails.

La **surveillance par engin** se rapporte à deux types de contrôle effectués sur la voie par des engins. Il s'agit d'une part du contrôle de la géométrie (écartement, nivellement, dressage) par un véhicule de type Mauzin, et d'autre part, de la détection de la fissuration des rails par un appareil à capteur ultrasonore. La périodicité est annuelle.

Les **vérifications** consistent à rechercher des indices sur le matériel et à mesurer des cotes pour contrôler l'état de l'appareil. L'**IN 0287**, référentiel sur l'« *Entretien des appareils de voie* », décrit plus précisément les vérifications à effectuer et fournit les modèles de « fiche de vérification » à renseigner. La dernière version du référentiel est datée du 23 mars 2011. 67 types de vérification à effectuer sont détaillés et 17 modèles de fiche sont fournis. Le référentiel couvre une certaine variété d'appareils et toutes les opérations décrites ne concernent pas tous les types d'appareil.

L'annexe 2 donne un exemple de fiche de vérification, telle qu'elle a été renseignée sur le branchement simple 312a en gare de Marseille Saint-Charles lors de la dernière vérification en juin 2018.

Il y a des vérifications saisonnières qui ont une périodicité fixe. Celle-ci ne dépend ni du type d'appareil, ni du volume de trafic. Les vérifications réalisées chaque année avant les premières chaleurs sont ainsi appelées la « revue de conformité ».

Il y a des vérifications périodiques dont la périodicité est adaptée à l'utilisation de l'appareil. On distingue deux catégories de vérifications périodiques :

- Les vérifications dites de « **Famille A** » concernent les éléments les plus critiques pour la sécurité.

Elles comprennent par exemple : les cotes de libre passage des essieux sur le cœur, l'état des coussinets de manœuvre des aiguilles, l'usure des aiguilles, l'usure et le calage des contre-rails, l'auscultation au marteau des abouts de cœur...

La périodicité de ces vérifications varie de 1 à 3 ans selon l'appareil. Elle est de un an pour l'aiguillage 312a.

- Les vérifications dites de « **Famille B** » portent sur les éléments ayant un impact sur la conservation de l'appareil de voie et sur la qualité de la marche des trains.

Elles comprennent par exemple : l'état du ballast, l'état des supports, l'efficacité des attaches, les joints, le menu matériel...

La périodicité de ces vérifications varie de 3 à 10 ans selon l'appareil. Les vérifications sont cependant étalées sur une durée de deux ans. Pour l'aiguillage 312a, la périodicité de ces vérifications de « Famille B » est de trois ans.

4.3.2 - Les interventions programmées

Les interventions programmées comprennent :

- des petits travaux systématiques comme le graissage et le dégagement des organes mobiles ;
- des travaux conditionnels pour régler des anomalies découvertes lors des diverses vérifications et tournées. Il s'agit par exemple du remplacement d'un fer.

Pour les interventions concernant les constats de la « Famille B », leur déclenchement tient compte de l'échéance de renouvellement de l'appareil comme nous le verrons au paragraphe ci-après.

4.3.3 - La régénération

La **régénération** d'un appareil de voie peut être réalisée suivant deux méthodes qui différencient deux catégories d'appareil :

- soit l'appareil fait l'objet d'un renouvellement complet au terme de la durée de vie du ballast et du plancher. Ces appareils sont dits « à avenir de renouvellement » ;
- soit l'appareil fait l'objet du remplacement constituant par constituant en fonction de leur usure à leur échéance propre. Ces appareils sont dits « sans avenir de renouvellement ».

La programmation des renouvellements est précisée lors d'expertises appelées « tournées de validation » qui sont effectuées par les spécialistes de la direction centrale du gestionnaire d'infrastructure. Ces expertises se basent sur un examen de l'état réel des appareils, sur les perspectives d'évolution du trafic et sur les éventuels projets de modification des plans de voies.

Le branchement simple 312a était classé « appareil à avenir de renouvellement ».

4.4 - La maintenance de l'aiguillage 312a

4.4.1 - Le schéma de maintenance

Le branchement simple 312a a été posé en **1986**.

Sa maintenance est organisée dans le cadre des « appareils à avenir de renouvellement ».

Le tableau ci-dessous reprend l'ensemble des opérations effectuées dans le cadre du schéma de maintenance, avec leur dernière date de réalisation. Au moment de l'accident, le 24 août 2018, toutes les tournées et vérifications prévues par le référentiel étaient réalisées. Les interventions de maintenance corrective avaient aussi été réalisées dans les délais prescrits.

Opération	Échéance	Dernière date
Tournée de surveillance	Toutes les 2 semaines	17 August 2018
Relevé « Mauzin »	annuel	16 Jan 2018
Tournée Ultrasons	annuelle	25 Jul 2017
Tournée « rail »	annuelle (± 120 jours)	2 May 2017
Vérification de famille A	annuelle	Jun 2018
Vérification de famille B	Tous les 3 ans, sur 2 ans	Jul 2016
Tournée de validation		Oct 2017

La dernière expertise nationale, ou « tournée de validation », menée en octobre 2017 sur le périmètre de la gare de Marseille Saint-Charles, a arbitré le remplacement complet de l'appareil 312a pour 2023. L'appareil a fait l'objet du commentaire suivant de la part du valideur : « *Plancher exotique. Le fer est très abimé. Il y a 14 bois à remplacer dans les 5 ans. L'appareil est dans une zone boueuse* ».

« *Fer très abimé* » désigne en général la présence d'ébréchures sur les demi-ferrures (aiguilles et contre-aiguilles) et/ou de défauts de surface du cœur. Dans le cas présent, il ne faut pas exclure que cela porte sur les défauts de « shelling » observables sur la table de roulement en partie intermédiaire.

Nous reprenons ci-après les constats issus de l'analyse de l'ensemble des comptes rendus de maintenance, concernant le branchement 312a.

4.4.2 - Les constats sur le rail rompu en zone de voie intermédiaire

L'analyse des bases de données DEFRAIL (défauts dans les rails) et DEFCOEUR (défauts dans les cœurs) montre l'existence des défauts de « shelling » repérés en tournée, mais pas de défaut avec nécessité de correction dans le fer de l'appareil.

La dernière tournée « Ultrasons », réalisée le 25 juillet 2017, ne mentionne aucun défaut du rail. Il faut noter toutefois que la détection par ultrasons repère avant tout les défauts de fissuration dans le champignon et non dans le patin tel que constaté après l'accident.

L'analyse du dernier enregistrement de la géométrie, réalisé la nuit du 15 au 16 janvier 2018, ne donne aucun dépassement de seuil obligeant à des mesures de restriction d'exploitation ou à une intervention de correction.

Un examen attentif de cet enregistrement par un expert peut montrer l'existence d'un phénomène de chariotage⁸ de 3 à 7 mm en charge au droit de la zone de rupture. L'écartement passe localement à 1,461 m, soit juste au-dessus de 1,460 m qui est la « valeur d'intervention » pour une valeur nominale de 1,445 m dans la courbe de l'aiguillage. Toutefois ce point, très pointu et constaté en expertise a posteriori de l'accident, n'a pas été relevé par l'analyse de l'enregistrement en condition usuelle par l'Infrapôle. Il n'a pas donné lieu à intervention.

Le relevé de flèche du tracé de la voie déviée montre également une diminution du rayon théorique de la déviation à 174 m au lieu de la valeur théorique de construction de 190 m. Ce défaut est assimilable à un défaut de dressage⁹ de 8 mm. Les normes de géométrie ne classent pas, à une vitesse de 30 km/h, cette valeur en « valeur d'alerte » imposant une intervention à moyen terme, même si la « valeur objectif » prescrit un défaut inférieur ou égal à 5 mm.

Ces défauts creusent la courbe de déviation de l'aiguillage et contribuent à l'augmentation de l'effort de poussée centrifuge dans la courbe. Ils n'ont pas été détectés comme critique dans une exploitation usuelle des relevés.

4.4.3 - Les constats sur les selles et le plancher

Les comptes rendus de tournées et les vérifications de « Famille B » ne mentionnent aucune attache inefficace sur le rail courbe extérieur en partie intermédiaire de l'aiguillage. Il n'y a pas de remarques concernant les selles qui ne font pas l'objet d'un relevé de cote.

La seule observation, que nous avons déjà mentionnée, est que la dernière tournée de validation, d'octobre 2017, précisait que 14 bois étaient à remplacer à moyen terme.

8 Le chariotage désigne, en dynamique ferroviaire, le mouvement d'oscillation latérale des essieux entre les rails qui induisent une oscillation de rotation des bogies. Par extension, il désigne aussi le mouvement d'oscillation latérale de la voie ou d'un rail, imparfaitement calés, induit par le passage des circulations.

9 Le dressage désigne la déformation de la voie résultant d'un ripage localisé dans le sens transversal.

4.4.4 - Les constats sur le contre-rail gauche

L'épaisseur d'un contre-rail est de 80 mm. En cas d'usure, elle ne doit pas être inférieure à 70 mm. Pour compenser l'usure du contre-rail, des cales sont interposées entre le contre-rail et son support de manière à maintenir la distance efficace entre le contre-rail et le cœur (voir figure suivante). L'épaisseur totale de cales entre le contre-rail et son support ne doit pas dépasser 9 mm. Pour fiabiliser l'assemblage, le nombre de cales est limité à 3 cales au maximum.

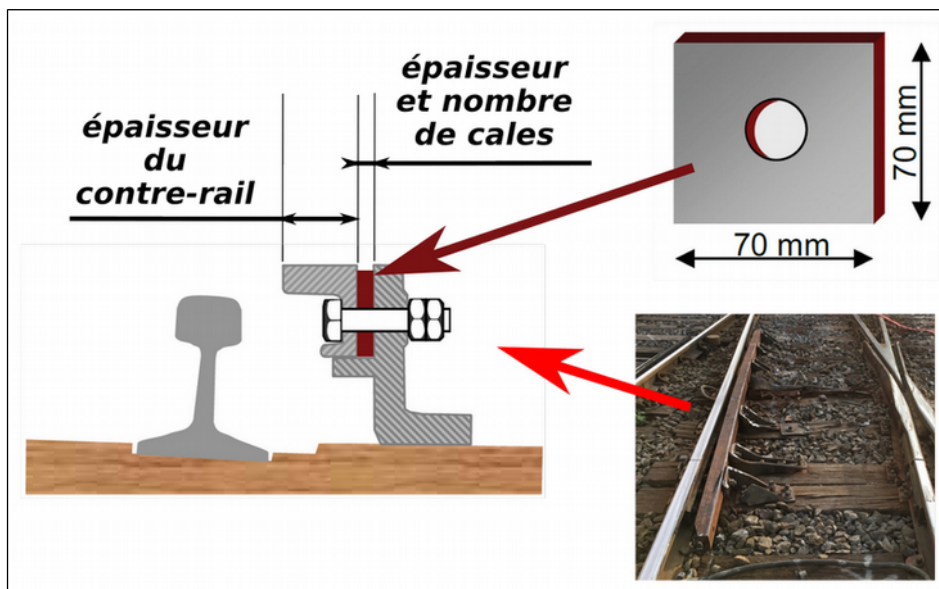


Figure 38 : cotes du contre-rail à mesurer en vérification de « Famille A »

Les tournées « à pied » mentionnent toutes le caractère « usé » du contre-rail depuis 2017, avec la précision d'un délai de réparation classé « urgence 1 », c'est-à-dire prioritaire.

Les fiches de vérification « Famille A » concernant l'épaisseur du contre-rail gauche et le calage compensatoire mis en place donnent, au fil du temps, les valeurs de contrôle reportées dans le tableau ci-après.

Pour mémoire, les valeurs de la dernière vérification « Famille A » de juin 2018 sont données dans la fiche reproduite en annexe 2, à la rubrique « protection de pointe – épaisseur et calage de contre-rail », en haut à gauche de la fiche.

Nous observons dans le tableau quelques non-respects des valeurs limites (précisées en bas dans le tableau) portés en caractères rouges.

Le contre-rail avait été remplacé en raison de son usure le 15 septembre 2014.

Puis il a à nouveau été remplacé le 21 juin 2018, soit quatre ans après et 71 jours avant l'accident. L'observation du nouveau contre-rail suite à l'accident montrait déjà des traces d'usure de la zone canal et de la pente d'entrée comme nous l'avons vu (voir figure 31). Le contre-rail déposé le 14 juin 2018, encore présent à proximité du branchement 312a sur le site de l'accident, présentait la même nature d'usure.

Date de vérification « Famille A »	Épaisseur du contre-rail gauche (80 mm si neuf)	Valeur de calage	Nombre de cale	Commentaire
15 Sep 2014	69 mm	12 mm	3	Remplacement du contre-rail le 15 septembre 2014
30 Jul 2015	77 mm	3 mm	1	
24 Jun 2016	75 mm	7,5 mm	2	
12 May 2017	72 mm	12 mm	3	
7 Jun 2018	70 mm	12 mm	3	Remplacement du contre-rail le 14 juin 2018
Valeurs limites	70 mm	10 mm	3	

Il apparaît que le mainteneur a globalement cherché à respecter les valeurs limites en corrigeant et en remplaçant le rail dès que les valeurs limites étaient atteintes. Il ne s'est en revanche pas questionné sur les raisons d'une évolution rapide de l'usure.

4.5 - Le suivi des « évolutions rapides » sur appareil de voie

4.5.1 - Le retour d'expérience

Le 12 juillet 2013, un dramatique accident, au bilan humain très lourd, s'est produit en gare de **Brétigny-sur-Orge**. Le train Intercités assurant la liaison Paris – Limoges, déraillait sur un appareil de voie de type traversée jonction double (TJD). L'enquête du BEA-TT a pu établir que le déraillement a été provoqué par l'obstruction du passage de roue dans le cœur par une éclisse raccordant le cœur à l'aiguille de l'appareil. L'éclisse avait progressivement perdu une partie des boulons la fixant au rail. Divers facteurs contributifs ont été mis en avant qui concernaient les opérations de surveillance, la formation et le contrôle des personnels ainsi que le vieillissement général du réseau ferroviaire.

Dans son rapport d'enquête, le BEA-TT a émis six recommandations. La troisième recommandation portait sur la possibilité d'adapter le schéma de maintenance issu d'un modèle général, dans le cas d'appareil nécessitant des soins particuliers. La recommandation se formulait ainsi :

« Recommandation R3 adressée à SNCF Réseau :

Identifier les appareils de voie ou les groupes d'appareils présentant des particularités impliquant une maintenance renforcée ou une régénération anticipée par rapport aux prescriptions générales.

Prévoir dans l'organisation générale de la maintenance ou dans celle des établissements, les dispositions assurant que ces particularités sont prises en compte de façon fiable et auditable. »

Dans sa réponse du 15 décembre 2015¹⁰, SNCF s'est engagée à préciser un processus de maintenance « *permettant de formaliser localement une analyse périodique visant à adapter régulièrement et de manière explicite, l'entretien à réaliser, en regard de l'évolution du patrimoine et de ses sollicitations* ».

Ce processus a été décrit dans une lettre directive interne de SNCF Réseau du 15 juin 2016.

¹⁰ Le rapport d'enquête du BEA-TT de septembre 2015 incluant les recommandations du BEA-TT ainsi que les réponses, effectuées par les destinataires, à ces recommandations, sont consultables sur le site Internet www.bea-tt.developpement-durable.gouv.fr

Le principe est que plusieurs domaines critiques d'un aiguillage sont identifiés comme susceptibles d'évoluer rapidement. Ces domaines sont la géométrie, la boulonnerie et les attaches, les « cotes de sauvegarde » ainsi que le « fer » (usure anormale). Un appareil présentant des **évolutions rapides** ou des **problèmes récurrents** dans ces domaines, doit faire l'objet d'une analyse. Si le problème rencontré est dû à des opérations de maintenance incorrectement effectuées, ces dernières doivent être réalisées dès que possible. Dans le cas contraire, l'appareil sera classé « **Appareil à Évolution Rapide** » (**AER**). Des mesures spécifiques seront alors décidées comme : le renforcement de la surveillance (tournées, relevés...), la réalisation de vérifications de Famille A à mi-cycle, le ralentissement des circulations, l'anticipation de régénération, etc.

Le classement de l'appareil et les mesures prises sont tracées dans les documents de suivi des ouvrages. Ce classement est réexaminé annuellement. L'appareil peut ainsi être déclassé à l'occasion d'un réexamen.

4.5.2 - Le classement du branchement 312a

Le branchement simple 312a, en gare de Marseille Saint-Charles, n'était pas classé comme « Appareil à Évolution Rapide ». Le mode d'utilisation de l'appareil 312a, circulé à 30 km/h en fond de gare, est notablement différent de celui de l'appareil en cause dans l'accident de Brétigny-sur-Orge, circulé à 140 km/h.

Pour autant, deux signaux, dans l'évolution de l'état de l'appareil, pouvaient révéler que le cadre normal de fonctionnement semblait dépassé. Ces signaux identifiés postérieurement à l'accident par nos analyses, sont :

- premièrement, **l'usure du contre-rail** gauche à raison de 2 mm/an. Cette usure accélérée a obligé à remplacer le contre-rail au pas de quatre ans (voir tableau au § 4.4.4). Une telle évolution pouvait être qualifiée de rapide et aurait pu être considérée comme entrant dans le domaine d'une usure anormale du « fer » et donner lieu à classement de l'appareil.

La nature de l'usure du contre-rail, localisée en zone canal et en zone d'entrée côté aiguille, est un indice qu'il s'opère un important effort de rappel du bogie vers l'intérieur de la courbe, en fin d'aiguillage pris en déviation. L'analyse aurait pu permettre de déduire que, lors du passage en partie intermédiaire, une déformation de l'appareil se produisait entraînant le bogie vers l'extérieur, plus que souhaité.

- deuxièmement, **l'usure des selles** sur une profondeur de 6 mm par fluage. Cette usure produit un jeu dans le maintien du rail en partie de voie intermédiaire. Dans une certaine mesure, le jeu observé peut être augmenté d'un autre jeu observable sur les traverses bien que ce dernier soit difficilement quantifiable et lié localement à un serrage avec insuffisance d'effort des tirefonds. De tels jeux auraient pu être qualifiés de « problème » dans le domaine des « attaches » qui est à vigiler particulièrement dans l'application de la lettre directive.

Le jeu repérable sur l'attache témoigne d'une déformation anormale de l'appareil, et donc d'une sollicitation pouvant dépasser les limites d'un usage régulier.

Ainsi l'observation a posteriori de l'état de l'appareil a mis en lumière d'une part une usure du contre-rail qui était une forme d'évolution rapide, et d'autre part un problème d'attache, qui auraient pu tous deux conduire au classement en « Appareil à Évolution Rapide ». Ce classement aurait permis alors un diagnostic et une recherche de mesures spécifiques.

Ces remarques sont toutefois le fruit d'une analyse réalisée a posteriori de l'accident. Il était sans doute très difficile de les faire a priori. Les directives citent des principes généraux et il existe une assez large place à l'interprétation de chacun dans la mise en œuvre de celles-ci. Le contexte de l'appareil 312a, situé en fond de gare, est assez différent de celui qui a prévalu à la mise en place du suivi pour « évolution rapide ».

4.5.3 - Les nouvelles règles de maintenance pour les branchements à faible rayon

À la suite du déraillement du TGV 6145, puis des expertises et vérifications conduites par le gestionnaire d'infrastructure, celui-ci a décidé de mettre en place **une surveillance et une maintenance renforcées** pour les aiguillages de la même famille que le 312a.

La mesure porte sur les branchements simples de tangente 0,13, posés sur les voies principales, âgés de plus de cinq ans, circulées en voie déviée par des convois rigides (TGV, Nouvelle Automotrice Transilienne (NAT)...) dans des tracés sinueux, et faisant partie des faisceaux d'entrée-sortie des grandes gares du réseau (6 gares parisiennes et 8 gares de province).

Cette mesure a fait l'objet d'une lettre directive interne de SNCF Réseau du 18 décembre 2018.

Schématiquement, deux dispositions sont à prendre :

- le classement a priori des appareils en « Appareils à Évolution Rapide ». Ce classement permettra d'organiser le repérage et l'étude des éléments évolutifs ;
- l'organisation de vérifications supplémentaires de « Famille A », non prévues antérieurement. Elles concernent la recherche de blessures au patin du rail, le suivi de l'efficacité des attaches et de l'état des selles ainsi que la mesure de l'écartement de la voie déviée.

Concernant les blessures au patin, elles sont : à recenser, à repérer sur le rail, à classer, à codifier et à suivre dans le temps. Une « fiche de retour d'expérience » a été diffusée aux mainteneurs expliquant la conduite à tenir.

L'état des selles doit faire l'objet d'un contrôle visuel en partie de voie intermédiaire, côté grand rayon, afin de s'assurer de la tenue de la selle et de la tenue du rail dans la selle.

L'écartement de la voie déviée est à relever au niveau de chaque support de voie intermédiaire.

Ces vérifications nous semblent de nature à assurer un suivi spécifique des pathologies identifiées sur l'aiguillage 312a.

5 - Analyse du déroulement de l'accident et des secours

Vendredi 24 août 2018, le TGV 6145, parti de Paris – Gare de Lyon à l'heure, est en approche de Marseille-Saint-Charles son terminus, peu avant 18 h, l'horaire d'arrivée prévu.

À **17 h 57 min 58 s**, le TGV franchit le portique P3 d'entrée de gare puis il s'engage dans les lacets d'accès à la voie I en passant sur le branchement simple 312a en déviation. Il a une vitesse de 29 km/h. Le conducteur roule sur l'erre.

À **17 h 58 min 18 s**, 155 m après le portique P3, le conducteur se remet en position de traction sur 305 m pour atteindre le heurtoir, avant de couper, à 28 km/h, à nouveau la traction.

À **17 h 58 min 54 s**, alors que l'avant du TGV est 430 m après le portique P3, le bogie 7 de la rame de queue déraile sur le branchement simple 312a.

Une rupture du rail situé sur la file de rail extérieure de la voie déviée de ce branchement vient de se produire sous le passage du train.

La rupture occasionne un désaffleurement de la section rompue qui crée une butée s'opposant au passage du boudin des roues suivantes. Les boudins des roues du bogie 7 montent dessus, chevauchent le rail et retombent de l'autre côté du rail en position de déraillement. Les bogies suivants suivront la même trajectoire.

À **17 h 59 min 4 s**, 10 secondes plus tard, et alors que l'avant du TGV est à 295 m du heurtoir, le conducteur se remet en position de traction. La vitesse tombe de 24 à 14 km/h en 65 m parcourus. Le conducteur coupe à nouveau la traction. Le train perd 9 km/h en 15 m parcourus. Il reste 215 m à parcourir avant le heurtoir. Constatant la retenue anormale du train, le conducteur actionne le freinage. Le train s'arrête immédiatement.

Depuis le déraillement jusqu'à l'arrêt, le TGV a parcouru 155 m, entraînant ainsi à la suite du bogie 7, le déraillement de tous les autres bogies de l'arrière. Les voyageurs situés dans les remorques de cette partie ressentent des balancements violents de gauche à droite, accompagnés de bruits stridents. Les roues du TGV sorties des rails provoquent d'importants dégâts à la voie, endommageant 9 aiguillages, ripant une voie, écrasant une artère de câbles, et détruisant divers matériel de signalisation en voie. Les véhicules déraillés subissent également des dégradations au niveau de leurs bogies et de leur structure de caisse.

Des arcs électriques provenant des appareillages électriques écrasés en voie provoquent un dégagement de fumée. Celui-ci sera stoppé peu après à l'extincteur par les premiers agents de gare arrivés sur place.

Juste avant l'arrêt du TGV, le poste d'aiguillage entend retentir la sonnerie de discordance d'aiguille. Le voyant central de discordance du tableau de contrôle s'allume et 10 aiguilles s'affichent en discordance, conséquence de l'écrasement de l'artère câble par les bogies déraillés.

À **17 h 59 min 42 s**, Le TGV est à l'arrêt depuis 20 secondes. Un signal d'alarme est tiré en compartiment voyageur à l'arrière. Envisageant un danger potentiel de voyageurs dans les voies, le conducteur déclenche l'alerte radio et entre en relation avec le poste d'aiguillage par la radio sol-train.

Lors de l'échange, le conducteur explique les raisons de son déclenchement de l'alerte. Un autre conducteur, celui du TGV 9829, qui sortait à ce moment de la gare, intervient dans la conversation pour annoncer qu'il voit que le TGV 6145 a déraillé.

Dès lors, le conducteur du TGV 6145 appelle les contrôleurs présents dans les deux rames de l'unité. Il leur demande que la rame de queue soit d'abord vidée par l'avant, par la première porte qui est à quai. Pendant ce temps les contrôleurs de la rame de tête ouvrent aussi manuellement quelques portes de leur rame pour commencer l'évacuation

directement sur le quai. Lorsque le contrôleur de la rame de queue a donné l'assurance que sa rame était vide, le conducteur déverrouille les portes côté gauche pour que la rame de tête soit entièrement vidée.

L'évacuation s'achève à **18 h 23**.

Trois autres trains ont été immobilisés en avant-gare à la suite de l'alerte radio. Le poste d'aiguillage se charge alors des opérations de remise en marche de ces trains pour les évacuer ou les rapatrier en gare. Les opérations s'achèvent à **19 h 05**.

Le relevage de la rame déraillée a débuté le soir même. Il s'est terminé le surlendemain, **26 août**, au soir.

La réparation de l'infrastructure a suivi les jours suivants. Quatre voies du plateau de la gare sont restées inutilisables pendant ce temps, obligeant à un réaménagement des dessertes et des horaires avec suppression de nombreux trains.

L'exploitation a repris normalement, après remise en état des installations, le **30 août** à 18 h 30.

6 - Analyse des causes et facteurs associés, 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 mises en évidence par le BEA-TT.

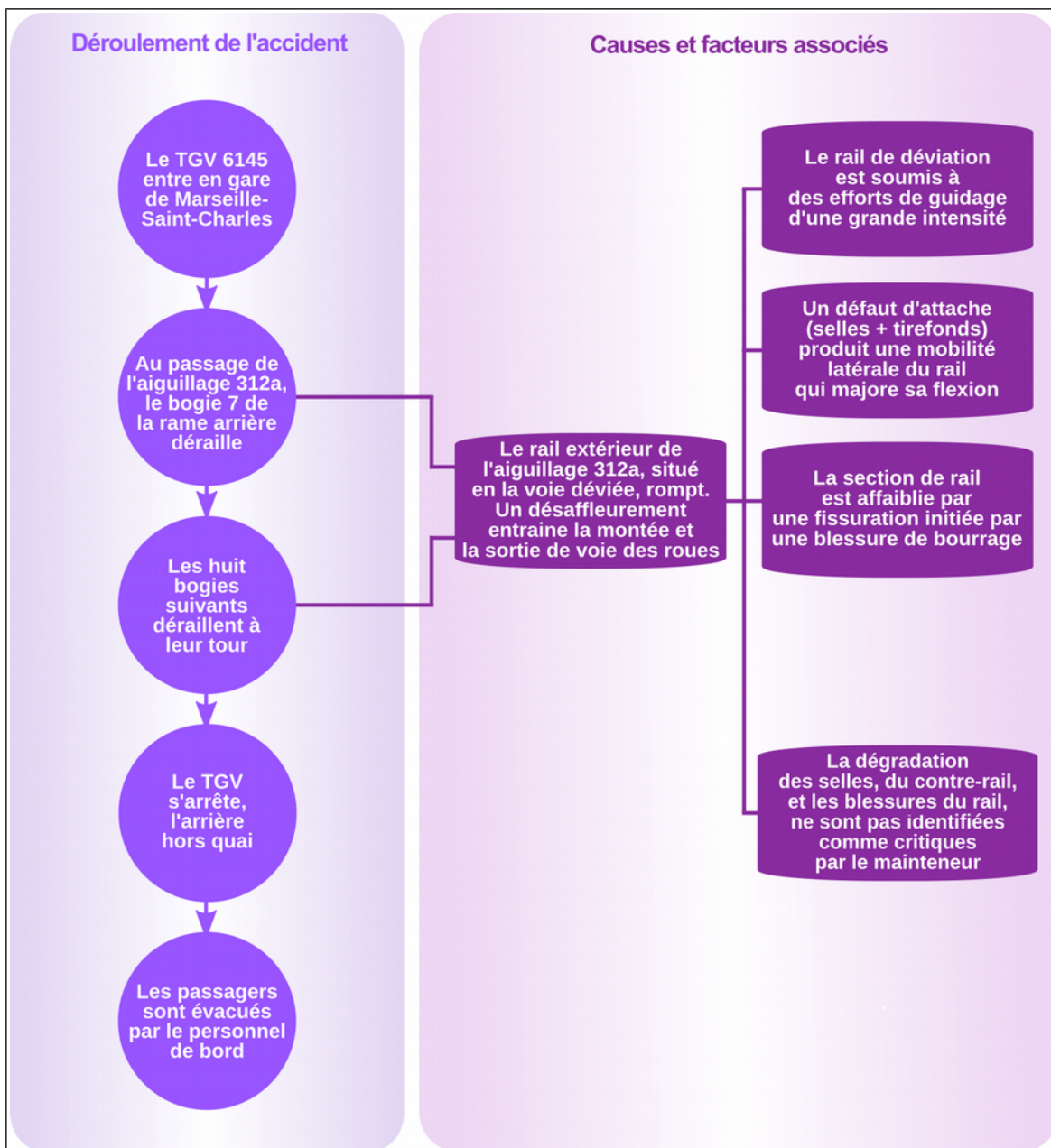


Figure 39 : l'arbre des causes de l'accident

6.2 - Les causes de l'accident

La cause origine du déraillement est la rupture, lors du passage du TGV 6145, du rail situé sur la file extérieure de la voie déviée de l'aiguillage 312a.

La rupture du rail a résulté de la combinaison de trois facteurs :

- Ce rail a été soumis à un niveau de sollicitation très élevé. Situé dans une courbe de faible rayon, il subit la poussée des trains dans leur déviation. L'aiguillage apparaît comme le plus sollicité de la gare, parce qu'il est l'un des plus utilisés et parce qu'il est emprunté par les circulations les plus agressives ;
- Ce rail était affecté d'une mobilité latérale provenant de l'apparition d'un jeu entre le rail et les selles par fluage du métal, et d'une diminution du serrage des tirefonds. Cette mobilité a majoré la flexion du rail ;
- La résistance du rail était affaiblie en raison d'une fissuration de fatigue qui s'est développée à partir d'une blessure résultant d'une opération de bourrage ancienne.

Les indices d'usure et de dégradation qui concernaient les selles, le contre-rail en vis-à-vis, les blessures du rail et le serrage des tirefonds, n'avaient pas été identifiés comme présentant un risque lors des opérations de surveillance et de maintenance. Les prescriptions du gestionnaire de l'infrastructure n'énonçaient pas explicitement ces indices comme critiques.

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

- la surveillance et la maintenance des branchements simples de faible rayon ;
- l'amélioration de la capacité des attaches de rail des branchements simples de faible rayon.

6.3 - La surveillance et la maintenance des branchements simples de faible rayon

La cause première de la rupture de rail est l'intensité des sollicitations qui s'exercent sur le rail. Le rail est situé dans la courbe extérieure de déviation d'un branchement simple d'entrée de gare. Le rail reprend la poussée centrifuge des trains dans la courbe et l'effort de guidage des bogies. Le branchement est le plus sollicité de la gare, parce qu'il est parmi les plus utilisés et parce qu'il est emprunté par les circulations les plus agressives.

Les investigations ont permis d'établir que divers indices d'usure et de dégradation de l'aiguillage témoignaient de l'intensité des sollicitations subies. Ces indices sont le fluage du métal du patin de rail, le fluage du métal de la butée des selles d'appui, le creusement latéral d'encoches dans les traverses, le serrage diminué de certains tirefonds, le développement de fissures suite à blessure du patin du rail sous la flexion, et enfin l'usure accélérée du contre-rail.

La détection de certains de ces indices par le mainteneur aurait possiblement permis un suivi renforcé plus adapté de l'appareil.

Ainsi, l'usure rapide du contre-rail était une forme d'évolution rapide qui aurait pu conduire au classement en « Appareil à Évolution Rapide ». Ainsi aussi, les jeux de l'ensemble selles + traverses + tirefonds auraient pu être qualifiés de « problème » dans le domaine des « attaches » qui aurait conduit au même classement.

Le classement en « Appareil à Évolution Rapide », décrit dans une lettre directive interne de SNCF Réseau du 15 juin 2016, établie à la suite du déraillement sur aiguillage de Brétigny-sur-Orge, permet, et aurait pu permettre dans notre cas, un diagnostic et une recherche de mesures spécifiques.

Depuis le déraillement du 24 août 2018 à Marseille Saint-Charles, le gestionnaire d'infrastructure a décidé de mettre en place une surveillance et une maintenance renforcées pour les aiguillages de la même famille que le branchement simple 312a. Cette mesure a fait l'objet d'une lettre directive interne de SNCF Réseau du 18 décembre 2018.

Cette lettre directive propose deux dispositions :

- le classement a priori de tels appareils en « Appareils à Évolution Rapide » ce qui permettra d'organiser le repérage et l'étude des éléments évolutifs ;
- l'organisation de vérifications supplémentaires de « Famille A », non prévues antérieurement et qui concernent la recherche et le suivi des blessures au patin du rail, le suivi de l'efficacité des attaches et de l'état des selles ainsi que la mesure de l'écartement de la voie déviée.

Ces dispositions semblent de nature à renforcer la détection et le traitement des indices de dégradation auparavant considérés comme non critiques.

Les dispositions correctives étant prises, le BEA-TT n'émet pas de recommandation sur l'organisation de la maintenance.

6.4 - L'attache des rails des branchements simples de faible rayon

L'intensité des sollicitations qui s'exercent sur le rail extérieur en voie déviée a produit des usures et dégradations, telles que le fluage du métal du patin de rail et de la butée des selles d'appui, ou telles que l'usure rapide du contre-rail.

Les usures et dégradations qui concernent l'attache du rail ont conduit à une certaine mobilité du rail. La flexion de celui-ci en a été majorée, contribuant ainsi à la rupture.

Il semble que la durabilité du système d'attache soit affectée d'une sensibilité significative eu égard à l'intensité de circulations comme celle que connaît l'aiguillage 312a.

L'aiguillage 312a est de modèle « tangente 0,13 court » du catalogue des aiguillages du gestionnaire d'infrastructure. Il s'agit d'un modèle qui est implanté sur les voies principales empruntées par des TGV dans les gares terminales dont les plans de voie sont anciens et n'ont pas pu être remaniés lors des travaux de réaménagement pour accueillir la mise en exploitation des TGV.

Ces aiguillages sont sensibles à l'agressivité des TGV, notamment à l'empattement de 3 mètres de leurs bogies qui pivotent plus difficilement que des bogies classiques à empattement plus faible.

Lorsqu'ils sont circulés par des TGV, ces aiguillages nous semblent affectés d'un facteur de risque particulier qui émerge en même temps que s'opère, dans certaines gares, une montée en puissance du trafic par TGV. S'y ajoute, l'arrivée dans ces gares de nouveaux types de train régionaux à caisses articulées et aux empattements de bogie larges. Le déraillement du TGV 6145 à Marseille-Saint-Charles est un révélateur de l'évolution en ce sens de l'exploitation des gares.

S'il est prévu par SNCF Réseau un renforcement de la maintenance des branchements simples en gare comme évoqué plus haut, un traitement plus à la racine du risque, portant sur la fiabilisation de la robustesse du système d'attache, devrait être envisagé pour les aiguillages confirmant des signes de sensibilité.

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

Recommandation R1 adressée à SNCF Réseau

Étudier, pour les branchements simples de faible rayon empruntés par des circulations à bogie de fort empattement (TGV, NAT...), un renfort du système d'attache du rail extérieur de la voie déviée, et, à défaut ou dans l'attente de la mise en œuvre, renforcer les opérations de maintenance.

7 - Conclusions et recommandations

7.1 - Conclusions

La cause origine du déraillement est la rupture, lors du passage du TGV 6145, du rail situé sur la file extérieure de la voie déviée de l'aiguillage 312a.

La rupture du rail a résulté de la combinaison de trois facteurs :

- Ce rail est soumis à un niveau de sollicitation très élevé. Situé dans une courbe de faible rayon, il subit la poussée des trains dans leur déviation. L'aiguillage apparaît comme le plus sollicité de la gare, parce qu'il est l'un des plus utilisés et parce qu'il est emprunté par les circulations les plus agressives ;
- Ce rail était affecté d'une mobilité latérale provenant de l'apparition d'un jeu entre le rail et les selles par fluage du métal et d'une diminution du serrage des tirefonds. Cette mobilité majore la flexion du rail ;
- La résistance du rail était affaiblie en raison d'une fissuration de fatigue qui s'est développée à partir d'une blessure résultant d'une opération de bourrage ancienne.

Les indices d'usure et de dégradation qui concernaient les selles, le contre-rail en vis-à-vis, les blessures du rail et le serrage des tirefonds, n'avaient pas été identifiés comme présentant un risque lors des opérations de surveillance et de maintenance. Les prescriptions du gestionnaire de l'infrastructure n'énonçaient pas explicitement ces indices comme critiques.

7.2 - Recommandations

Recommandation R1 adressée à SNCF Réseau

Étudier, pour les branchements simples de faible rayon empruntés par des circulations à bogie de fort empattement (TGV, NAT...), un renfort du système d'attache du rail extérieur de la voie déviée, et, à défaut ou dans l'attente de la mise en œuvre, renforcer les opérations de maintenance.

ANNEXES

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête

Annexe 2 : Fiche de vérification « famille A » de l'appareil 312a

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête



MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE

MINISTÈRE CHARGÉ DES TRANSPORTS



Le Directeur

La Défense, le 27 août 2018

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 TGV le 24 août 2018 en gare de Marseille Saint-Charles dans les Bouches-du-Rhône ;

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 d'une rame de TGV à l'entrée de la gare de Marseille Saint-Charles (13), survenu le 24 août 2018

Jean PANHALEUX

BAVURES, USURE LATÉRALE ET ÉBRECHURES DES DEMI-AIGUILLAGES(20)

Demi-aiguillage
de Gauche

Demi-aiguillage
de Droite

BAVURES

Aucune bavure
Présence de bavures
Bavures éliminées par meulage

Y
Y
Y

Y
Y
Y

USURE LATÉRALE CONTRE-AIGUILLE

1a La pige passe ($J > 3\text{mm}$)
La pige ne passe pas $0 < J < 3\text{mm}$
La pige ne passe pas $J = 0$

Y
Y
Y

Y
Y
Y

1b Le calibre passe sans meulage
Le calibre passe après meulage
Le calibre ne passe pas

Y
Y
Y

Y
Y
Y

1c La pige passe sans meulage
La pige passe après meulage
La pige ne passe pas

Y
Y
Y

Y
Y
Y

Classement (Bon - VI - VR)

Bon

Bon

USURE LATÉRALE AIGUILLE

Contact / fente repère au-dessus
au-dessus et au-dessous
au-dessous

Y
Y
Y

Y
Y
Y

Pente d'usure d'aiguille $\geq 60^\circ$
 $< 60^\circ$

Y
Y

Y
Y

Classement (Bon - VA - VI - VR)

Bon

Bon

ÉBRECHURE D'AIGUILLE

Aucune ébréchure
Présence d'ébréchure
Longueur totale de la zone ébréchée
Contact au-dessus de la fente repère
Contact au-dessous de la fente repère
Longueur d'ébréchure sous la fente repère

Y
Y
Y
Y
Y
Y

Y
Y
Y
Y
Y
Y

Classement (Bon - VA - VR)

Bon

Bon

Décision du Dirigeant

RAS

Intervention réalisée

SI Meulage - Date

SI Remplacement - Date

Vérification après intervention

Vérification le

par M.

Fonction

Classement

EXAMEN VISUEL DU CŒUR DE CROISEMENT (avaries et usure)(26)

Constatations :

RAS

Dessin :



Etablissement de la fiche d'avarie - Date

EXAMEN VISUEL DES RAILS ET ABOUTS (avaries et usure)(28)

Constatations :

RAS

Dessin :



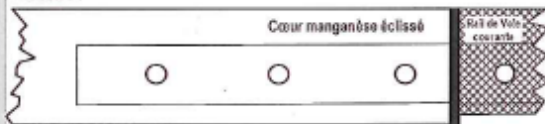
Si remplacement de rail - Date

AUSCULTATION AU MARTEAU DU CŒUR EN ACIER AU Mn(27)

Constatations : Indiquer le repère (A-B-C-D) de(s) l'about(s) suspecté(s)

RAS

Dessin :



Etablissement de la fiche d'avarie - Date

Décision du Dirigeant

RAS

Validation de la Famille A par le Dirigeant

Observations

CRP de Repérage en Manganèse et CR à Commander

Date

16/06/18

Nom

[Redacted]

Fonction

[Redacted]

Visa

[Redacted]

CR Remplacé.

21/06/2018

[Redacted]

[Redacted]

[Redacted]

Aut
14/06/18



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

