

Rapport d'Enquête de Sécurité

Déraillement d'un train de voyageurs à vide

Liège-Guillemins - 11 juillet 2019

TABLE DES VERSIONS DU RAPPORT

Numéro de la version	Sujet de révision	Date
1.0	Première version	22/06/2023

Toute utilisation de ce rapport dans une perspective différente de celle de la prévention des accidents - par exemple celle de définir des responsabilités, et a fortiori des culpabilités individuelles ou collectives - serait effectuée en distorsion totale avec les objectifs de ce rapport, les méthodes utilisées pour le bâtir, la sélection des faits recueillis, la nature des questions posées, et les concepts qu'il mobilise, auxquels la notion de responsabilité est étrangère. Les conclusions qui pourraient alors en être déduites seraient donc abusives au sens littéral du terme. En cas d'incohérence entre certains mots et termes, la version en français fait foi.

Table des matières

1. RÉSUMÉ	5
2. LES FAITS IMMÉDIATS	13
2.1. L'événement	13
2.1.1. Description succincte de l'événement	13
2.1.2. Localisation	14
2.1.3. La décision d'ouvrir une enquête	14
2.1.4. Composition de l'équipe	14
2.1.5. Conduite de l'enquête	15
2.2. Les circonstances de l'événement	16
2.2.1. Entreprises concernées	16
2.2.2. Train	17
2.2.3. Description de l'infrastructure et du système de signalisation	18
2.2.4. Moyen de communications	19
2.3. Pertes humaines, blessés et dommages matériels	20
2.3.1. Passagers, personnel et tiers	20
2.3.2. Matériel roulant & Infrastructure	20
2.4. Circonstances externes	22
2.4.1. Conditions météorologiques	22
2.4.2. Références géographiques	22
3. COMPTE-RENDU DES INVESTIGATIONS ET ENQUÊTES	24
3.1. Résumé des témoignages	24
3.2. Système de Gestion de Sécurité	24
3.3. Règles et réglementation	24
3.3.1. Règles et réglementation publique communautaire et nationale applicables	24
3.3.2. Autres règles, telles que les règles d'exploitation, les instructions locales, les exigences applicables au personnel, les prescriptions d'entretien et les normes applicables	24
3.4. Fonctionnement du matériel roulant et des installations techniques	25
3.4.1. Images EBP du trajet du train	25
3.4.2. Contrôle du matériel roulant	29
3.4.3. Comportement du train – analyse des données enregistrées à bord	29
3.4.4. Contrôle de l'infrastructure	32
3.5. Expertise	35
3.6. Mesures prises pour protéger et sauvegarder le site de l'événement	36
4. ANALYSE ET CONCLUSIONS	39
4.1. Compte rendu final de la chaîne d'événements	39
4.2. Expertise	40
5. MESURES PRISES	43
5.1. Mesures prises par la SNCB	43
6. RECOMMANDATIONS	45
7. ANNEXES	47
7.1. Livrable 1 de Mastéris : "Analyse des facteurs contributifs et calcul des efforts générés"	47
7.2. Livrable 2 de Mastéris - Simulation numérique du comportement dynamique du véhicule déraillé sur la zone de déraillement	66
7.3. Commentaires des parties concernées	101

1. RÉSUMÉ

Le jeudi 11 juillet 2019, suite à un problème technique à un train de voyageurs de l'entreprise ferroviaire SNCB (déclenchements haute tension sur les locomotives électriques du train), le train est à l'arrêt en gare de Waremme et le débarquement des voyageurs est organisé.

Après avoir tenté en vain de dépanner son train, le conducteur le déclare en détresse.

Une locomotive de type 18 est envoyée comme élément de secours afin de remorquer le train en panne jusqu'à la gare de Liège-Guillemins. Après avoir accouplé la locomotive 18 en tête du train en détresse et après un essai de frein de type A concluant, le train remorqué par la locomotive 18 quitte la gare de Waremme.

Vers 9:48, alors que le train arrive en gare de Liège-Guillemins, les premières voitures du train déraillent sur des aiguillages à l'entrée du grill de la gare. Suite à la rupture de la conduite d'alimentation du système de freins, le train s'immobilise.

Il n'y a pas de victime et les dégâts matériels sont peu importants.

L'Organisme d'Enquête (OE) n'avait pas envisagé d'enquêter sur ce déraillement, qui ne répond pas à la définition d'accident grave ni à celle d'accident significatif.

Cependant, lors d'une réunion où les premiers éléments récoltés par la SNCB et Infrabel ont été présentés, l'OE s'est rendu compte :

- que l'analyse de ce déraillement à faible vitesse à l'entrée de la gare de Liège-Guillemins se révélait plus complexe qu'il n'y paraissait,
- qu'il n'y avait pas de consensus entre les deux parties.

Suite à la qualification de l'accident, les mesures relevées sur site avaient été peu nombreuses et concernaient :

- l'état de la voie,
- le matériel roulant,
- les bandes d'enregistrements du train.

De plus, lorsque les enquêteurs de l'OE sont arrivés sur le site de l'accident, certains éléments liés au matériel roulant (crochet d'attelage, boyaux pneumatiques) avaient été modifiés sans faire l'objet d'un enregistrement ou d'une photo, contrairement à ce qui est précisé à l'article 8 de l'arrêté royal du 16 janvier 2007 fixant certaines règles relatives aux enquêtes sur les accidents et incidents ferroviaires.

L'OE a analysé ces diverses données : elles se sont révélées dans les normes et tolérances, et l'analyse des divers facteurs pris séparément ne pouvait expliquer le déraillement.

Au terme d'un marché public, l'OE a alors désigné la société d'expertise externe Mastéris afin qu'elle réalise une analyse des facteurs et des efforts auxquels a été soumis le train lors de son entrée en gare de Liège-Guillemins, et qu'elle conduise une simulation informatique sur la dynamique du train, afin de mettre en évidence la conjonction de facteurs ayant pu contribuer au déraillement.

Dans un premier livrable, la société Mastéris a établi :

- un scénario reprenant l'ensemble des facteurs contributifs ;
- le calcul des efforts générés.

Toutes les données nécessaires à l'étude de Mastéris, et plus particulièrement pour la simulation avec le logiciel de dynamique ferroviaire, n'étaient pas disponibles. C'est pourquoi, à la demande de l'OE, la société Mastéris a fait varier divers paramètres lors de ses analyses et simulations sur base des éléments mis à sa disposition.

Nonobstant la gravité des conséquences d'un accident, dans le cadre d'un déraillement de train de voyageurs en voie principale, les parties concernées devraient récolter toutes les données utiles concernant l'infrastructure, le matériel roulant et les actes posés par les opérateurs permettant de déterminer les facteurs ayant contribué à la survenance de l'accident. Le relevé de l'ensemble des données sur le site de l'accident aurait permis une simulation plus proche de la situation réelle.

Les résultats de ces simulations sont repris dans le second livrable de Mastéris.

Les livrables délivrés par la société Mastéris sont annexés à ce rapport d'enquête et détaillent in extenso les explications et calculs ; ci-après sont résumées les principales approches.

TRACÉ DU TRAJET EMPRUNTÉ PAR LE TRAIN

Le déraillement s'est déroulé à l'entrée de la gare de Liège Guillemins : l'itinéraire emprunté par le train le jour du déraillement n'est pas utilisé fréquemment, il traverse le grill d'entrée de la gare de Liège Guillemins et présente un caractère sinueux. L'existence d'un tracé sinueux se traduit par un déport géométrique entre 2 véhicules attelés, ce qui entraîne une diminution de la surface de contact de deux tampons. C'est ce qui peut conduire à un risque de déraillement.

**La conformité aux règles de la STI "Infrastructure" et à la norme européenne EN13803 de ce tracé a été contrôlée : le trajet ne présente pas de tracé sinueux non conforme.
Le déraillement n'est à priori pas dû au tracé théorique.**

TYPE DE FREINAGE ET EFFORTS GÉNÉRÉS

Le train a parcouru la zone d'aiguillages à l'entrée de la gare de Liège-Guillemins à une vitesse d'environ 30 km/h : cette vitesse faible respecte les prescrits. Cependant, lors de son passage sur ces aiguillages, le conducteur n'a utilisé que le frein rhéostatique (ou frein dynamique) de la locomotive pour ralentir le train. Il s'agit d'un freinage électrique dans lequel, schématiquement, le sens du courant dans le moteur de la locomotive est inversé, induisant un couple résistant dans l'arbre-moteur.

Dans ce mode de freinage, seul l'engin moteur freine. Cela peut entraîner des efforts longitudinaux de compression dans la rame qui se trouve derrière la locomotive.

Une règle interne à la SNCB spécifie :

L'utilisation du frein dynamique sur les locomotives comporte certains dangers liés aux courbes de faible rayon et aux aiguillages pris en voie déviée, où les efforts de compression longitudinaux peuvent conduire à des mariages de butoirs, voire des déraillements.

L'utilisation du frein dynamique seul est interdite dans ces zones lorsque la vitesse maximum autorisée y est égale ou inférieure à 40 km/h.

La zone d'aiguillages à l'entrée de Liège-Guillemins constitue une zone en forte déclivité où sont présentes des courbes et contre-courbes.

Au niveau européen, le paragraphe 4.2.4.4.4 du Règlement 1302/2014 du 18 novembre 2014 concernant une spécification technique d'interopérabilité relative au sous-système "matériel roulant" – "Locomotives et matériel roulant destiné au transport de passagers" du système ferroviaire dans l'Union européenne précise que :

Si une unité est équipée d'un système de freinage dynamique:

1) Il doit être possible, sur les unités électriques, d'interdire l'utilisation d'un système de freinage par récupération, qui renvoie l'énergie récupérée vers la ligne aérienne de contact, lorsque l'unité circule sur une ligne interdisant ce fonctionnement.

2) [...]

3) Quand le freinage dynamique est utilisé sur les locomotives indépendamment d'autres systèmes de freinage, il doit être possible de limiter la valeur maximum et le taux de variation de l'effort de freinage dynamique à des valeurs prédéfinies.

Remarque: cette limitation a trait aux forces transmises à la voie quand la ou les locomotives sont intégrées à un train. Elle peut être appliquée au niveau opérationnel en définissant les valeurs nécessaires à la compatibilité avec une ligne particulière (par exemple une ligne avec une forte déclivité et un faible rayon de courbe).

Au niveau de la réglementation du gestionnaire d'infrastructure Infrabel, le RSEIF 4.2 précise la valeur de l'effort maximum du frein dynamique lorsque l'effort maximum du frein dynamique ainsi que le gradient maximum d'augmentation ou de diminution de l'effort du frein dynamique d'une locomotive ne sont pas gérés automatiquement.

	Effort maximum du frein dynamique	Effort maximum du frein dynamique utilisé conjointement avec un autre frein
Une locomotive assure l'effort de traction	150 kN	105 kN
Plusieurs locomotives accouplées assurent l'effort de traction	75 kN	105 kN

Le système d'enregistrement de bord de la locomotive ne prévoit pas l'enregistrement de l'intensité de ce freinage. Sur base des bandes de vitesse et du profil des voies empruntées par le train, l'intensité du freinage a été calculée par Mastéris. La détermination de cette valeur est importante non seulement pour le calcul des efforts longitudinaux de compression dans la rame, mais également pour la simulation informatique (objet de la seconde partie de l'analyse réalisée par Mastéris).

La valeur déterminée par Mastéris (150kN) correspond à la valeur maximale autorisée par Infrabel dans sa réglementation lorsque la locomotive assure l'effort de traction et que le frein dynamique est utilisé seul.

Considérant le scénario de freinage identifié et la géométrie de la zone de voie où s'est produit le déraillement, Mastéris s'est employé à réaliser une analyse en dynamique longitudinale et à calculer les efforts de compression générés.

Efforts Longitudinaux de Compression

Habituellement et historiquement cette spécialité concerne les trains de marchandises qui sont plus sujets à risques étant donné leur longueur et leur tonnage ainsi que leur hétérogénéité et notamment la présence de wagons vides favorisant ces risques. Les efforts longitudinaux de compression sont générés dans les trains de fret dans diverses configurations de conduite (freinage pneumatique, refoulement, freinage dynamique...) et peuvent dans certains cas dépasser les ELC admissibles des wagons qui composent ce train.

On estime qu'il y a risque de déraillement lorsque, pour un véhicule donné, l'effort longitudinal de compression atteint dépasse la valeur admissible du véhicule. Le déraillement se produit cependant si des caractéristiques défavorables se présentent au moment où l'effort longitudinal de compression maximum est atteint (courbe et contre courbe de faible rayon, chargement du wagon, état de surface des plateaux de tampon...). Les risques de déraillement dû aux efforts longitudinaux de compression ne sont pas étudiés sur les trains de voyageurs pour diverses raisons dont la faible longueur des convois qui conduit à des efforts longitudinaux de compression faibles et la masse des voitures qui induit des efforts longitudinaux de compression admissibles élevés. L'étude de Mastéris est donc une des premières études dans le domaine "Voyageur" qui aborde ce sujet.

Mastéris a extrapolé les valeurs de référence de wagons de marchandises au matériel impliqué dans le déraillement : ces valeurs sont issues des études et normes de l'Union internationale des Chemins de fer.

Cette analyse montre que les efforts longitudinaux de compression calculés (130kN ou 200kN en valeur haute) restent très en deçà de la valeur admissible empirique (504kN), retenue dans le cadre de cette étude .

La simulation numérique du comportement dynamique du véhicule déraillé sur la zone de déraillement réalisée ensuite par Mastéris a pour but d'étudier le soulèvement des roues par rapport au rail qui pourrait causer le déraillement dans la zone d'aiguillages par laquelle est passée le train.

Afin d'étudier le risque de déraillement, deux critères sont utilisés :

- le soulèvement (dz) de la roue extérieure à la courbe de l'essieu de tête de la première voiture du train ;
- le ratio des efforts de contact Y/Q (où Y représente l'effort transversal et Q l'effort vertical) de cette même roue.

Afin de disposer d'un ordre de grandeur pour ces deux critères, des valeurs "limites" ont été tirées de la norme européenne EN14363 :2016+A1 :2018 :

- Pour les essais d'homologation de l'aptitude au franchissement des gauches de voie sans déraillement, la valeur limite du soulèvement de la roue (dz) est 5 mm. Cependant, il faut noter que cela correspond à des conditions bien définies par la norme (rayon de courbe de 150 m, gauche de 7 mm/m).
- Pour les essais d'homologation du comportement en dynamique du train, le ratio des efforts de contact (Y/Q) pour la roue d'attaque doit rester inférieur à 0,8.

Un premier cas est simulé, et il servira de référence et comparaison pour les simulations suivantes qui feront varier divers paramètres : le but est de mettre en évidence les paramètres qui amènent une augmentation du risque de déraillement.

Le second livrable de Mastéris annexé reprend en détail les diverses simulations réalisées : ci-après, le résumé des facteurs ayant une influence sur le risque de déraillement.

ADHÉRENCE ET LE COEFFICIENT DE FROTTEMENT DE CONTACT ROUE-RAIL

L'adhérence rail-roue est la base de la traction et du freinage. La puissance de traction et de freinage est transmise par les roues sur le rail. En conséquence, le coefficient d'adhérence a une influence sur l'accélération et le freinage.

Le coefficient d'adhérence varie avec la température du rail ainsi qu'avec la présence sur le rail de corps sur le rail tel que la pluie, l'humidité ambiante, huiles, graisses, ...

Les divers paramètres pour établir le coefficient d'adhérence n'ont été relevés ni par l'entreprise ferroviaire, ni par le gestionnaire d'infrastructure.

L'étude de Mastéris a donc fait varier le coefficient de frottement lors de simulations : cela permet d'encadrer la valeur réelle qui est inconnue. Les résultats montrent une influence du coefficient de frottement du contact roue-rail sur le risque de déraillement : un rail sec augmente le risque de déraillement.

Avec une voie parfaite (sans défauts, sans usure...) et un train nominal (sans déformation, masses équilibrées...), la zone de déraillement est sensible mais les critères de déraillement sont toujours inférieurs aux valeurs limites quel que soit l'état de surface du contact roue-rail.

TRACÉ DE LA VOIE

Bien que le tracé sinueux soit conforme aux règles de l'Union internationale des Chemins de fer, la simulation informatique a permis de vérifier le comportement du train sur la zone où s'est produit le déraillement. Cette zone est caractérisée par un enchaînement d'une courbe à gauche et d'une courbe à droite avec un alignement de 8,1m.

Cet enchaînement amène une localisation du ratio maximal des efforts de contact (Y/Q) en entrée de courbe, correspondant à la zone de déraillement.

La simulation réalisée avec un profil de rail neuf et un effort de freinage minimal (15kN) montre que le ratio des efforts de contact (Y/Q) est sensible aux caractéristiques de tracé de la zone où s'est produit le déraillement, sans toutefois dépasser la valeur limite (0,8).

APPLICATION D'UN EFFORT DE FREINAGE

Dans la première partie de son étude, Mastéris a calculé la valeur maximale de l'effort de freinage dynamique de la locomotive, cette valeur n'étant pas enregistrée à bord du matériel roulant.

Le résultat de ce calcul avait donné une valeur de 150kN.

Lors des simulations de la seconde phase de l'étude de Mastéris, deux cas ont été comparés, dans des conditions de profils de rail neufs et profils de roue neufs:

- application d'un effort de freinage de 15kN
- application d'un effort de freinage de 150kN

Dans des conditions de profils neufs tant pour les rails que pour les roues, l'application d'un effort de freinage de 150kN conduit à augmenter le ratio des efforts de contact Y/Q de 12% (par rapport à l'application d'un effort de freinage de 15kN), le faisant passer de 0,67 à 0,75. Il reste inférieur à 0,8 mais cet effort de freinage de 150kN a donc un effet notable sur le ratio des efforts de contact.

PROFIL DE RAIL

Les rails sont sujets à une usure verticale (peu fréquente) et à une usure latérale (beaucoup plus fréquente).

L'usure est fonction du trafic c'est-à-dire du tonnage, du nombre et de la vitesse des trains.

L'usure latérale se manifeste surtout sur le rail extérieur.

Les résultats de la simulation montrent que, indépendamment de l'effort de freinage, l'influence d'un profil de rail usé est notable sur le risque de déraillement.

ÉCARTEMENT DES RAILS AVEC EFFORT DE FREINAGE

L'écartement des rails est la distance séparant le flanc internes des deux fils de rails d'une voie ferrée.

L'écartement standard est de 1435 mm qui correspond à l'écartement standard de l'Union internationale des Chemins de fer.

Les mesures d'écartement n'étaient pas disponibles sur toute la section impliquée dans le déraillement : les valeurs d'écartement ont été déterminées par Mastéris à partir de dessins de profils fournis et retracés sur un logiciel de conception assistée par ordinateur.

Sur l'entrée de la zone où s'est produit le déraillement, les valeurs d'écartement varient entre 1452 et 1461mm (la valeur nominale pour cette zone est de 1448mm).

Trois valeurs ont été retenues pour la simulation : 1452, 1455 et 1458mm.

Avec un effort de freinage de 150kN, l'augmentation de l'écartement de voie (de 1448 à 1458mm) amène une augmentation du ratio des efforts de contact (Y/Q) de 18% : celui-ci passe de 0.75 à 0.89. La valeur limite pour ce ratio (0,8) est donc dépassée.

Cette augmentation est notamment due à la diminution de l'effort vertical d'environ 16% (délestage supplémentaire de la roue d'attaque).

L'influence de l'écartement de la voie sur le ratio des efforts de contact (Y/Q) est négligeable dès lors que l'effort de freinage n'est pas appliqué.

L'augmentation de l'écartement de la voie contribue à augmenter notablement le risque de déraillement quand celui-ci est combiné à un effort de freinage de 150kN.

DÉFAUT DE GAUCHE DE BOGIE ET/OU DE VOIE

Il est connu qu'un gauche lié à un défaut de voie et/ou à la déformation du bogie augmente le risque de déraillement :

- La valeur de gauche la plus élevée enregistrée par le gestionnaire d'infrastructure est de 2,15mm/m à 13,54m de la pointe de l'appareil de voie ;
- En l'absence de données réelles disponibles pour préciser la valeur de gauche du bogie, la simulation réalisée par Mastéris ajoute une cale de 20 mm au niveau de la suspension primaire de la première roue extérieure gauche, afin de modéliser ces défauts de gauche dans le cadre d'une étude paramétrique.
- Cela est équivalent à un gauche total (voie + bogie) de 7,8 mm/m.

La simulation, avec une valeur de freinage de 150kN (soit la valeur maximale calculée), permet la comparaison des comportements entre un gauche avec un profil de rail usé et un gauche avec un profil de rail neuf.

Les résultats obtenus montrent bien qu'un défaut de gauche, couplé à un freinage de 150kN, augmente le risque de déraillement :

- avec un rail neuf et sans autres défauts de voie (dressage, nivellement), les valeurs des deux critères (soulèvement de la roue et ratio des efforts de contact) sont toujours inférieures aux valeurs limites ;
- en combinant ce même défaut de gauche avec un rail usé, un déraillement pourrait avoir lieu (le soulèvement de la roue dépasse la valeur limite (5 mm)).

CONCLUSION

Une première simulation avec les paramètres nominaux (rail neuf, voie parfaite sans défaut, caractéristiques du train au nominal) a montré que la zone de déraillement est une zone sensible vis-à-vis de deux critères de déraillement :

- le soulèvement de roue (dz)
- le ratio des efforts de contact roue-rail (Y/Q).

Les études paramétriques réalisées ont permis de tirer des conclusions, dont les suivantes :

- L'entrée de la zone 14AE, zone identifiée comme étant là où le déraillement s'est déroulé, est bien la zone la plus critique sur le parcours, et ce y compris avec une voie sans défaut, un train nominal et un effort de freinage rhéostatique faible par la locomotive de tête.
- Un rail sec augmente le risque de déraillement.
- Le profil du rail a un impact sur le risque de déraillement, qu'il soit ou non combiné à un effort de freinage.
- L'augmentation de l'écartement de la voie contribue à augmenter notablement le risque de déraillement quand celui-ci est combiné à un effort de freinage rhéostatique élevé par la locomotive de tête.
- Les défauts de gauche liés à la déformation du bogie et/ou de la voie, cumulés avec l'usure de rail et un effort de freinage rhéostatique élevé par la locomotive de tête peuvent faire dérailler le train dans la zone étudiée.

L'étude réalisée par Mastéris montre que la zone où le train a déraillé est particulièrement sensible en comparaison à la zone d'aiguillage précédente et que le cumul de divers facteurs d'influence (effort de freinage dynamique, écartement de voie supérieur à la valeur nominale, défaut de gauche, profil de rail usé, coefficient de frottement) est de nature à atteindre ou dépasser les critères de déraillement.



2. LES FAITS IMMÉDIATS

2.1. L'ÉVÉNEMENT

2.1.1. DESCRIPTION SUCCINCTE DE L'ÉVÉNEMENT

Le jeudi 11 juillet 2019, suite à un problème technique au train de voyageurs E7400 de l'entreprise ferroviaire SNCB, le train est à l'arrêt en gare de Waremmé et le débarquement des voyageurs est organisé. Après avoir tenté en vain de dépanner son train, le conducteur le déclare en détresse.

Une locomotive de type 18 est envoyée comme élément de secours afin de remorquer le train en panne vers la gare de Liège-Guillemins.

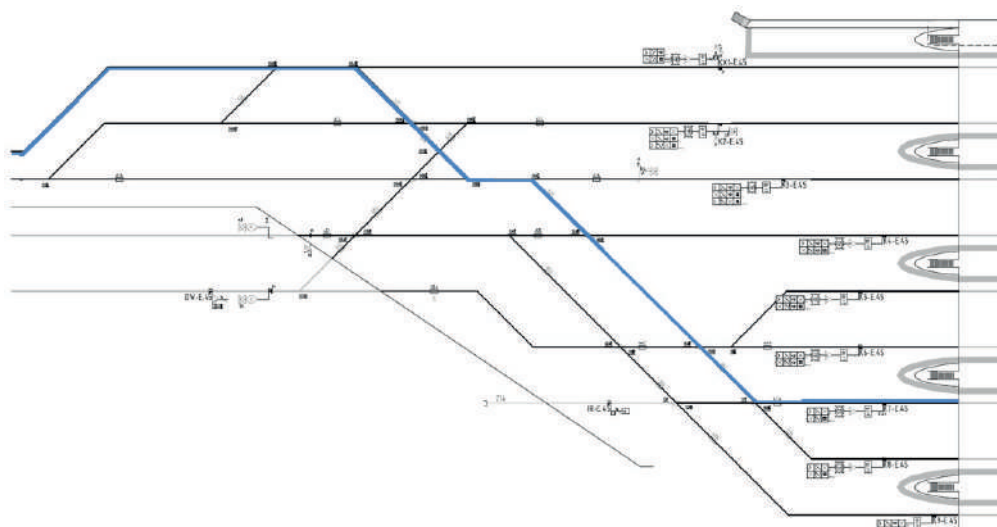
Vers 9h48, alors que le train arrive en gare de Liège-Guillemins, les 3 premières voitures du train déraillent sur des aiguillages à l'entrée du grill de la gare.

Suite à la rupture de la conduite d'alimentation du système de freins, le train s'immobilise.

Depuis les quais de la gare, un conducteur d'un train à l'arrêt voit le déraillement et lance une alarme GSM-R.



2.1.2. LOCALISATION



Quais de la gare de Liège-Guillemins

Illustration : Plan de signalisation avec indication du trajet prévu pour le train

2.1.3. LA DÉCISION D'OUVRIR UNE ENQUÊTE

L'enquêteur de garde de l'OE, directement prévenu par le Traffic Control, se rend sur les lieux de l'accident. Conformément à l'article 111 (alinéa 2) de la loi du 30 août 2013¹, l'Organisme d'Enquête (OE) a décidé d'ouvrir une enquête sur cet accident - qui ne répond ni à la qualification d'accident grave ni à celle d'accident significatif - et en a informé les parties concernées.

2.1.4. COMPOSITION DE L'ÉQUIPE

Organisme d'appartenance	Rôle
Organisme d'Enquête	Enquêteur principal
Organisme d'Enquête	Enquêteurs
Mastéris	Expertise technique
SSICF	Expertise technique et réglementaire, assistance documentaire
Infrabel	Assistance documentaire, logistique, technique
SNCB	Assistance documentaire, logistique, technique

¹ Art. 111. § 1er. L'organisme d'enquête :

1° effectue une enquête après chaque accident grave survenu sur le système ferroviaire;

2° en plus des accidents graves, peut effectuer des enquêtes sur les accidents et incidents qui, dans des circonstances légèrement différentes, auraient pu conduire à des accidents graves, y compris les défaillances techniques au niveau des sous-systèmes structurels ou des constituants d'interopérabilité du système ferroviaire à grande vitesse ou conventionnel. Le cas échéant, il tient compte des critères déterminés par le Roi;

2.1.5. CONDUITE DE L'ENQUÊTE

L'enquête s'articule sur :

- les constatations et mesures prises sur le matériel roulant et l'infrastructure sur le site de l'accident ;
- l'analyse de documents techniques et réglementaires ;
- des discussions avec le personnel impliqué ainsi que des managers des entreprises concernées ;
- l'expertise réalisée par la société Mastéris, composée de 2 étapes :
 - 1. Analyse des facteurs contributifs et calcul des efforts générés
 - 2. Simulation numérique du comportement dynamique du véhicule déraillé sur la zone de déraillement.

Le présent rapport reprend les éléments analysés par l'OE, de même que les éléments issus de l'expertise réalisée par la société Mastéris. Les rapports d'expertise de la société Mastéris (un livrable par étape) sont annexés au présent rapport (cf. Chapitre 7).

2.2. LES CIRCONSTANCES DE L'ÉVÉNEMENT

2.2.1. ENTREPRISES CONCERNÉES

2.2.1.1. ENTREPRISE FERROVIAIRE SNCB

L'entreprise ferroviaire SNCB est chargée de l'organisation et de l'exploitation des activités de transport ferroviaire de voyageurs.

Les missions de service public de la SNCB comprennent notamment le transport intérieur de voyageurs assuré par les trains du service ordinaire ainsi que les dessertes intérieures par trains à grande vitesse.

La SNCB est composée de 6 directions : Transport Operations, Passenger Transport & Security, Stations, Technics, Marketing & Sales, Finance.

Les 2 directions plus directement concernées sont :

Transport Operations

La direction Transport Operations est responsable de la planification des roulements, de la conduite des trains, des opérations de faisceau, de l'exécution du plan de transport.

Technics

La direction Technics est en charge de l'achat, de la modernisation et de l'entretien du matériel roulant. Elle a pour mission de fournir aux clients du matériel sûr, fiable et adapté aux besoins opérationnels et commerciaux de manière à offrir dans son domaine de compétence un service de qualité aux voyageurs.

2.2.1.2. GESTIONNAIRE D'INFRASTRUCTURE INFRAABEL

Suite à l'Arrêté Royal du 14 juin 2004, Infrabel est le gestionnaire d'infrastructure.

Le gestionnaire de l'infrastructure doit veiller à l'application correcte des normes techniques et des règles afférentes à la sécurité de l'infrastructure ferroviaire et à son utilisation.

Les activités d'Infrabel sont organisées en 3 directions, chacune dotée de spécialités et de responsabilités propres, et de 4 services généraux.

Directions :

- Traffic management & services
- Asset management
- Build

Services :

- Finance & Business administration
- HR & organisation
- Strategy & Corporate & Public Affairs
- Information & communication technology

2.2.2. TRAIN

2.2.2.1. GÉNÉRALITÉS

Le train E7400 est composé d'une locomotive électrique de type 27 en tête de train, de 11 voitures de type M4 et d'une locomotive de type 27 en queue de convoi (longueur totale : 304.16 m).

Suite à la panne (déclenchements haute tension à répétition sur les locomotives électriques 2731 et 2721) et la détresse du train, une locomotive de type 18 est envoyée en gare de Waremme pour remorquer le train.



*Illustration : locomotive de type 18, suivie de la locomotive de type 27
(photo post accident et rupture d'attelage)*



Illustration : voitures M4 immobilisées à l'entrée de la gare de Liège-Guillemins après l'accident

2.2.2.2. INFORMATIONS TECHNIQUES

Les informations de la SNCB à propos du train sont les suivantes :

Locomotive de type 18

- Longueur : 19,58 m
- Masse : 88,00 T

Locomotive de type 27

- Longueur : 18,65 m
- Masse : 85,00 T

Voiture M4

- Longueur : 24,26 m
- Masse : 38,40 T

2.2.3. DESCRIPTION DE L'INFRASTRUCTURE ET DU SYSTÈME DE SIGNALISATION

2.2.3.1. GARE DE LIÈGE-GUILLEMINS

A l'entrée de la gare de Liège-Guillemins en provenance de Ans, la ligne 36 est en forte pente (pente moyenne > 18mm/m).



Illustration de la pente de la voie (la gare de Liège-Guillemins se trouve à l'arrière-plan de la photo, prise depuis l'arrière du train)

2.2.3.2. EBP - TOUT-RELAIS - ENCLÈCHEMENT

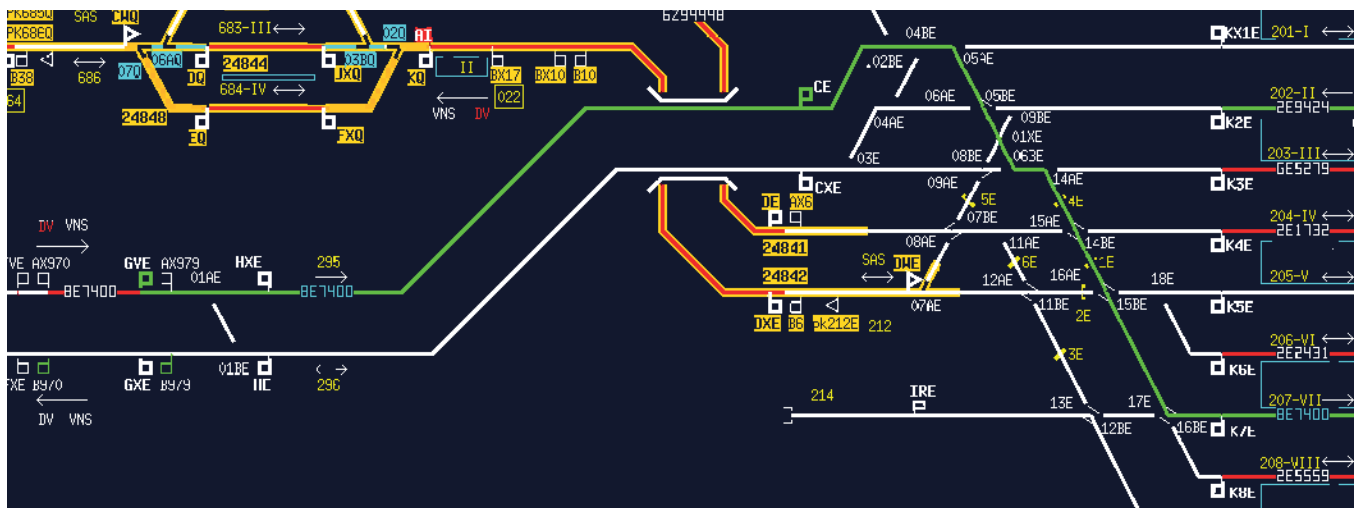


Image EBP de la zone (les quais de la gare de Liège-Guillemins se trouvent à droite de l'image). Le trait en vert symbolise l'itinéraire prévu pour le train E7400 (arrivée prévue sur la voie VII).

Le poste de signalisation de Liège-Guillemins gère la zone où s'est déroulé l'accident. Le système de signalisation fonctionne en EBP/PLP.

2.2.4. MOYEN DE COMMUNICATIONS

Le GSM for Railways (GSM-R) est un standard international pour le réseau radio numérique paneuropéen de communication destiné au secteur ferroviaire. Il supporte les services de voix et de données et travaille dans des bandes de fréquences allouées par la Communauté Européenne identiques en Europe.

Il permet d'établir une communication directe entre la cabine de conduite des trains et le Traffic Control, d'effectuer des appels par groupe, de gérer la priorité des appels.

Ces conversations sont enregistrées.

Lorsqu'il a vu le déraillement survenir, le conducteur d'un train qui était à l'arrêt en gare de Liège-Guillemins a immédiatement lancé une alarme GSM-R

2.3. PERTES HUMAINES, BLESSÉS ET DOMMAGES MATÉRIELS

2.3.1. PASSAGERS, PERSONNEL ET TIERS

Aucune victime n'est à déplorer.

2.3.2. MATÉRIEL ROULANT & INFRASTRUCTURE

D'importants dégâts sont occasionnés :

- à l'infrastructure (voie, traverses, aiguillage) ;
- au matériel roulant (à la locomotive 27 à l'avant du train et aux 3 premières voitures M4).





2.4. CIRCONSTANCES EXTERNES

2.4.1. CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES

Le ciel est voilé et la température s'élève à environ 24°C.

2.4.2. RÉFÉRENCES GÉOGRAPHIQUES



3. COMPTE-RENDU DES INVESTIGATIONS ET ENQUÊTES

3.1. RÉSUMÉ DES TÉMOIGNAGES

Au cours de l'enquête, l'OE a eu, à divers moments, l'opportunité de rencontrer différents intervenants : conducteurs, agent de triage, manager d'atelier, responsables de maintenance de l'infrastructure. Le but n'est pas de retranscrire ces conversations dans le présent rapport mais de les utiliser en substance afin d'analyser l'accident survenu.

3.2. SYSTÈME DE GESTION DE SÉCURITÉ

La finalité globale du Système de Gestion de Sécurité (SGS) est de permettre à l'organisation d'atteindre ses objectifs économiques et commerciaux d'une manière sûre, tout en démontrant qu'au minimum, elle se conforme à toutes les obligations en vigueur en matière de sécurité (obligations légales, obligations liées à un système de qualité ou d'amélioration continue, ...).

Une gestion structurée confère à l'entreprise une valeur ajoutée qui l'aide entre autres à améliorer ses performances globales, à introduire des mesures d'efficacité opérationnelle, et à instaurer une culture positive de la sécurité.

Une approche structurée permet aussi de déterminer les dangers potentiels et d'établir une gestion continue des risques liés aux activités de l'entreprise, en vue de prévenir les accidents.

En appliquant correctement tous les éléments constitutifs d'un SGS, l'entreprise peut acquérir l'assurance nécessaire qu'elle maîtrise et continuera à maîtriser tous les risques recensés comme étant inhérents à ses activités, quelles que soient les conditions d'exploitation.

Le SGS n'a pas été étudié durant cette enquête.

3.3. RÈGLES ET RÉGLEMENTATION

3.3.1. RÈGLES ET RÉGLEMENTATION PUBLIQUE COMMUNAUTAIRE ET NATIONALE APPLICABLES

3.3.1.1. LÉGISLATION EUROPÉENNE

- Règlement 1302/2014 du 18/11/2014 concernant une spécification technique d'interopérabilité relative au sous-système "matériel roulant" – "Locomotives et matériel roulant destiné au transport de passagers"

3.3.1.2. LÉGISLATION BELGE

- Loi du 30/08/2013 portant le Code ferroviaire

3.3.2. AUTRES RÈGLES, TELLES QUE LES RÈGLES D'EXPLOITATION, LES INSTRUCTIONS LOCALES, LES EXIGENCES APPLICABLES AU PERSONNEL, LES PRESCRIPTIONS D'ENTRETIEN ET LES NORMES APPLICABLES

3.3.2.1. SNCB

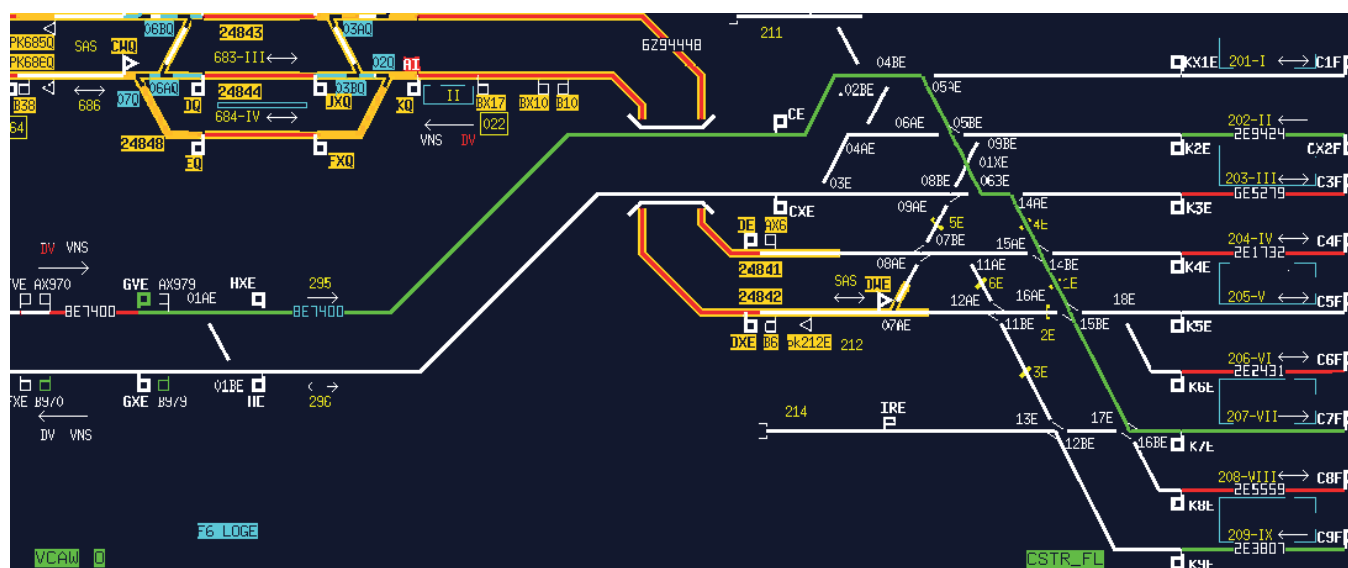
- Livret HLT Fascicule VI - Titre A : utilisation de l'équipement de freinage
Chapitre 2 : caractéristiques et desserte des équipements de frein des engins moteurs et voitures-pilotes

3.3.2.2. INFRABEL

- RGE 512, 513, 521, 613
- RSEIF 4.2

3.4. FONCTIONNEMENT DU MATÉRIEL ROULANT ET DES INSTALLATIONS TECHNIQUES

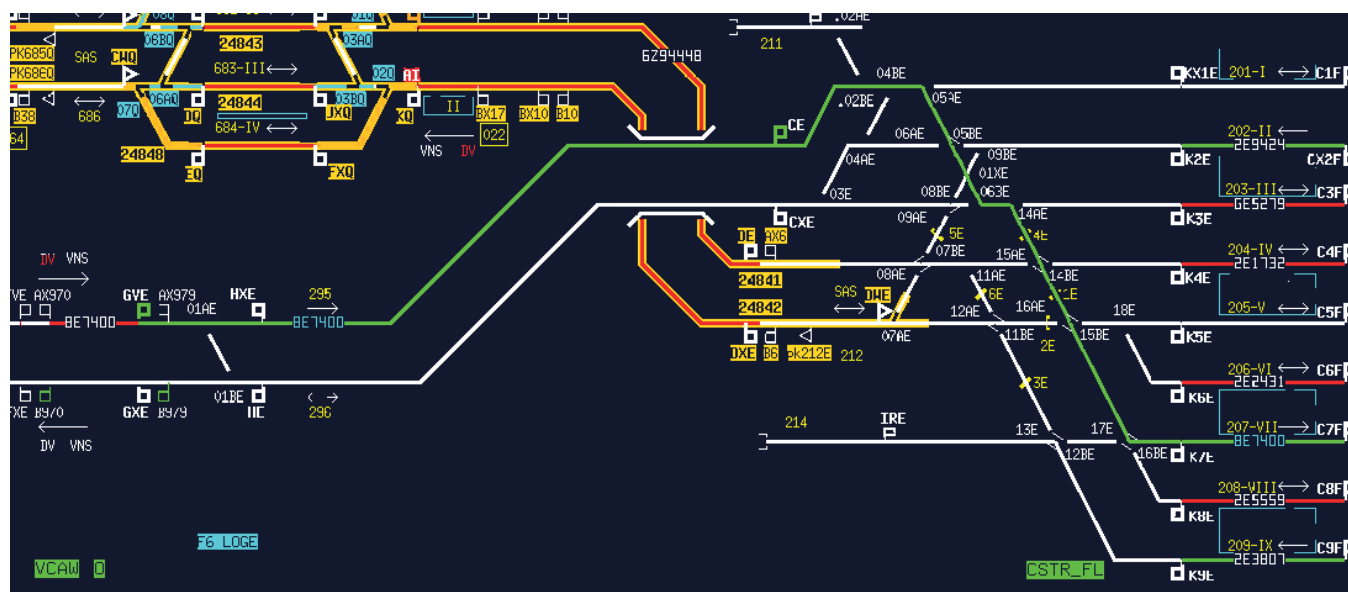
3.4.1. IMAGES EBP DU TRAJET DU TRAIN

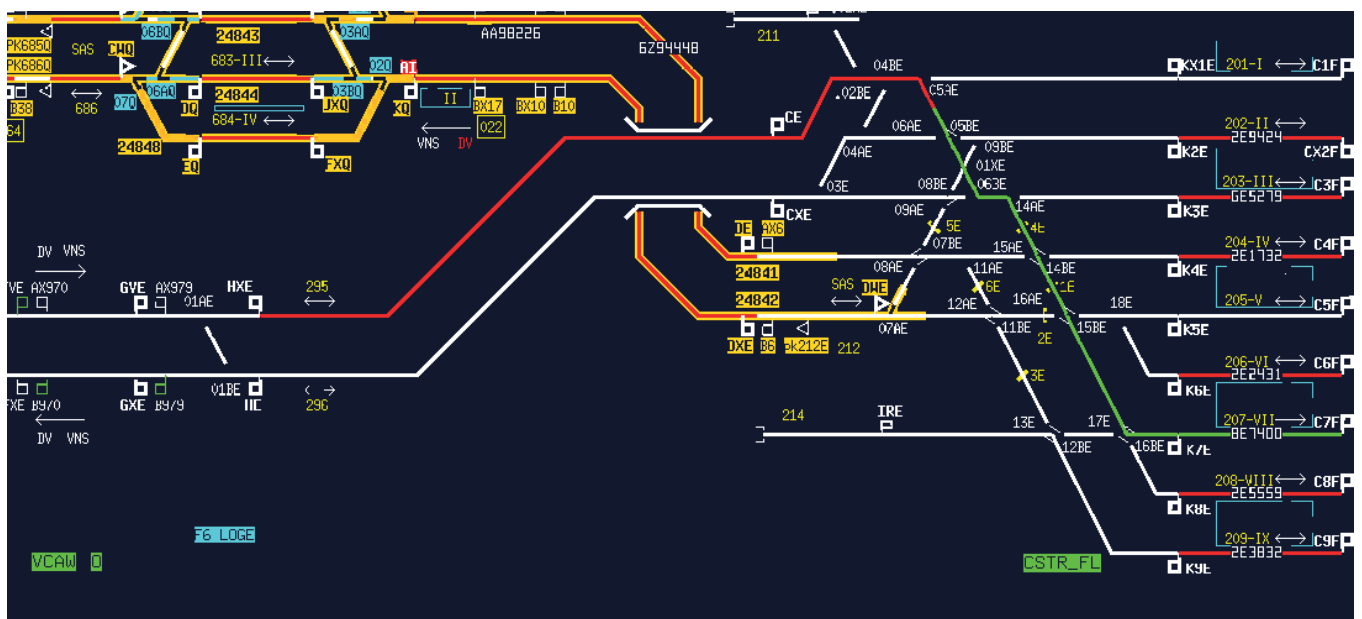
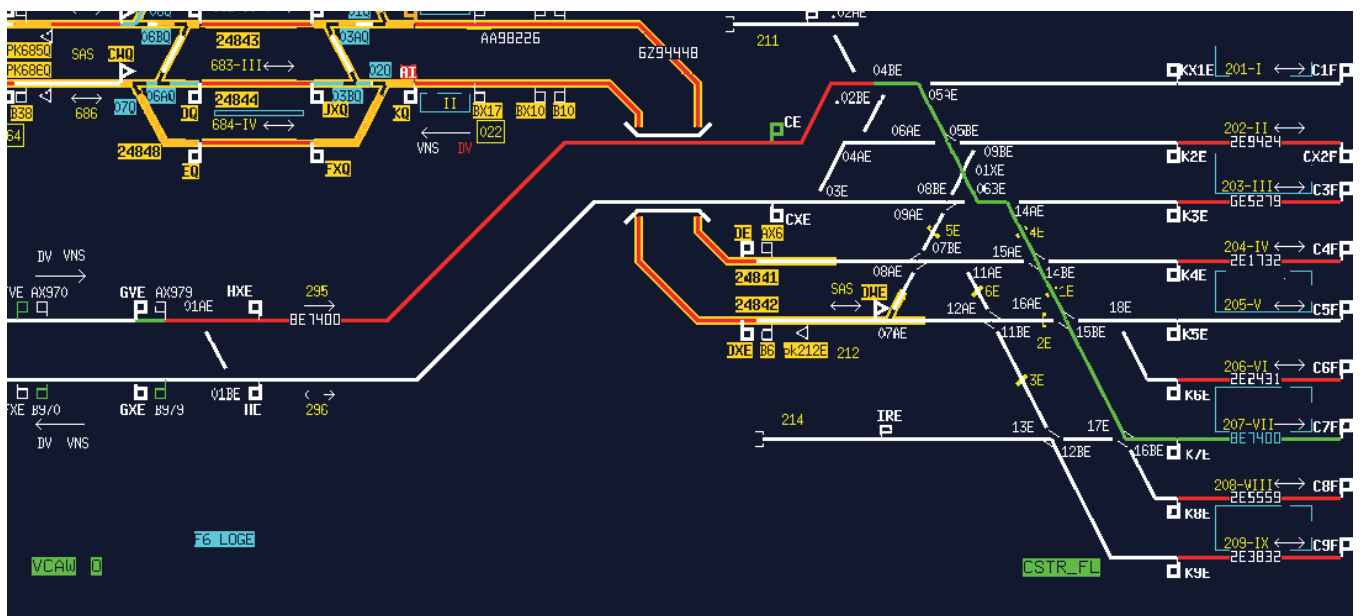
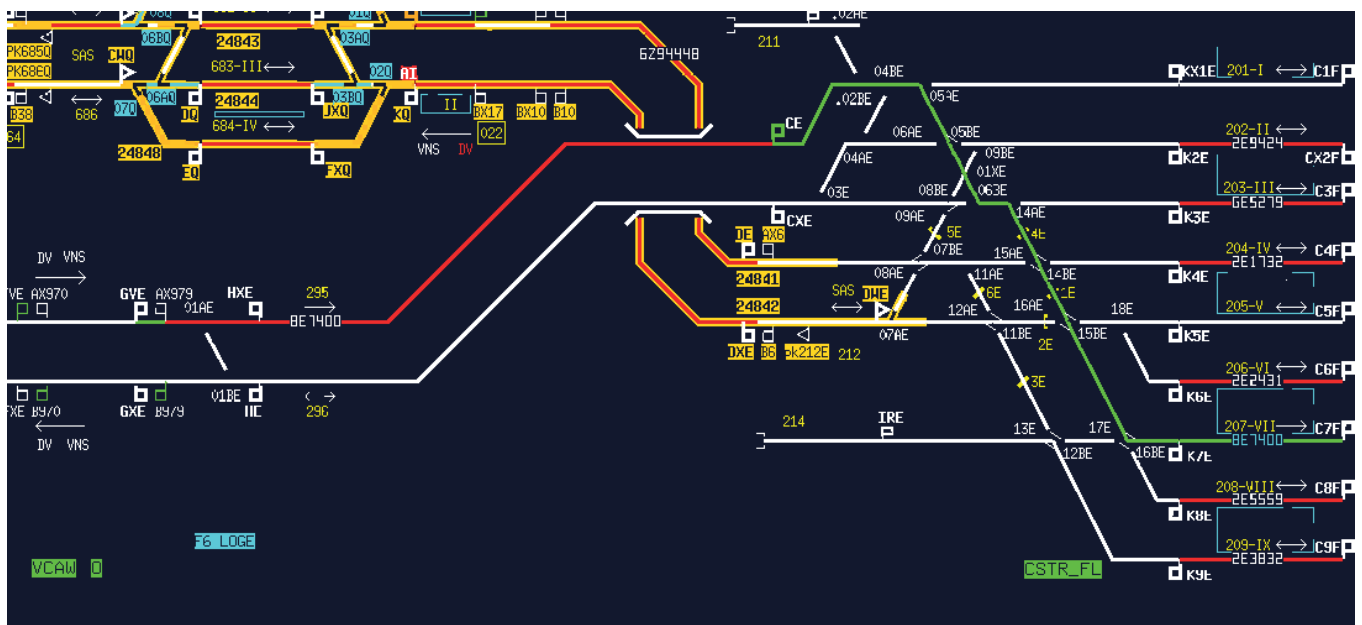


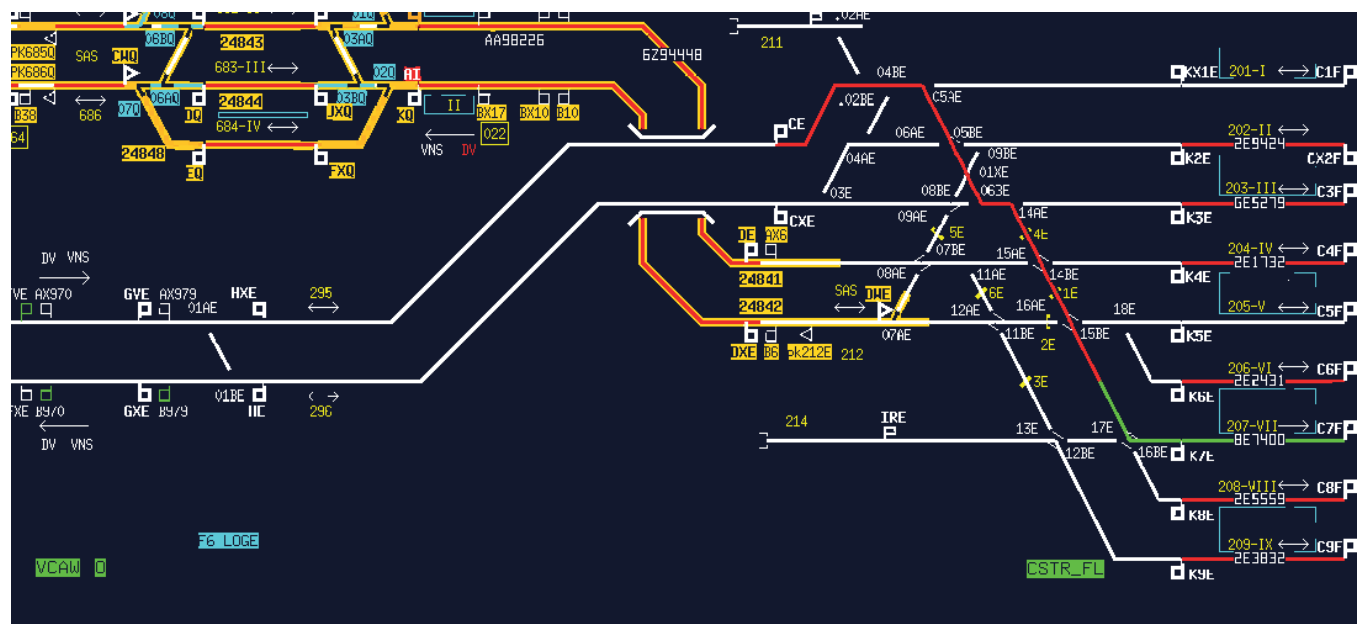
9:44.52 – L'itinéraire est tracé pour le train E7400 remorqué par la locomotive 18 en provenance de la gare de Waremme vers la voie VII de la gare de Liège-Guillemins.

Le train descend les plans (pente de la voie > 18‰) via un itinéraire qui croise la gare de Liège-Guillemins depuis la voie I vers la voie VII.

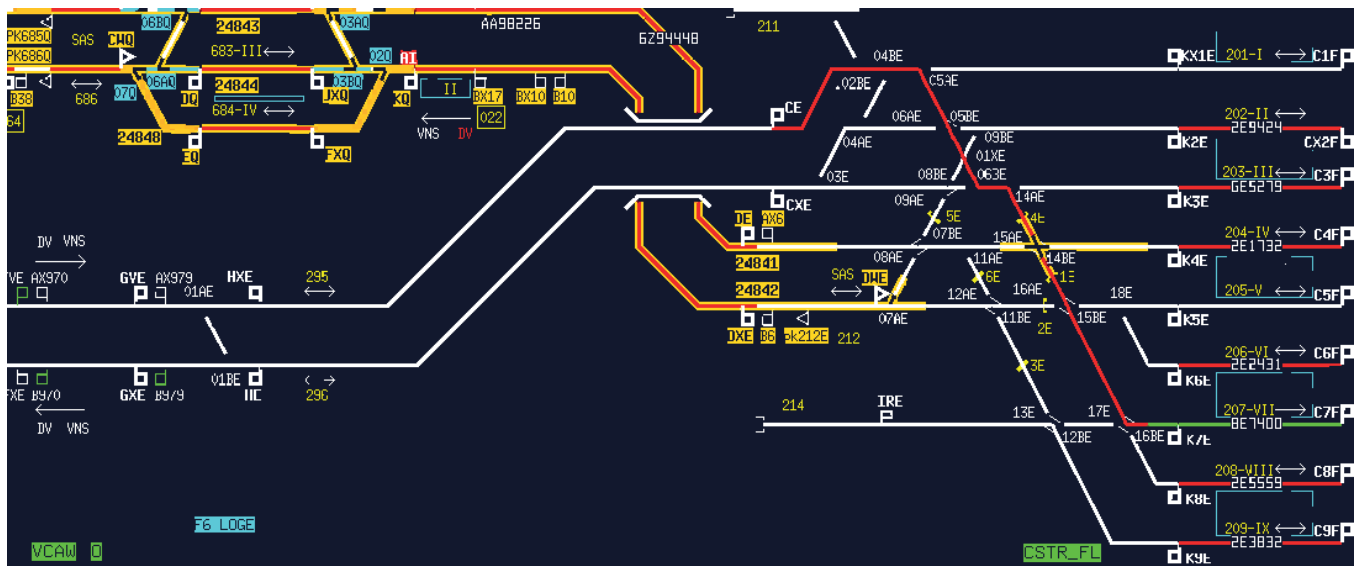
Le train parcourt l'itinéraire, occupant successivement les différentes sections (trait rouge sur les images EBP suivantes).







Lorsque survient le déraillement et la rupture d'attelage entre la locomotive 27 (se trouvant juste derrière la locomotive 18) et les voitures, l'écran EBP affiche une occupation sur la voie 4 (portion entre l'ajugillage 14BE et le signal K4E) et une perte de contrôle d'ajugillage 14BE.



3.4.2. CONTRÔLE DU MATÉRIEL ROULANT

Après l'accident, des vérifications ont été opérées sur le matériel roulant (contrôles géométriques et dimensionnels des essieux et des roues) des locomotives ainsi que des deux voitures M4 qui ont déraillé.
Un historique de ces mesures a également fait l'objet d'un contrôle.

Aucune anomalie ou valeur hors tolérance n'a été détectée dans les mesures d'écartements des roues et les profils.

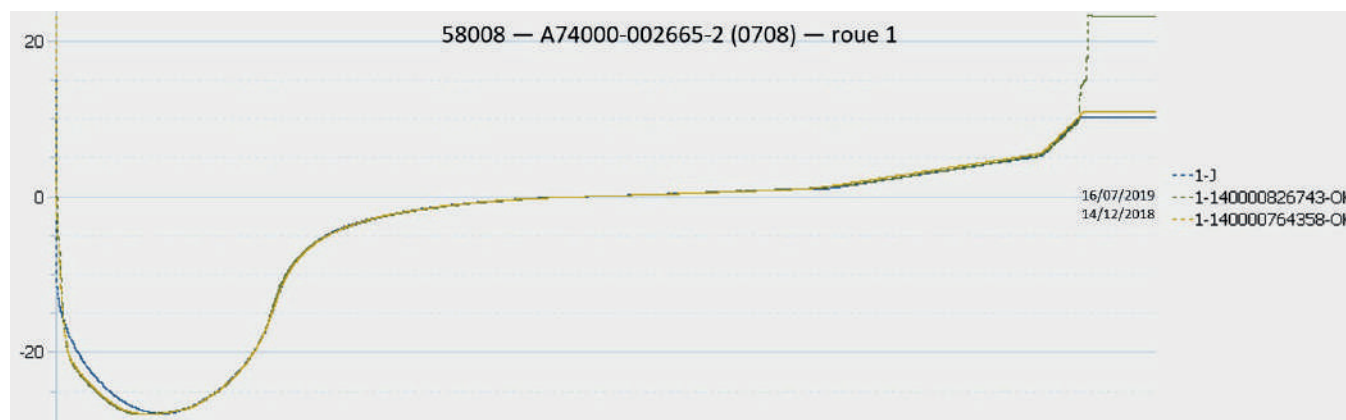


Illustration : profil de roue mesuré après l'accident (16/07/2019), comparé aux mesures effectuées le 14/12/2018

3.4.3. COMPORTEMENT DU TRAIN – ANALYSE DES DONNÉES ENREGISTRÉES À BORD

Suite aux déclenchements haute tension sur les locomotives électriques du train de voyageurs E7400 de l'entreprise ferroviaire SNCB, le train est à l'arrêt en gare de Waremme.
Après avoir tenté en vain de dépanner son train, le conducteur le déclare en détresse.

Une locomotive de type 18 est envoyée à la gare de Waremme comme élément de secours.

La locomotive 18 est placée en tête, accouplée au train en panne et un essai de frein de type A est réalisé : il est concluant.

La locomotive 18 remorque ensuite le train en panne vers la gare de Liège-Guillemins.

Les données analysées sont celles enregistrées à bord de la locomotive 18.

La locomotive de type 18 circulait en ETCS ("full supervision").

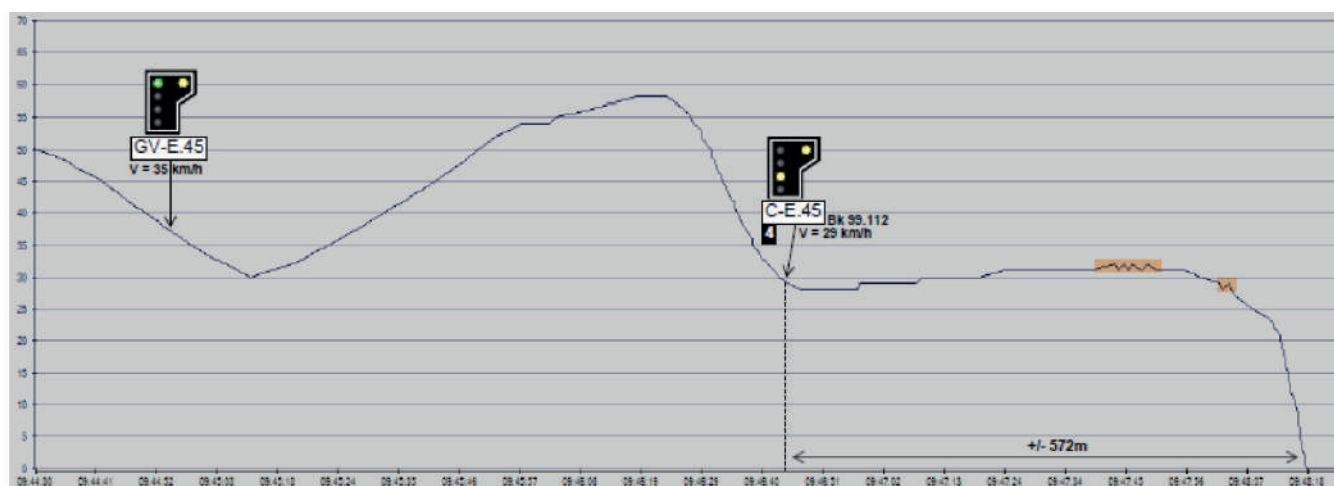


Illustration : extrait des données enregistrées à bord de la locomotive 18 : arrivée en gare de Liège-Guillemins

NB :

- le signal GV-E.45 se trouve à 1495 mètres en amont du signal C-E.45
- le signal C-E.45 se trouve à environ 650 mètres en amont des quais de la gare de Liège-Guillemins

Les enregistrements des données de la locomotive 18 ont été analysés.
De l'analyse de la dernière partie du trajet (voir illustration), il ressort que :

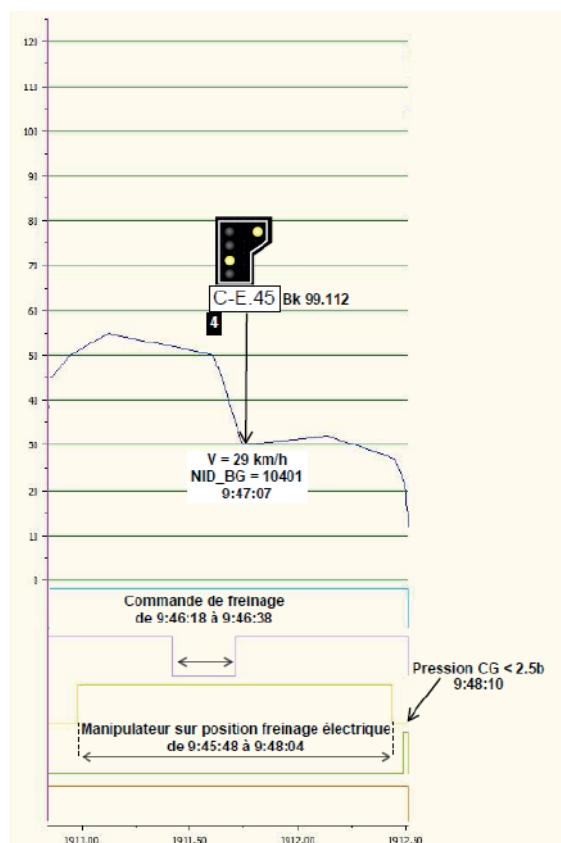


Illustration : extrait des données enregistrées à bord de la locomotive 18 : zoom sur la fin du trajet

- de 9h45:48 (environ à 300 m du signal C-E.45) à 9h48:04, le manipulateur de traction est sur la position ralentissement/freinage électrodynamique²; le système d'enregistrement à bord de la locomotive ne permet cependant pas d'enregistrer si le freinage électrodynamique est actif ni d'en mesurer l'intensité ;
- de 9h46:18 à 9h46:38, c-à-d à l'approche du signal C-E.45 présentant l'aspect Double Jaune, un freinage pneumatique est commandé ;
- la vitesse du train à partir du signal C-E.45 oscille entre 29 km/h et 32 km/h, soit une vitesse inférieure à la vitesse maximale autorisée.

L'analyse de la commande de freinage pneumatique de la dernière partie du trajet montre :

- une commande de freinage pneumatique initiée à l'approche du signal C-E.45 ;
- l'interruption de ce freinage un peu avant d'arriver au pied de ce signal ;
- l'absence de commande de freinage ensuite ;
- le freinage d'urgence (freinage pneumatique) enclenché automatiquement par la rupture d'attelage.

La zone d'aiguillages située en aval du signal C-E.45 a donc été abordée avec, comme seul frein enclenché, le frein électrodynamique de la locomotive 18, ce qui est contraire à la réglementation de l'entreprise ferroviaire (cf. Chapitre 2 du Livret HLT Fascicule VI - Titre A) :

2.4. Le frein dynamique

Le fonctionnement de cet équipement est décrit dans les brochures descriptives des engins moteurs.

L'utilisation du frein dynamique sur les locomotives comporte certains dangers liés aux **courbes de faible rayon** et aux **aiguillages pris en voie déviée**, où les efforts de compression longitudinaux peuvent conduire à des mariages de butoirs, voire des déraillements. **L'utilisation du frein dynamique seul est interdite dans ces zones lorsque la vitesse maximum autorisée y est égale ou inférieure à 40 km/h.** L'augmentation ou la diminution de l'effort du frein dynamique doit toujours se faire de façon progressive afin d'éviter les chocs et de limiter les efforts longitudinaux.

² Le frein électrodynamique est un dispositif de freinage de locomotive qui utilise les moteurs de traction de la locomotive pour freiner les essieux moteurs de la locomotive. Ce freinage fonctionne en rhéostatique et/ou en récupération selon la tension de service. Sous tension continue, si la puissance générée ne peut pas être absorbée par le réseau, la partie excédentaire est envoyée dans les résistances du frein rhéostatique. L'électronique de la locomotive sélectionne le mode le plus adapté en fonction des conditions de circulation.

Le point 1.7.3 du RSEIF 4.2 (réglementation d'Infrabel) donne des informations sur l'utilisation du frein dynamique des locomotives :

UTILISATION DU FREIN DYNAMIQUE DES LOCOMOTIVES

Lorsque l'effort maximum du frein dynamique ainsi que le gradient maximum d'augmentation ou de diminution de l'effort du frein dynamique d'une locomotive ne sont pas gérés automatiquement, l'UI donne les directives nécessaires à ses conducteurs pour que ceux-ci respectent les limites suivantes :

	Effort maximum du frein dynamique	Effort maximum du frein dynamique utilisé conjointement avec un autre frein
Une locomotive assure l'effort de traction	150 kN	105 kN
Plusieurs locomotives accouplées assurent l'effort de traction	75 kN	105 kN

	Gradient maximum lors de l'augmentation de l'effort du frein dynamique	Gradient maximum lors de la diminution de l'effort du frein dynamique
En régime P	15 kN/s	6 kN/s (*)
En régime G	6 kN/s	6 kN/s (*)

(*) = 15 kN/s en cas de défaut exigeant une coupure rapide du frein dynamique.

3.4.4. CONTRÔLE DE L'INFRASTRUCTURE

Pour entrer en gare de Liège-Guillemins, le trajet prévu pour le train E7400 emprunte les aiguillages suivants : 05AE – 06AE – 06BE – 14AE – 15AE – 16AE - 16BE

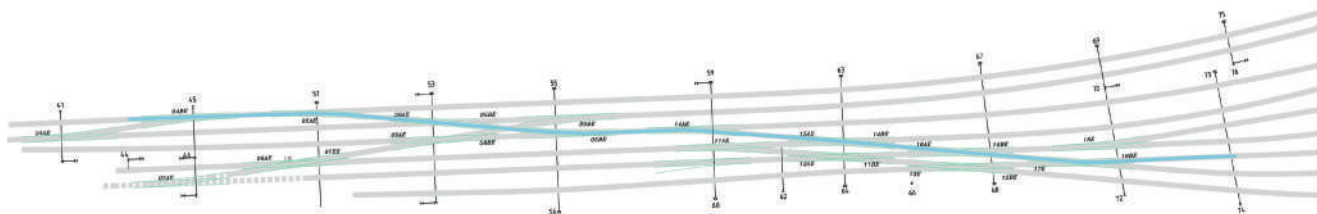


Illustration : en bleu, le tracé prévu pour le train E7400

3.4.4.1. SITUATION LORS DES CAMPAGNES DE MESURES ET DES CONTRÔLES PÉRIODIQUES

Appareil de voie 05AE

Le dernier contrôle de cet appareil de voie date du 16/03/2019.
Les mesures effectuées sont dans les tolérances.

Appareil de voie 06AE

Le dernier contrôle de cet appareil de voie date du 28/05/2019.
Les mesures effectuées révèlent un défaut de nivellement transversal, mais qui ne nécessite pas d'intervention immédiate.

Appareil de voie 06BE

Le dernier contrôle de cet appareil de voie date du 13/05/2019.
Les mesures effectuées révèlent une côte de protection légèrement inférieure aux normes, corrigée le 20/05/2019 (soit avant le déraillement).

Appareil de voie 14AE

Le dernier contrôle de cet appareil de voie date du 16/03/2019.
Les mesures effectuées révèlent :

- une côte de protection légèrement inférieure aux normes, corrigée le 05/06/2019 (soit avant le déraillement).

Le contrôle visuel de l'appareil de voie révèle :

- un défaut de surface (écaillage) sur les 2 aiguilles (priorité d'intervention basse) ;
- un défaut de bavure sur les 2 aiguilles (priorité d'intervention basse).

Ces 2 derniers défauts ont été corrigés le 12/09/2019 (soit après le déraillement).

Appareil de voie 15AE

Il s'agit d'une Traversée Jonction Double (TJD).

Le dernier contrôle de cet appareil de voie date du 27/05/2019.

Les mesures effectuées et le contrôle visuel ne révèlent pas d'anomalie sur les branches de la TJD empruntée par le train.

Appareil de voie 16AE

Il s'agit d'une Traversée Jonction Double (TJD).

Le dernier contrôle de cet appareil de voie date du 14/05/2019.

Sur le trajet emprunté par le train, Les mesures effectuées sur de l'appareil de voie révèlent :

- une côte de protection d'un des cœurs de croisement légèrement inférieure aux normes, corrigée le 27/06/2019 (soit avant le déraillement).

Le contrôle visuel de l'appareil de voie révèle :

- des défaut de surface (écaillage et bavures) sur des aiguilles ;

Le remplacement partiel de l'aiguillage avait été planifié par Infrabel pour le 28/08/2019.

Appareil de voie 16BE

Le dernier contrôle de cet appareil de voie date du 02/04/2019.

Les mesures effectuées sont dans les tolérances.

Le contrôle visuel de l'appareil de voie révèle :

- une côte de protection légèrement inférieure aux normes, corrigée le 05/06/2019 (soit avant le déraillement)
- un défaut de surface (écaillage) sur les 2 aiguilles (priorité d'intervention basse) ;
- un défaut de bavure sur les 2 aiguilles (priorité d'intervention basse).

Ces 2 derniers défauts ont été corrigés le 12/09/2019 (soit après le déraillement).

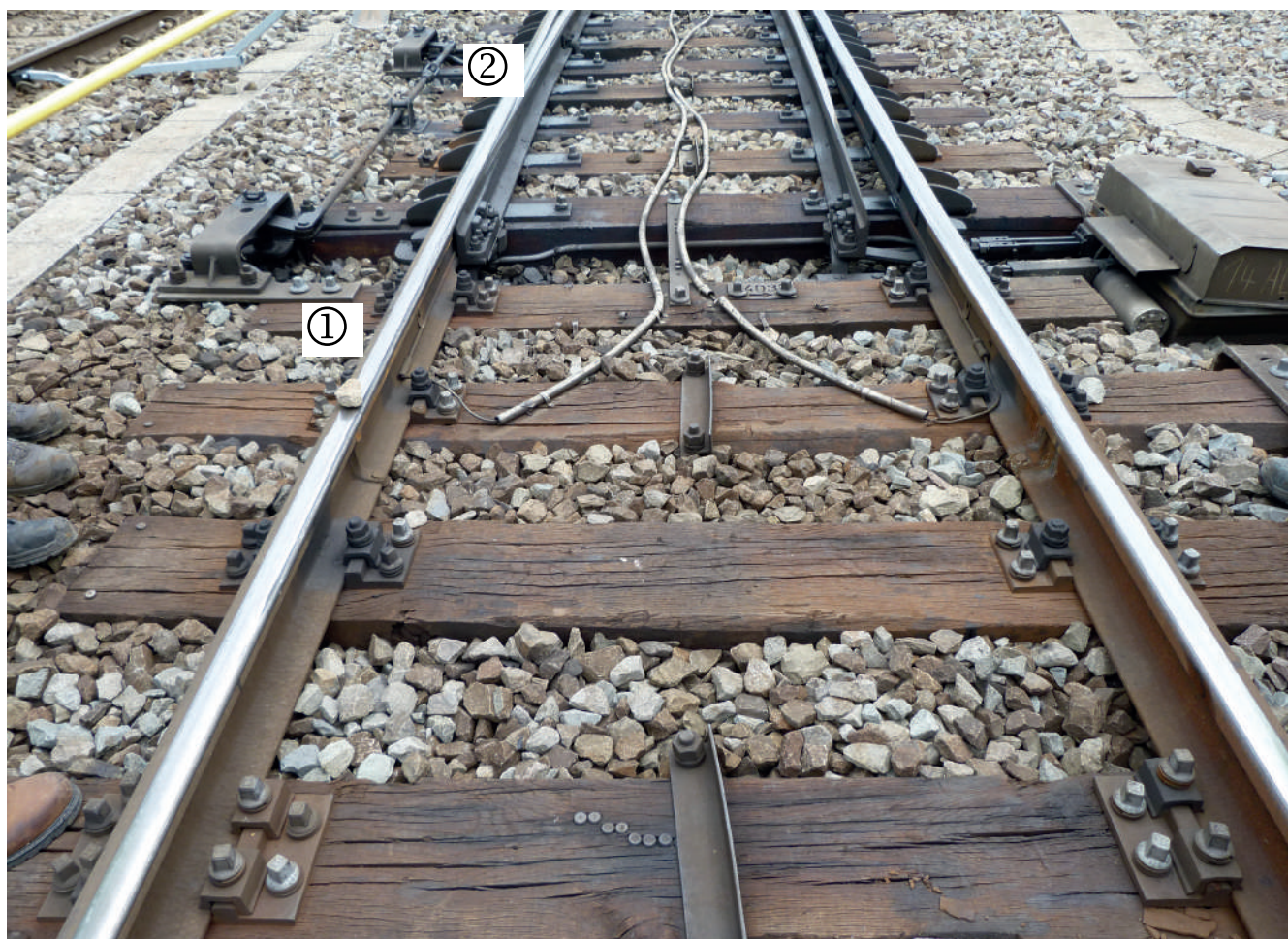
Des différents contrôles, il ressort que l'infrastructure respecte les prescrits réglementaires en matière de cotes à respecter.

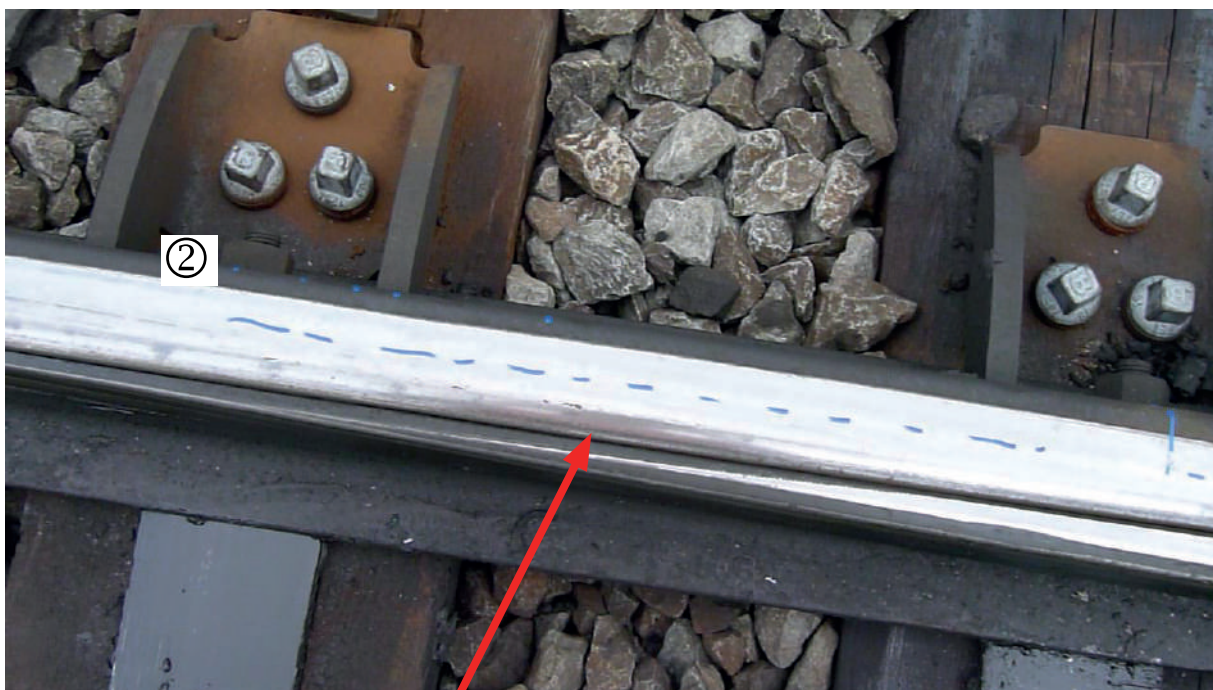
3.4.4.2. CONTRÔLE DE LA VOIE POST-DÉRAILLEMENT : POINT DE DÉRAILLEMENT

L'inventaire des traces dans les voies montre :

- ① des traces dans la zone entre l'aiguillage 06BE et l'aiguillage 14AE
- ② des traces sur l'aiguille et les rails de l'aiguillage 14AE
- des traces de dégâts dus au passage des roues dans l'aiguillage 14AE et en aval de cet aiguillage

L'hypothèse retenue par l'Organisme d'Enquête est que, dans l'aiguillage 14AE, la roue gauche du premier essieu du premier bogie de la première voiture M4 a été soulevée (aucune trace d'escalade de la roue n'a été constatée) et a roulé sur le champignon du rail, pour ensuite retomber entre l'aiguille ouverte et le rail.





En rouge : le trajet suivi par le bogie déraillé (au lieu de suivre l'aiguillage en position droite).

Selon cette hypothèse, les traces observées en amont du point ② (dont celles observées au point ①) ont été causées par les roues des bogies suivants, qui ont suivi le mouvement de déraillement du premier bogie.

3.5. EXPERTISE

Au terme d'un marché public, l'Organisme d'Enquête a désigné la société d'expertise externe Mastéris afin qu'elle réalise une analyse des facteurs et des efforts auxquels a été soumis le train lors de son entrée en gare de Liège-Guillemins, et qu'elle conduise une simulation informatique sur la dynamique du train, afin de mettre en évidence la conjonction de facteurs ayant pu contribuer au déraillement.

Toutes les données nécessaires à l'étude de Mastéris, et plus particulièrement pour la simulation avec le logiciel de dynamique ferroviaire, n'étaient pas disponibles.

C'est pourquoi, à la demande de l'Organisme d'Enquête, la société Mastéris a fait varier divers paramètres lors de ses analyses et simulations, sur base des éléments mis à sa disposition et sur base de sa propre expertise et expérience.

Diverses réunions d'information et d'explications ont eu lieu avec les parties concernées : Mastéris y a présenté sa méthodologie et ses analyses. Mastéris a également donné des explications sur la simulation informatique : le train complet a été modélisé et des premiers calculs effectués. Mastéris a ensuite élaboré un modèle réduit du train et refait les premiers calculs : les résultats obtenus avec le modèle réduit étaient similaires à ceux obtenus avec le modèle complet. Utiliser le modèle réduit était donc sans impact sur les résultats mais permettait de gagner du temps de calculs-machines : toutes les simulations ont donc été effectuées avec le modèle réduit.

Conformément aux procédures utilisées dans le cadre des enquêtes de l'Organisme d'Enquête, les parties concernées ont pu émettre des commentaires tant sur l'analyse que sur les présentations utilisées lors des réunions ainsi que sur le rapport d'enquête et les livrables de Mastéris. Il a été tenu compte de ces remarques ; des remarques font également l'objet d'une publication dans les annexes de ce rapport.

Les présentations utilisées lors des réunions avec Mastéris n'ont qu'un usage interne et limité au cadre de ces réunions (elles ne sont d'ailleurs pas publiées dans ce rapport d'enquête) : leur utilisation et leur reproduction dans tout autre cadre ne sont pas autorisées.

Les livrables de Mastéris sont annexés à ce rapport : ils ne peuvent ni être dissociés de ce rapport d'enquête, ni être reproduits partiellement, ni être utilisés à d'autres fins que celles pour lesquelles ils ont été élaborés par Mastéris dans le cadre de l'analyse demandée par l'Organisme d'Enquête.

Le résultat de ce travail collaboratif entre les parties concernées, Mastéris et l'Organisme d'Enquête est une étude qui, bien qu'elle ne détermine pas le scénario exact de l'accident survenu à Liège-Guillemins le 11 juillet 2019, permet d'identifier des paramètres qui, conjugués, peuvent avoir une influence sur le déraillement. Aucune priorisation n'est à voir dans l'énoncé de ces facteurs : c'est bien dans leur conjonction qu'il faut y trouver un risque accru d'un déraillement.

Les livrables délivrés par la société Mastéris sont annexés à ce rapport d'enquête et détaillent in extenso les explications et calculs.

3.6. MESURES PRISES POUR PROTÉGER ET SAUVEGARDER LE SITE DE L'ÉVÉNEMENT

- A 09h48, le conducteur du train E1732, à l'arrêt voie IV en gare de Liège-Guillemins, constate le déraillement et lance une alarme GSMR.
- A 09h49, le Traffic Control informe le block 45. Les circulations sont interrompues entre Liège Guillemins et Ans.
- A 09h53, le TC informe le répartiteur ES de Liège et le SOC. Le répartiteur ES fait appliquer les couvertures des cas du tableau I ligne 36 pour toute circulation (14203 - 14204 - 14801 – 14802).
- A 10h07, le TC active le plan d'urgence et d'intervention HR-Rail.
- A 10h48, le répartiteur ES demande l'application des couvertures de cas du tableau II :
 - Ligne 36 (24257, 24264, 24265, 24266 et 24270)
 - ligne 34 (24830, 24835, 24836, 24839 et 24840).Le block 45 les applique.

Levée progressive des protections

- A 10h51, les couvertures des cas du tableau I sont levées. La circulation à Ans est rétablie. Toute les voies à Liège Guillemins sont accessibles en cul de sac côté Ans. La circulation entre Liège Guillemins et Ans reste interrompue.
- A 11h56, le répartiteur ES autorise la levée du cas 24257 TII L.36 (voie A ligne 36 entre Ans et Liège).
- A 15h16, les couvertures des cas 24264 et 24270 L36 sont levées.
- A 15h29, les couvertures du cas 24265 ligne 36 sont également levées.

Mesures prises 17/07/2019:

- A14:08, levée des couvertures des cas 24835, 24836, 24839 et 24840 L.36.

Fin des travaux

Le 19/07/2019, à 16:34, la remise en état des voies est terminée.

4. ANALYSE ET CONCLUSIONS

4.1. COMPTE RENDU FINAL DE LA CHAÎNE D'ÉVÉNEMENTS

Le jeudi 11 juillet 2019, suite à un problème technique (déclenchements haute tension sur les locomotives électriques du train) au train de voyageurs E7400 de l'entreprise ferroviaire SNCB, le train est à l'arrêt en gare de Waremme et le débarquement des voyageurs est organisé. Après avoir tenté en vain de dépanner son train, le conducteur le déclare en détresse. Le train E7400 est composé d'une locomotive électrique de type 27, suivie de 11 voiture M4 et d'une locomotive électrique de type 27 en queue de train.

Une locomotive de type 18 est envoyée comme élément de secours à la gare de Waremme afin de remorquer le train en panne vers la gare de Liège-Guillemins.

Lors de l'accouplement de la locomotive 18 avec le train à remorquer, l'agent de triage connecte les 2 conduites pneumatiques (la Conduite Automatique et la Conduite de Frein Automatique) de la locomotive 18 de secours avec les conduites pneumatiques de la rame à remorquer. L'essai de frein de type A est ensuite effectué et est concluant : la continuité des CA et CFA est assurée sur toute la longueur du convoi.

En outre, entre la locomotive 18 et le train à remorquer :

- le câblot pour l'alimentation électrique de la ligne de train (3000V) n'est pas relié ;
- le câblot du frein électropneumatique (EP) (110 V) n'est pas relié.

Le frein automatique est fonctionnel en cas de serrage ou de desserrage commandé depuis la locomotive 18. Le câblot du frein EP, qui permet d'accélérer les commandes de serrage et desserrage du frein sur tout le train, n'est pas relié entre la locomotive 18 et le train à remorquer : cela n'entrave pas le fonctionnement du frein pneumatique, tant au serrage qu'au desserrage.

En cas de freinage d'urgence ou de désaccouplement intempestif, le frein s'applique automatiquement sur l'ensemble du train.

Peu après 9:45, le train approche la zone d'aiguillages à l'entrée de la gare de Liège-Guillemins par la voie I, à une vitesse oscillant entre 29 et 32km/h. Le trajet prévu aiguille le train vers la voie VII.

Durant la descente des plans à l'entrée de la gare de Liège-Guillemins, le conducteur n'utilise que le frein dynamique (rhéostatique) de sa locomotive, à l'encontre de ce que prévoit la réglementation interne de l'entreprise ferroviaire.

Vers 9:48, la locomotive 18 qui assure le remorquage et la première locomotive 27 empruntent l'aiguillage 06BE et ensuite l'aiguillage 14AE. La première voiture M4 du train déraile à hauteur de ces aiguillages, suivie par la deuxième et la troisième voiture. Les deux locomotives de tête poursuivent sur l'itinéraire prévu, tandis que les trois premières voitures continuent de dérailler.

Une rupture d'attelage survient entre la locomotive 27 en tête du train et la première voiture, entraînant la rupture de la conduite de frein automatique et un freinage d'urgence.

Les 2 locomotives de tête d'une part et les voitures M4 et la locomotive de queue d'autre part s'immobilisent.

Depuis les quais de la gare, un conducteur d'un train à l'arrêt voit le déraillement et lance une alarme GSM-R.

4.2. CONCLUSION

L'OE n'avait pas envisagé d'enquêter sur ce déraillement, qui ne répond ni à la définition d'accident grave ni à celle d'accident significatif.

Cependant, lors d'une réunion où les premiers éléments récoltés par la SNCB et Infrabel ont été présentés, l'OE s'est rendu compte :

- que l'analyse de ce déraillement à faible vitesse à l'entrée de la gare de Liège Guillemins se révélait plus complexe qu'il n'y paraissait,
- qu'il n'y avait pas de consensus entre les deux parties.

Suite à la qualification de l'accident, les mesures relevées sur site avaient été peu nombreuses et concernaient :

- l'état de la voie,
- le matériel roulant,
- les bandes d'enregistrements du train.

De plus, lorsque les enquêteurs de l'OE sont arrivés sur le site de l'accident, certains éléments liés au matériel roulant (crochet d'attelage, boyaux pneumatiques) avaient été modifiés sans faire l'objet d'un enregistrement ou d'une photo, contrairement à ce qui est précisé à l'article 8 de l'arrêté royal du 16 janvier 2007 fixant certaines règles relatives aux enquêtes sur les accidents et incidents ferroviaires.

L'OE a analysé les diverses données : elles se sont révélées dans les normes et tolérances, et l'analyse des divers facteurs pris séparément ne pouvait expliquer le déraillement.

Au terme d'un marché public, l'OE a désigné la société d'expertise externe Mastéris afin qu'elle réalise une analyse des facteurs et des efforts auxquels a été soumis le train lors de son entrée en gare de Liège-Guillemins, et qu'elle conduise une simulation informatique sur la dynamique du train, afin de mettre en évidence la conjonction de facteurs ayant pu contribuer au déraillement.

Dans un premier livrable, la société Mastéris a établi :

- un scénario reprenant l'ensemble des facteurs contributifs ;
- le calcul des efforts générés.

Toutes les données nécessaires à l'étude de Mastéris, et plus particulièrement pour la simulation avec le logiciel de dynamique ferroviaire, n'étaient pas disponibles. C'est pourquoi, à la demande de l'OE, la société Mastéris a fait varier divers paramètres lors de ses analyses et simulations sur base des éléments mis à sa disposition, dans le but d'identifier les facteurs d'influence.

Nonobstant la gravité des conséquences d'un accident, dans le cadre d'un déraillement de train de voyageurs en voie principale, les parties concernées devraient récolter toutes les données utiles concernant l'infrastructure, le matériel roulant et les actes posés par les opérateurs permettant de déterminer les facteurs ayant contribué à la survenance de l'accident. Le relevé de l'ensemble des données sur le site de l'accident aurait permis une simulation plus proche de la situation réelle.

Les résultats des simulations réalisées par Mastéris sont repris dans le second livrable de Mastéris.

Une première simulation avec les paramètres nominaux (rail neuf, voie parfaite sans défaut, caractéristiques du train au nominal) a montré que la zone de déraillement est une zone sensible vis-à-vis de deux critères de déraillement :

- le soulèvement de roue (dz)
- le ratio des efforts de contact roue-rail (Y/Q).

Les études paramétriques réalisées ont permis de tirer des conclusions, dont les suivantes :

- L'entrée de la zone 14AE, zone identifiée comme étant là où le déraillement s'est déroulé, est bien la zone la plus critique sur le parcours, et ce y compris avec une voie sans défaut, un train nominal et un effort de freinage rhéostatique faible par la locomotive de tête.
- Un rail sec augmente le risque de déraillement.
- Le profil du rail a un impact sur le risque de déraillement, qu'il soit ou non combiné à un effort de freinage.
- L'augmentation de l'écartement de la voie contribue à augmenter notablement le risque de déraillement quand celui-ci est combiné à un effort de freinage rhéostatique élevé par la locomotive de tête.
- Les défauts de gauche liés à la déformation du bogie et/ou de la voie, cumulés avec l'usure de rail et un effort de freinage rhéostatique élevé par la locomotive de tête peuvent faire dérailler le train dans la zone étudiée.

L'étude réalisée par Mastéris montre que la zone où le train a déraillé est particulièrement sensible en comparaison à la zone d'aiguillage précédente et que le cumul de divers facteurs d'influence (effort de freinage dynamique, écartement de voie supérieur à la valeur nominale, défaut de gauche, profil de rail usé, coefficient de frottement) est de nature à atteindre ou dépasser les critères de déraillement.

5. MESURES PRISES

5.1. MESURES PRISES PAR LA SNCB

Il a été décidé de rappeler les instructions relatives à l'utilisation du frein par le conducteur (publication au Livre d'Ordre n° 4, avis 19030 du 01/08/2019).

6. RECOMMANDATIONS

Au terme de l'enquête, l'Organisme d'Enquête n'émet aucune recommandation suite au déraillement survenu le 11 juillet 2019 à l'entrée de la gare de Liège-Guillemins.

7. ANNEXES

7.1. LIVRABLE 1 DE MASTÉRIS : "ANALYSE DES FACTEURS CONTRIBUTIFS ET CALCUL DES EFFORTS GÉNÉRÉS"

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2021-2446	Version 4 du 13/02/2023	Lot 1 : Analyse des facteurs contributifs et calcul des efforts générés	3/20

SYNTHESE

Dans le cadre d'une enquête ouverte suite à un déraillement d'un train de voyageurs (à vide) de la SNCB survenu en gare de Liège-Guillemins le 7 juillet 2019, l'Organisme d'Enquête sur les Accidents et les Incidents Ferroviaires (ci-après, « l'OE ») a rassemblé et réalisé une première analyse de diverses données concernant l'état de la voie, le matériel roulant et la circulation. Partant de ces données, la présente mission est composée de deux lots :

- Lot 1 : Analyse des facteurs contributifs et calcul des efforts générés.
- Lot 2 : Simulation numérique du comportement dynamique du véhicule déraillé sur la zone de déraillement.

Le présent document est le livrable du lot 1. Dans ce livrable, nous commençons par une analyse sur la conformité de l'infrastructure. Pour cela, le tracé du parcours emprunté par le train déraillé est d'abord reconstitué sur Autocad en prenant en compte les éléments entre les appareils de voie, les rayons de voies déviées empruntées, ainsi que les angles de déviation présents en pointe des aiguillages. Un premier calcul de déport géométrique des tampons est ensuite réalisé. Au vu des résultats, l'itinéraire emprunté par le train ne présente pas de tracé sinueux non-conforme. Par ailleurs, les autres paramètres de tracé sont conformes. Le déraillement n'est à priori pas dû au tracé théorique.

Une analyse complémentaire sur le risque d'enchevêtrement des plateaux de tampons a été poursuivie en ajoutant les jeux caisse-bogie et bogie-voie maxi disponibles. La valeur de déport maximal atteint reste encore inférieure à la valeur limite du risque d'enchevêtrement. Cependant, sur la base des nouveaux éléments de configuration de voie analysés, l'hypothèse que l'enchevêtrement des plateaux de tampon soit intervenu avant le déraillement et ait entraîné par la suite le déraillement reste peu probable.

En ce qui concerne le scénario de freinage, deux approches indépendantes sont utilisées afin de confirmer que 100% du freinage électrique de la locomotive HLE18, soit un effort d'environ 150 kN, a été appliqué avant le déraillement. Ce freinage électrique permettrait de maintenir la vitesse du train autour de 30 km/h sur la pente de la zone de déraillement. Le déraillement a eu lieu a priori vers la fin de la pente, au niveau d'un aiguille, au début d'une contre-courbe de rayon 215 m. Une simulation numérique de la circulation du train sur cette zone identifiée sera réalisée dans le lot 2.

Enfin, le logiciel TrainDy est utilisé pour calculer les efforts de compression générés en considérant le scénario de freinage identifié et la géométrie de la zone de voie de déraillement. Cependant, les résultats ne permettent pas de mettre en évidence que les sollicitations longitudinales en compression sont les seules responsables du déraillement à ce stade de l'analyse. En effet les ELC calculés (130 kN ou 200 kN en valeur haute) restent très en deçà du critère empirique retenu dans le cadre du lot 1. Le lot 2 permettra de confirmer cette hypothèse ou d'en déterminer d'autres pour expliquer l'événement du déraillement de Liège.

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2021-2446	Version 4 du 13/02/2023	Lot 1 : Analyse des facteurs contributifs et calcul des efforts générés	4/20

SOMMAIRE

1	OBJET	5
1.1	Question posée – problématique	5
1.2	Client – Référence de la demande	5
2	ANALYSE DE LA VOIE	6
2.1	Reconstitution du tracé	6
2.2	Calcul du déport géométrique entre 2 véhicules.....	6
2.3	Analyse des appareils de voie	7
2.4	Conclusion sur la voie	7
3	ANALYSE SUR LE RISQUE D'ENCHEVETREMENT DE PLATEAUX DE TAMPON	8
3.1	Base normative	8
3.2	Analyse complémentaire sur le risque d'enchevêtrement de plateaux tampon	9
3.3	Conclusion concernant le risque d'enchevêtrement de plateaux de tampon.....	9
4	ANALYSE DU SCENARIO DE FREINAGE	10
4.1	Profil de voie en long pris en compte dans les calculs de freinage.....	10
4.2	Calcul des efforts de freinage	10
5	ANALYSE EN DYNAMIQUE LONGITUDINALE	12
5.1	Explications générales sur les risques de déraillement et de rupture d'attelage.....	12
5.1.1	Critères utilisés pour l'analyse des risques de rupture d'attelage dans le cadre du déraillement de Liège	12
5.1.2	Critères utilisés pour l'analyse des risques de déraillement des trains de fret.....	13
5.1.3	Adaptation des critères de risque de déraillement au cas du déraillement de Liège	14
5.2	Simulation 1D du convoi.....	14
5.2.1	Outil utilisé pour l'analyse	14
5.2.2	Hypothèses/données d'entrées	15
5.2.3	Résultats des calculs.....	16
5.2.4	Synthèse de la section 5	19
6	CONCLUSIONS	20
6.1	Réponse à la question posée.....	20

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2021-2446	Version 4 du 13/02/2023	Lot 1 : Analyse des facteurs contributifs et calcul des efforts générés	5/20

1 Objet

1.1 Question posée – problématique

Dans le cadre d'une enquête ouverte suite à un déraillement d'un train de voyageurs (à vide de 304m, 608T, 11 voitures M4 + 2 locomotives HLE27 à 2 extrémités), tracté par une locomotive HLE18 (figure 1 et 2), de la SNCB survenu en gare de Liège-Guillemins le 7 juillet 2019, l'Organisme d'Enquête sur les Accidents et les Incidents Ferroviaires (ci-après, « l'OE ») a rassemblé et réalisé une première analyse de diverses données concernant :

- l'état de la voie (tracé, profil en long, rayons de courbure, règles applicables,...),
- le matériel roulant (tampons, roues, masses, type de bogies,...),
- les bandes d'enregistrements du train (distances, vitesse, freinage),
- la maintenance tant de la voie et des appareils de voie que du matériel roulant.

HLE27	52419	52053	52298	51004	52393	52392	51007	52339	52085	52363	58008	HLE27	HLE18
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Figure 1 : Configuration du train

Partant des données analysées par l'OE et mise à disposition au début de la présente prestation, la mission est composée de deux lots :

- Lot 1 : Analyse des facteurs contributifs et calcul des efforts générés. Ce lot consiste à vérifier dans un premier temps la conformité de l'infrastructure (tracé et pose des appareils de voie) et du matériel roulant déraillé (tampons, système d'attelage). Puis, une reconstitution du scénario de freinage sera proposée. Enfin, un calcul des efforts générés sera réalisé en utilisant le logiciel dédié TrainDy.
- Lot 2 : Simulation numérique du comportement dynamique du véhicule déraillé sur la zone de déraillement. Ce lot consiste à modéliser et simuler le mouvement du véhicule sur la zone de déraillement en prenant en compte les données issues du lot 1 (efforts générés, caractéristiques de l'infrastructure et du matériel roulant). Cela permettra d'étudier le soulèvement des roues par rapport au rail qui pourrait causer le déraillement dans une zone particulière de l'infrastructure (avec des appareils de voie).

Le présent document est le livrable du lot 1.

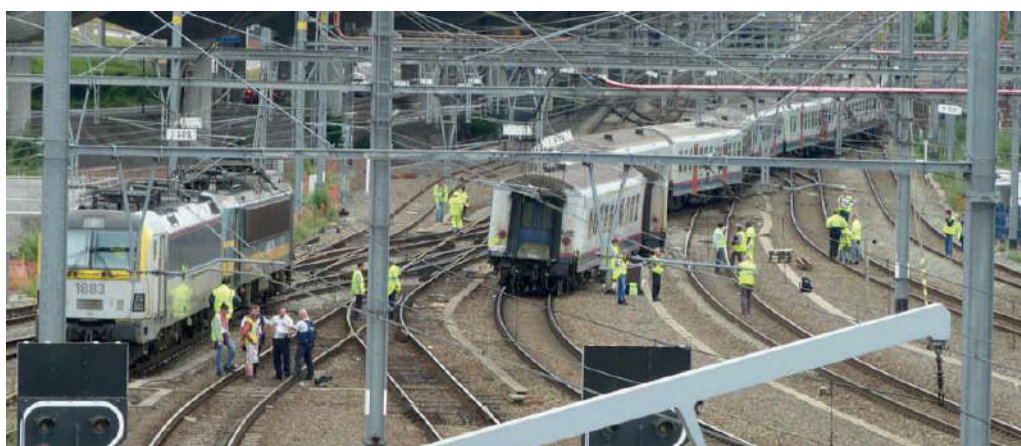


Figure 2 : déraillement des voitures

1.2 Client – Référence de la demande

Le client final de cette affaire est l'Organisme d'Enquête sur les Accidents et les Incidents Ferroviaires belge. Commande MASTERIS No. 000012375, le 06/04/2021

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2021-2446	Version 4 du 13/02/2023	Lot 1 : Analyse des facteurs contributifs et calcul des efforts générés	6/20

2 Analyse de la voie

L'analyse du tracé consiste à vérifier que la voie prise par les véhicules ne montre pas de tracé sinueux non-conforme. En effet, un tracé sinueux (tracé constitué d'une courbe suivie d'une contre courbe, avec des rayons faibles) présente un risque d'enchevêtrement des tampons, et ainsi de déraillement. L'analyse est faite sur le tracé théorique. Nous n'avons pas les mesures de défaut géométriques, ils ne sont donc pas pris en compte.

2.1 Reconstitution du tracé

Le tracé a été reconstitué sur Autocad en prenant en compte les éléments entre les appareils de voie, les rayons de voies déviées empruntées, ainsi que les angles de déviation présents en pointe des aiguillages.

Le tracé est constitué d'un groupe de 3 appareils de voie (BS 5AE), TJS 6AE/5BE et BS 6BE), un alignement de 8,12 m environ entre les points du BS 6BE et du BS 14AE, puis d'un groupe de 4 appareils de voie (BS 14AE, TJD 15AE/14BE, TJD 16AE/15BE et TJD 17E/16BE) et enfin un raccordement progressif amène vers la courbe de rayon de 350m qui arrive au niveau des quais voie 7 (voir figure 3 ci-dessous).

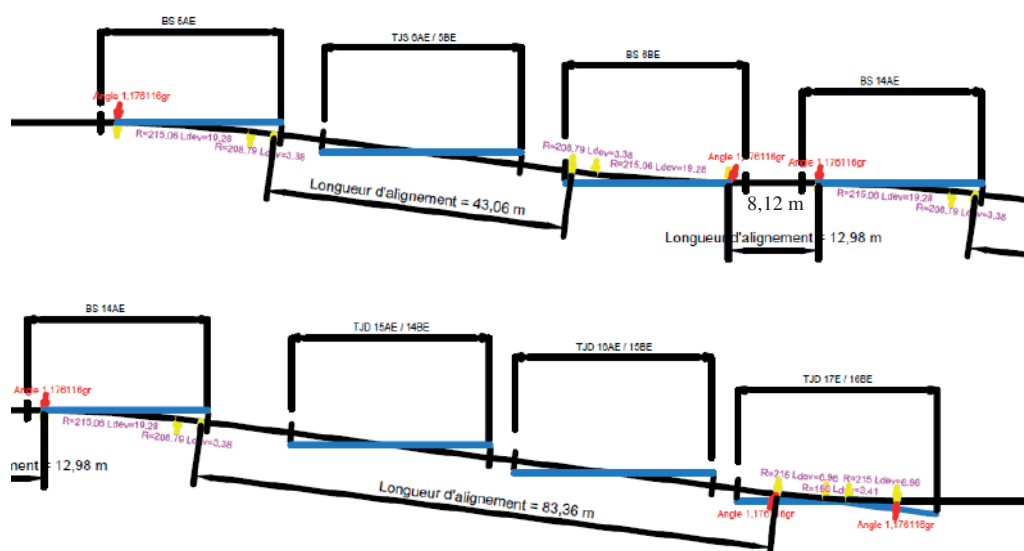


Figure 3 : tracé de l'itinéraire emprunté par les locomotives

2.2 Calcul du déport géométrique entre 2 véhicules

L'existence d'un tracé sinueux se traduit par un déport géométrique entre 2 véhicules attelés. La surface de contact de deux tampons devient faible. C'est ce qui peut conduire à un risque de déraillement.

L'étude est faite en se basant sur les limites des Spécifications Techniques d'Interopérabilité de l'infrastructure (Règlement (UE) n°1299/2014 de la commission du 18 novembre 2014 concernant les spécifications techniques d'interopérabilité relatives au sous-système « Infrastructure » du système ferroviaire dans l'Union Européenne) ainsi que les limites de la norme européenne EN13803 (Track alignment design parameters) qui sont les mêmes. Ces normes de tracé définissent les configurations seuils au delà desquelles le tracé est considéré comme sinueux. Une valeur seuil de déport géométrique entre caisses est déterminée sur les configurations limites (elle est de 372 mm pour des tampons de 600 mm de largeur) afin de permettre la comparaison avec le tracé sur lequel est survenu le déraillement en gare de Liège.

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2021-2446	Version 4 du 13/02/2023	Lot 1 : Analyse des facteurs contributifs et calcul des efforts générés	7/20

Le déport est alors calculé entre les deux véhicules où a été observée la rupture d'attelage :
- la locomotive 27 (empattement = 10 m, porte-à-faux = 4,8 m, largeur de tampons = 600 mm) ;
- le véhicule voyageur (empattement = 17,6 m, porte-à-faux = 3,3 m, largeur de tampons = 600 mm).

Le calcul sur l'itinéraire donne un déport maximal de **314 mm**, qui est inférieur à la limite de 372 mm.

Ce calcul de déport est fait afin d'analyser uniquement le tracé théorique. Les jeux entre caisses, la dynamique du véhicule ainsi que les défauts géométriques ne sont pas pris en compte. Une analyse complémentaire côté matériel sera donnée dans la partie 3.

2.3 Analyse des appareils de voie

Deux appareils (AdV) sont directement dans la zone de l'accident, les BS 6BE et 14 AE. Ils contribuent à la sinuosité du tracé par les rayons de leurs voies déviées de 215 m (et 208 m en talon d'aiguillage).

Les points normalement analysés sur des appareils, dans le cadre d'un déraillement, concernent le tracé, la géométrie, l'état des composants et l'application des règles de maintenance. En l'occurrence et compte tenue d'une analyse à posteriori et sur documents d'une technologie différente des AdV SNCF, l'avis ne portera que sur les paramètres classiques directement interprétables des fiches de contrôle des AdV et éventuellement des images fournies.

Les appareils considérés ont 16 ans, ce qui constitue un âge moyen. L'état général est correct à très correct selon les relevés notamment au niveau des fixations et malgré quelques défauts de rails normaux et étrangers au déraillement.

Les écartements autour de 1440 m sont dans les normes (ce qui est cohérent avec l'état apparent des rails, butées, fixations, supports...).

Les ébréchures d'aiguilles sont correctes avant et après le déraillement.

		Examen aiguilles		
		effacement de la pointe de l'aiguille (calibre 1)	ébréchures aiguilles (calibre 2)	Usure latérale (Calibre 40/10/10K)
branche 1	mesuré	1K	1L	1S
	corrigé	■	OK	OK
branche 2	mesuré	2K	2L	2S
	corrigé	■	OK	OK

2.4 Conclusion sur la voie

Concernant le tracé :

Sur la base de la reconstitution du tracé théorique, l'itinéraire emprunté par le train présente un tracé sinueux conforme selon deux vérifications :

- La succession des courbes et des alignements est conforme du point de vue des paramètres de tracé.
- La succession des courbes et des alignements est également conforme du point de vue des résultats de calcul de déport géométrique des tampons.

Le déraillement n'est à priori pas dû au tracé théorique.

Concernant les appareils de voie :

Du point de vue de leur tracé, les données fournies ne relèvent aucune non-conformité liée à la conception de ces appareils.

Du point de vue du risque de déraillement et sous couvert de la technologie de ces appareils dont nous ne sommes pas familiers, il n'y a pas d'éléments non conformes dans les informations qui nous sont parvenues, notamment pour l'appareil BS 14AE, du point de vue,

- De l'âge de l'appareil et de son état général,
- De l'état de ses composants avant et après déraillement : écartement des rails, ébréchures d'aiguilles...

Le déraillement n'est donc à priori pas dû aux appareils de voie ni à leur état.

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2021-2446	Version 4 du 13/02/2023	Lot 1 : Analyse des facteurs contributifs et calcul des efforts générés	8/20

3 Analyse sur le risque d'enchevêtrement de plateaux de tampon

3.1 Base normative

Les référentiels utilisés par l'Infrastructure sont légèrement différents des référentiels utilisés par le matériel au niveau des critères d'enchevêtrement des plateaux de tampon. La norme EN 16839 qui s'inspire de la fiche UIC 527-1 indique que le recouvrement horizontal minimal entre deux plateaux de tampon en contact doit être supérieur à **25 mm**.

Le calcul de déport décrit dans la norme EN16839 peut être réalisé selon une analyse graphique telle que décrite ci-après : les tampons sont dimensionnés sur la base de courbes et contre courbes types mentionnés dans la norme EN16839 (rayons 150 m et 190 m) en prenant en compte les jeux latéraux possibles des bogies sur la voie et des caisses par rapport aux bogies. La figure B.1 de la norme (figure 4 ci-dessous) précise les hypothèses concernant les jeux latéraux :

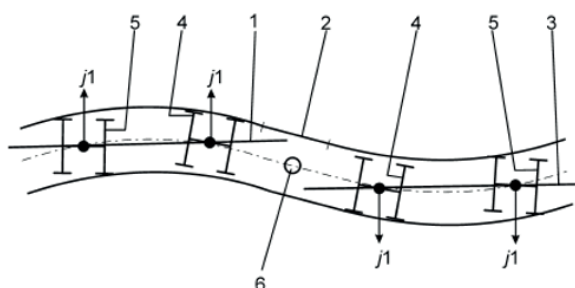


Figure 4 : Hypothèses concernant les jeux latéraux

Le recouvrement des plateaux peut être ensuite graphiquement déterminé sur la base de ces hypothèses pour les véhicules concernés dans la courbe examinée. Cela donne une représentation telle que la figure B.3 de la norme (figure 5 ci-dessous) :

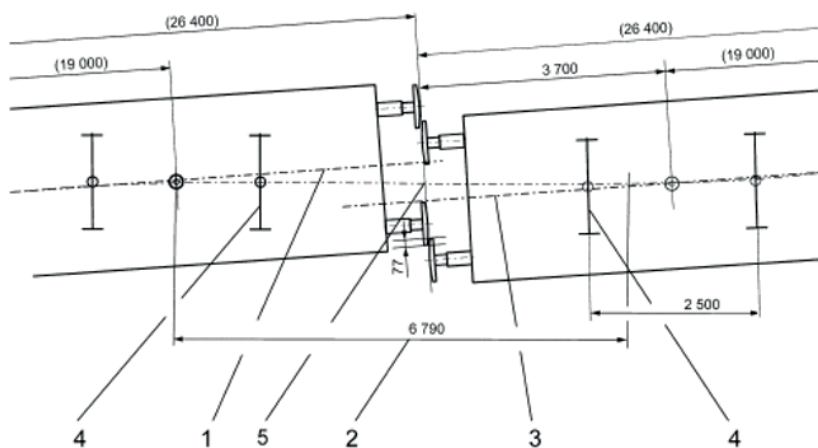


Figure 5 : Recouvrement des plateaux

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2021-2446	Version 4 du 13/02/2023	Lot 1 : Analyse des facteurs contributifs et calcul des efforts générés	9/20

3.2 Analyse complémentaire sur le risque d'enchevêtrement de plateaux tampon

L'analyse du tracé en long a été réalisée par la direction de l'Ingénierie côté Infrastructure (section 2 du présent document). A partir du tracé de voie le déport géométrique latéral de 314 mm sans prise en compte des jeux caisse-bogie et bogie-voie a pu être estimé sur l'ensemble de l'itinéraire.

Les jeux latéraux potentiels caisse bogie et bogie-voie considérés dans notre analyse complémentaire sont les suivants :

- Le document « M4 – Déplacements verticaux et transversaux » fournit un jeu maximal caisse/bogie de 60 mm pour la voiture M4
- 30 mm de jeu bogie/voie (selon EN 16839) et
- Jeu maximal caisse bogie de 50 mm sur la locomotive HLE27 (selon le plan 313-2 100M)

En considérant le positionnement dans la voie de la figure 4 issu de l'EN16839 nous obtenons alors une valeur de déport latéral maximale de **503 mm**. Cette valeur de déport reste théoriquement éloignée du risque d'enchevêtrement normatif qui serait atteint d'après les normes pour une valeur de 575 mm (25 mm de recouvrement)

Concernant le déport vertical, une analyse des hauteurs de tampon, la différence de hauteur de tampon entre la loc 27 et la voiture M4 reste faible. L'effet du profil de la voie et du rebond sont également faibles.

3.3 Conclusion concernant le risque d'enchevêtrement de plateaux de tampon

Sur la base des nouveaux éléments de configuration de voie analysés, l'hypothèse que l'enchevêtrement des plateaux de tampon soit intervenu avant le déraillement et ait entraîné par la suite le déraillement reste peu probable. Cependant, les conditions ci-après peuvent avoir favorisé un enchevêtrement :

- des jeux de conception caisse bogie sur la locomotive HLE27 et la voiture M4 importants
- l'effort dynamique longitudinal de compression de freinage de la locomotive HLE18 (150 kN) qui peut avoir influencé de façon négative le positionnement des véhicules dans la configuration de voie incriminée et favorisé un enchevêtrement.

Afin de consolider cette hypothèse, un calcul avec un logiciel Multicorps de type Simpack permettrait d'évaluer de façon plus précise la dynamique.

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2021-2446	Version 4 du 13/02/2023	Lot 1 : Analyse des facteurs contributifs et calcul des efforts générés	10/20

4 Analyse du scénario de freinage

4.1 Profil de voie en long pris en compte dans les calculs de freinage

Le profil du parcours emprunté par le convoi a été reconstitué à partir des profils des voies 1 à 4 (plans A24E, A186, A187 et A188) et du plan d'ensemble G4-0360-099.730. Le plan d'ensemble a permis d'estimer les distances parcourues lors des changements de voies et de recalculer les profils des voies entre eux. La figure 6 ci-dessous illustre le profil reconstitué à partir de ces données.

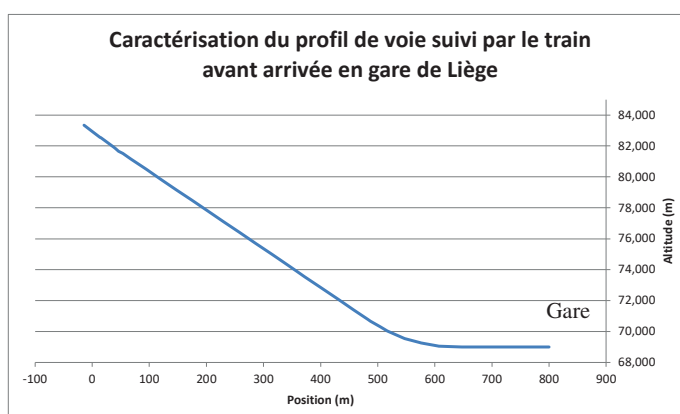


Figure 6 : profil du parcours emprunté (800 m en amont de la gare de Liège)

Ce profil correspond au parcours suivi par le convoi complet avant la rupture de la liaison, puis au parcours de l'arrière du convoi après rupture de la liaison

4.2 Calcul des efforts de freinage

Le profil de vitesse de référence qui a été utilisé pour le calcul des efforts de freinage est issu du document [Analyse JDR_MVA.pdf] et extrait ci-dessous (figure 7) :

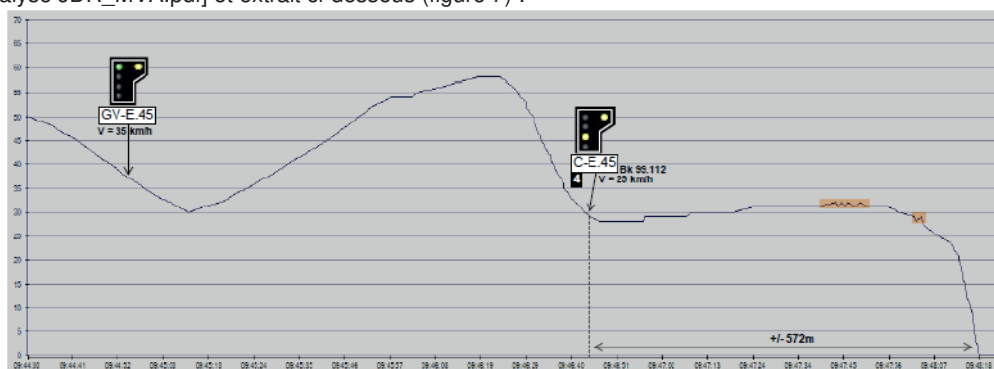


Figure 7 : Enregistrement ATESS (vitesse en ordonnée / temps en abscisse).

Nota : Le déraillement a eu lieu autour de 09h48.

La commande de freinage permettant de respecter ce profil de vitesse avec un convoi correspondant au train ER7400 et sur une voie de déclivité telle que reconstituée ci-dessus est de 100% du freinage électrique de la locomotive HLE18, soit un effort d'environ 150kN.

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2021-2446	Version 4 du 13/02/2023	Lot 1 : Analyse des facteurs contributifs et calcul des efforts générés	11/20

La corrélation obtenue est alors la suivante :

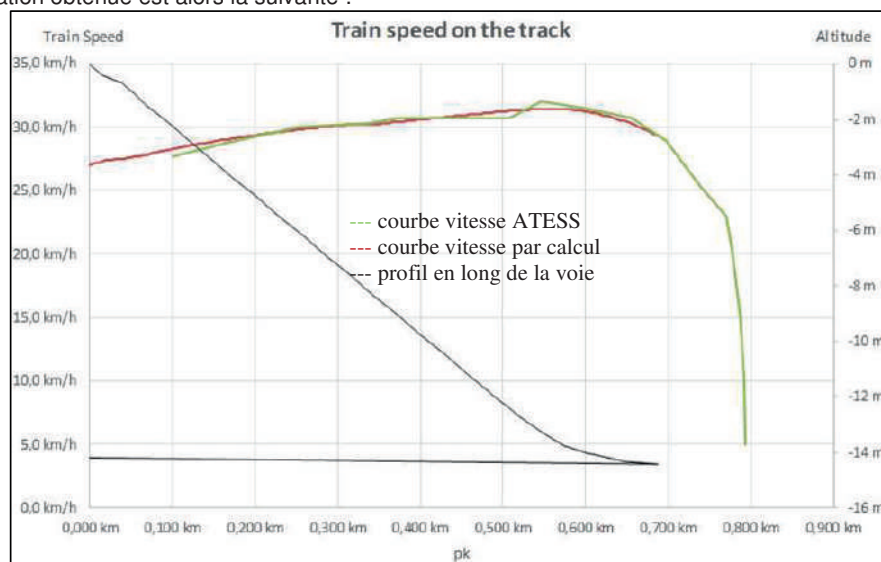


Figure 8 : Corrélation de vitesse

D'après le graphique de vitesse enregistré, la courbe de vitesse à partir du pk 0,77km correspond au freinage d'urgence effectif de la locomotive. Entre les pk 0,7km et 0,77km, le ralentissement est probablement la conséquence d'une augmentation de la résistance à l'avancement due au déraillement de plusieurs essieux au niveau de la première voiture.

La corrélation est satisfaisante et valide l'effort de freinage d'environ 150kN.

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2021-2446	Version 4 du 13/02/2023	Lot 1 : Analyse des facteurs contributifs et calcul des efforts générés	12/20

5 Analyse en dynamique longitudinale

5.1 Explications générales sur les risques de déraillement et de rupture d'attelage

La dynamique longitudinale des trains en circulation permet d'étudier les risques de déraillement et de rupture d'attelage des trains. Habituellement et historiquement cette spécialité concerne les trains de fret qui sont plus sujets à risques étant donnés leur longueur et leur tonnage ainsi que leur hétérogénéité et notamment la présence de wagons vides qui favorisent ces risques.

5.1.1 Critères utilisés pour l'analyse des risques de rupture d'attelage dans le cadre du déraillement de Liège

La pièce fusible d'une liaison par attelage classique est le tendeur d'attelage. Selon la norme EN15566, les attelages standard UIC qui sont utilisés en grande majorité sur les wagons de fret et les voitures voyageurs possèdent une résistance minimale à la rupture de 850 kN. Ces tendeurs subissent des sollicitations répétées (dites Efforts Longitudinaux de Traction ou ELT) durant leur exploitation ainsi que des sollicitations brutales pouvant parfois excéder les limites d'élasticité des matériaux utilisés et allant jusqu'à générer des amorces de fissures. Notre retour d'expérience approxime à 550 kN la valeur d'ELT à partir de laquelle la limite d'élasticité est dépassée et le risque de rupture d'attelage présent sur un tendeur déjà endommagé.

La liaison entre la locomotive HLE27 et la voiture M4 n'a pas rompu physiquement mais s'est désolidarisée probablement postérieurement au déraillement. C'est le tendeur 85t de la locomotive qui était utilisé pour la liaison comme le suggère la photo suivante (figure 9) où l'on voit que le tendeur ne repose pas sur son crochet de repos. Une bielle du tendeur a probablement été déformée sous l'effet du chevauchement de tampon qui aurait soulevé le tendeur d'attelage. La rondelle d'extrémité a de plus probablement été éjectée sous l'effet du choc. Le serrage de l'attelage sur la photo (distance entre écrous à tourillon représenté par la double flèche) ne révèle pas d'incohérence : le serrage de l'attelage entre la locomotive HLE27 et la voiture M4 était donc très probablement correctement réalisé.

Notons qu'en France la règle de l'art est d'utiliser le tendeur de la voiture et non celui de la locomotive. Cela n'a pas d'incidence à nos yeux sur le déraillement.

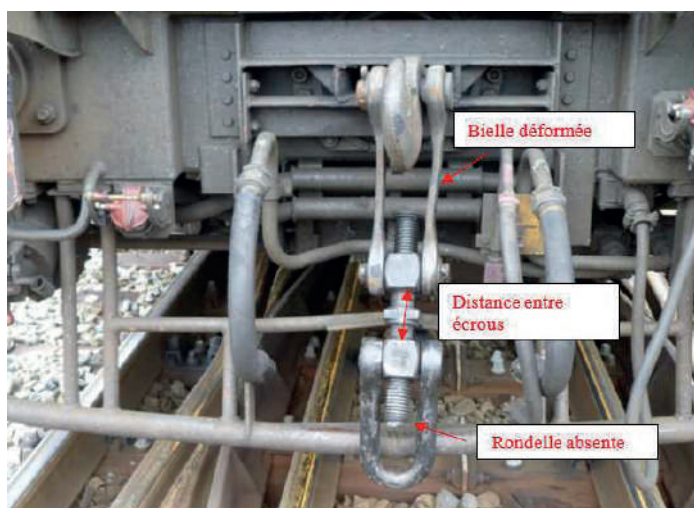


Figure 9 : Tendeur de la locomotive HLE27

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2021-2446	Version 4 du 13/02/2023	Lot 1 : Analyse des facteurs contributifs et calcul des efforts générés	13/20

5.1.2 Critères utilisés pour l'analyse des risques de déraillement des trains de fret

Le tonnage des trains peut être limité pour plusieurs raisons : sécurité, dimensionnement des machines, des attelages... Les Efforts Longitudinaux de Compression (**ELC**) sont générés dans les trains de fret dans diverses configurations de conduite (freinage pneumatique, refoulement, freinage dynamique...) et peuvent dans certains cas dépasser les **ELC admissibles** des wagons qui composent ce train. On estime qu'il y a un risque de déraillement lorsque pour un véhicule donné l'ELC atteint dépasse l'ELC admissible du véhicule. Le déraillement se produit cependant si des caractéristiques défavorables se présentent au moment où l'ELC maximum est atteint (courbe et contre courbe de faible rayon, chargement du wagon, état de surface des plateaux de tampon...).

Les figures suivantes (figure 10 et figure 11) présentent rapidement comment les ELC se répartissent dans les trains pour plusieurs configurations de conduite.

Génération d'ELC lors d'un refoulement



Figure 10 : Génération d'ELC lors d'un refoulement

La répartition précédente est équivalente à celle générée lors d'un freinage dynamique (locomotive seule).

Génération d'ELC lors d'un freinage



Figure 11 : Génération d'ELC lors d'un freinage

Lors d'un freinage pneumatique, le freinage se déclenche sur les trains classiques d'abord en tête de train car la conduite générale de frein se vidange depuis le robinet de mécanicien de la locomotive. C'est la valeur de la dépression de la conduite générale entre 5 et 3.5 bars qui donne la consigne de la force de freinage du wagon au droit de cette conduite. Les wagons situés à l'arrière du train, pas encore freinés, poussent sur les premiers wagons ce qui implique que les ELC maximaux sont situés généralement près du centre du train.

L'ELC atteint sur le wagon dépend de multiples paramètres : caractéristiques du convoi (Longueur, masse, masse freinée, hétérogénéité en freinage), type de locomotive, manœuvre de conduite, types de semelles de frein et de tampons de choc...

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2021-2446	Version 4 du 13/02/2023	Lot 1 : Analyse des facteurs contributifs et calcul des efforts générés	14/20

L'ELC admissible sur une voie donnée d'un wagon dépend également de multiples paramètres : type de tampon, type de véhicule (à bogies ou à essieux), chargement du wagon. Il peut se déterminer par calculs avec un logiciel Multicorps de type Simpack mais peut également s'estimer par essais ou extrapolations.

La norme EN15839 donne ainsi les ELC admissibles minimaux que les wagons doivent respecter à la conception : 200 kN en courbe et contre courbe de 150 m pour un wagon à 2 essieux et 240 kN pour un wagon à 2 bogies.

La fiche UIC 421, qui décrit la méthodologie d'analyse du risque de déraillement, fournit des règles d'extrapolation des ELC admissibles en fonction du type de tampons, de la masse de chargement ou du rayon de courbure.

5.1.3 Adaptation des critères de risque de déraillement au cas du déraillement de Liège

Les risques de déraillement dû aux ELC ne sont pas étudiés sur les trains de voyageurs pour les raisons exposées au §5.1.2 à savoir la faible longueur des convois qui conduit à des ELC faibles et la masse des voitures qui induit des ELC admissibles élevés. C'est donc ici une des premières études dans le domaine Voyageur qui aborde ce sujet.

L'application de sollicitations longitudinales transitoires ou prolongées a toujours un impact favorisant le risque de déraillement mais les événements ne sont généralement pas expliqués par les seuls ELC lorsqu'il y a déraillement de voiture. Sur les voitures type Corail (nom des voitures exploitées par SNCF) ou M4, nous ne disposons pas d'essais d'homologation ou de simulations selon les prescriptions de la norme EN15839 pour estimer leur ELC admissible. En première approche, l'ELC admissible en courbe et contre courbe de rayon 190 m peut être estimé ainsi sur la base d'une extrapolation indiquée dans l'UIC 421 :

On considère comme véhicule de base, un véhicule à bogie de 15 t de tare d'ELC admissible 240 kN en courbe contre-courbe de 150 m.

L'extrapolation sur le rayon de courbe de 2 kN/m pour les véhicules à bogie conduit à une augmentation de l'ELC admissible de 80 kN pour une courbe et contre courbe de 190 m $((190-150)*2)$ qui constitue généralement la configuration la plus défavorable rencontrée sur voies principales (hors triage).

Ensuite, une extrapolation de 8 kN/t conduit à une augmentation de 184 kN $(184 = (38-15)*8)$ pour obtenir l'ELC admissible d'une voiture M4 de masse à vide 38 t.

⇒ L'ELC admissible de la voiture M4 dans le cadre du lot 1 de cette étude est donc estimé à 504 kN $(240+80+184)$.

La limite à 400 kN de l'actuelle UIC 421 est dépassée. Nous estimons cependant dans le cadre de ce lot 1 de l'étude qu'il est plus réaliste de considérer cette valeur de 504 kN.

Le lot 2 qui étudiera précisément les circonstances du déraillement par un calcul Multicorps permettra de confirmer ou remettre en cause ce critère.

5.2 Simulation 1D du convoi

5.2.1 Outil utilisé pour l'analyse

Le logiciel TrainDy Version 1.3.3, propriété de l'UIC, a été utilisé. C'est une référence dans le domaine de la dynamique longitudinale. Il a notamment été utilisé pour les études qui ont abouti aux règles actuelles concernant les trains de longueur supérieure à 750 m en France et en Allemagne. SNCF l'a utilisé aussi pour des cas d'analyse de ruptures d'attelage ou de déraillements.

Ce logiciel a été développé et continue à évoluer au sein d'un consortium UIC regroupant les opérateurs DB, SNCF et Trenitalia, l'université de Rome Tor Vergata ainsi que Faiveley Transport et Knorr Bremse qui sont les membres historiques du consortium. L'université de Berlin, Railenium ainsi que Nebrija University ont récemment rejoint le consortium en tant que membres associés.

L'avantage principal de ce logiciel est sa modélisation précise du freinage du train, via un module pneumatique qui est combiné au module dynamique de résolution du système masse ressort constitué par les tampons de choc et l'ensemble de traction. Ce logiciel a été validé en 2009 sur la base de données issues d'essais réalisés par les opérateurs ferroviaires.

Un autre avantage par rapport à un logiciel Multicorps type SIMPACK est la facilité d'utilisation et le temps de calcul. Simuler le freinage d'un train, une fois celui-ci modélisé, prend moins d'une minute. TrainDy est donc particulièrement utile pour traiter sur le plan statistique une multitude de compositions possibles de trains selon

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2021-2446	Version 4 du 13/02/2023	Lot 1 : Analyse des facteurs contributifs et calcul des efforts générés	15/20

la méthodologie de l'UIC 421 et ainsi démontrer le caractère GAME d'une exploitation souhaitée par rapport à une exploitation de référence.

TrainDy ne permet cependant pas l'étude de la dynamique ferroviaire car ne calcule que les forces suivant l'axe longitudinal et ne modélise ni le contact roue-rail ni les suspensions et bogies.

Le document disponible sur internet à l'adresse suivante présente plus en détail ce logiciel :

https://www.researchgate.net/publication/271438107_TrainDy_a_new_UIC_simulator_for_the_longitudinal_dynamics_of_trains

5.2.2 Hypothèses/données d'entrées

Les données d'entrée du logiciel TrainDy ont été déterminées sur la base suivante :

Le train est composé de la locomotive HLE18 suivie d'une locomotive HLE27, de 11 voitures M4 et d'une locomotive HLE27: longueur totale 324 m, masse totale 681 t

Les types de tampon des véhicules ainsi que les dessins fournis ont permis de déterminer les caractéristiques course-force nominale des tampons des différents véhicules. Les tampons des voitures M4 et HLE27 possèdent des caractéristiques de raideur forte car sont équipés de ressort à bague type Ringfeder®.

Les données voie (pentes et rampes) utilisées proviennent de la même analyse faite dans la section 4 (scénario de freinage) du présent document. Des approches successives visant à reproduire l'évolution de la vitesse du train sur la voie enregistrée ont permis d'ajuster les paramètres voie et notamment la résistance à l'avancement qui peut être imputée aux différents appareils de voie et courbes empruntés par le train. Pour information, le logiciel TrainDy dans sa version actuelle ne permet pas d'ajuster la résistance à l'avancement des véhicules qui est rentrée en dur dans le code de calcul. L'hypothèse de TrainDy est la suivante :

- Résistance à la marche par véhicule indépendamment de la voie : $(1.1 + 0.00047 \cdot v^2) \cdot m \cdot g$ (m est en tonnes dans cette équation et v est en m/s; le résultat est en Newton)
- Traînée aérodynamique (appliquée uniquement sur la première locomotive) : $F_{aero} = 1384.39 + 8.24 \cdot v + 0.28 \cdot v^2$ [le résultat est en Newton et la vitesse est en m/s]

Les attelages sont tendus en considérant les tampons en contact. Cette hypothèse ne correspond probablement pas aux règles d'exploitation qui imposent souvent un serrage « à refus » sur les voitures mais est conservatrice car maximise les ELC et ELT calculés.

La manœuvre de conduite utilisée est un 100% de freinage rhéostatique par la locomotive HLE18, comme exposé au §4

La force de freinage maximale des véhicules (hormis HLE18) lors de l'arrêt d'urgence a été estimée sur la base des masses et masses freinées des véhicules fournis, l'ensemble des véhicules du convoi freinés par des matériaux de type composite.

De l'analyse des données d'entrée ressort un étonnement sur le type de ressorts de tampons utilisés sur la locomotive HLE27. En effet, le dessin « C-6-070M_buffer HLE27.pdf » propose un choix parmi 3 types d'éléments élastiques aux caractéristiques bien différentes. Il est obligatoire pour des raisons dynamiques que les mêmes types de tampons soient présents sur une même traverse d'un véhicule. Ceci est expliqué par l'EN16839 appelée par la STI Loc&Pas :

« Deux tampons de même système élastique, de même catégorie, de mêmes dimensions de plateau, de même course et de même type d'enveloppe doivent être installés à chaque extrémité du véhicule. La longueur nominale des tampons de chaque côté doit être identique ».

Nous conseillons de mener des analyses complémentaires afin de déterminer si une erreur en maintenance a pu se produire car extérieurement les tampons sont similaires.

Nota : L'influence de caractéristiques différentes des tampons pourra être vérifiée lors du lot 2 en utilisant les simulations numériques.

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2021-2446	Version 4 du 13/02/2023	Lot 1 : Analyse des facteurs contributifs et calcul des efforts générés	16/20

5.2.3 Résultats des calculs

Avant l'arrivée en gare de Liège, le convoi descendait une pente caractérisée (voir la section 4.1). Sur cette voie le profil de vitesse du train a pu être retrouvé grâce aux bandes ATESS et au document « Analyse JDR_MVA.pdf » (voir la section 4.2).

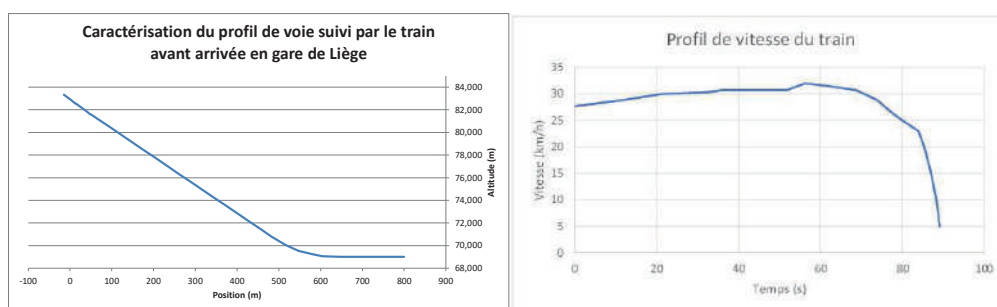


Figure 12 : Profil de voie et de vitesse

Sur ces 2 bases, profil de voie et vitesse, nous avons utilisé un freinage électrique 100% de 150 kN (voir la section 4.2) et nous avons obtenu la courbe suivante.

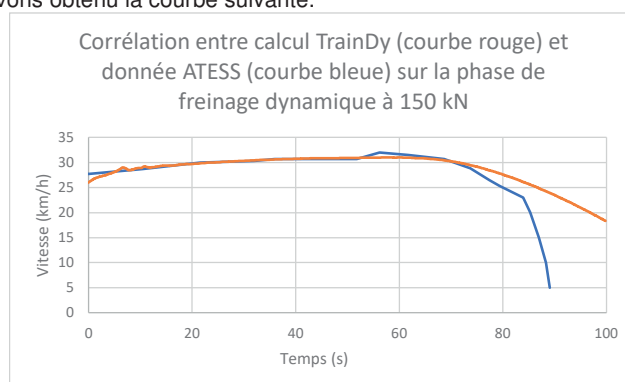


Figure 13 : Corrélation de vitesse en utilisant TrainDy

Nous avons donc augmenté la résistance à l'avancement car les courbes empruntés par le train freinent l'avancement de ce dernier. Pour se faire, le logiciel TrainDy ne laissant pas la possibilité d'intervenir dans les équations utilisées pour le calcul de la résistance à l'avancement, nous avons majoré les rampes et minoré les pentes.

Pour obtenir le « profil corrigé », on majore le profil de $800/R$ où R est le rayon de courbure évalué en mètres. En considérant un rayon moyen de 267 m cela revient à une augmentation du profil de 3 mm/m. Cette hypothèse nous semble réaliste au regard du parcours ponctué d'aiguillages et de courbes. Nous sommes ainsi parvenus à corréliser le profil de vitesse jusqu'au décroché visible sur la figure suivante :

La figure ci-dessus montre sur la courbe bleue une dernière partie (entre 84 et 89 s) qui correspond au freinage d'urgence consécutif au déraillement et à la rupture d'attelage avec une réduction rapide de la vitesse. Mais il se situe toute une phase préalable à ce freinage d'urgence (entre 74 s et 84 s) où la résistance à l'avancement du train a été augmentée, sans que cela soit explicable par le freinage dynamique seul.

Sur la vidéo du déraillement le temps entre le mouvement suspect correspondant au déraillement supposé et l'arrêt de la locomotive HLE18 est d'environ 15 s (entre 74 s et 89 s), ce qui place ainsi le moment et le lieu du déraillement sur la courbe :

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2021-2446	Version 4 du 13/02/2023	Lot 1 : Analyse des facteurs contributifs et calcul des efforts générés	17/20

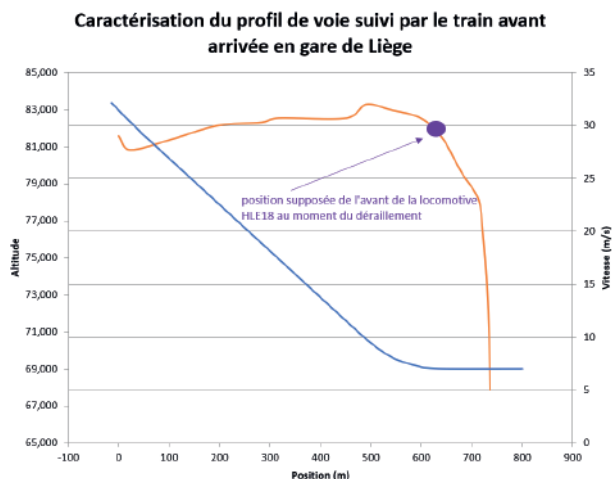


Figure 14 : Position supposée au moment du déraillement

La résistance à l'avancement supplémentaire sur l'intervalle 74 à 84 s est donc très probablement due au déraillement.

Cependant, nous avons mené un second calcul sur la totalité du parcours depuis le C-E.45 jusqu'à l'arrêt en considérant qu'à partir de 74 s un sur effort de freinage est généré sur la locomotive HLE18 de manière à corrélérer la vitesse du train sur la courbe. Ce calcul utilise une hypothèse qui a surtout le mérite de déterminer le sur-effort nécessaire pour diminuer la vitesse entre 74 s et 84 s. L'effort total de retenue de 220 kN sur la locomotive HLE18 sur ce laps de temps permet ainsi de faire correspondre parfaitement le calcul TrainDy et la courbe Ateess. Le freinage d'urgence simulé par TrainDy à partir de 84 s permet également une corrélation précise des courbes de vitesse sur la fin du freinage de la locomotive.

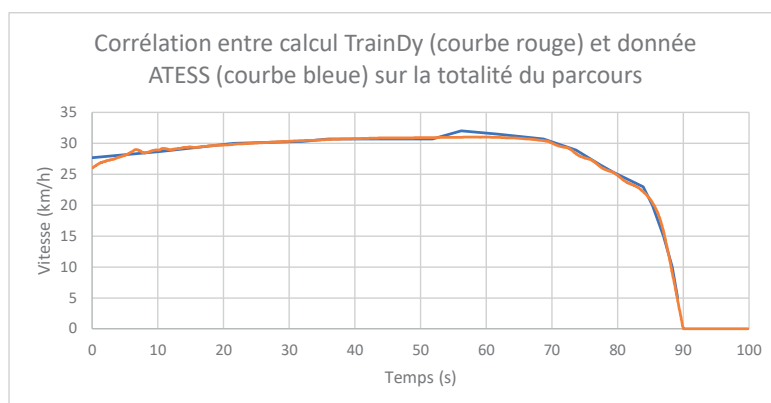


Figure 15 : Corrélation de vitesse en utilisant TrainDy avec des hypothèses complémentaires

Sur la base du profil de vitesse recalé par rapport au relevé ATESS, les ELC et ELT calculés tout au long de ce parcours sur l'ensemble des véhicules du train sont représentés ci-après :

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2021-2446	Version 4 du 13/02/2023	Lot 1 : Analyse des facteurs contributifs et calcul des efforts générés	18/20

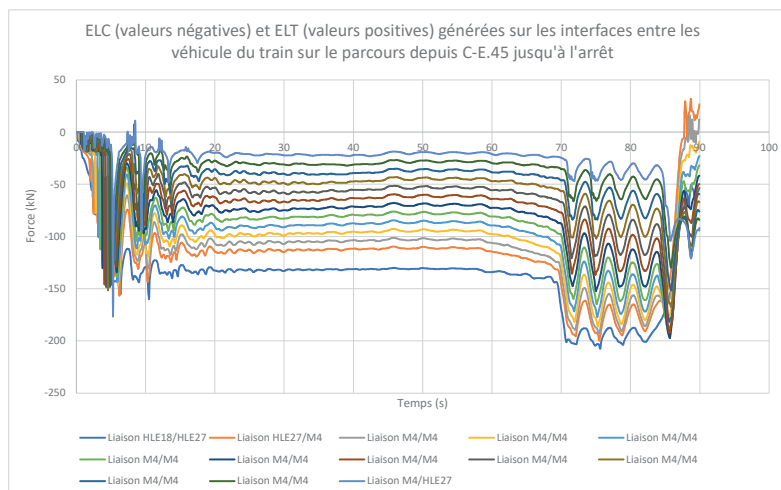


Figure 16 : Les ELC et ELT calculés

Sur la liaison sur laquelle le déraillement s'est produit (HLE/M4), la variation de l'ELC est la suivante.

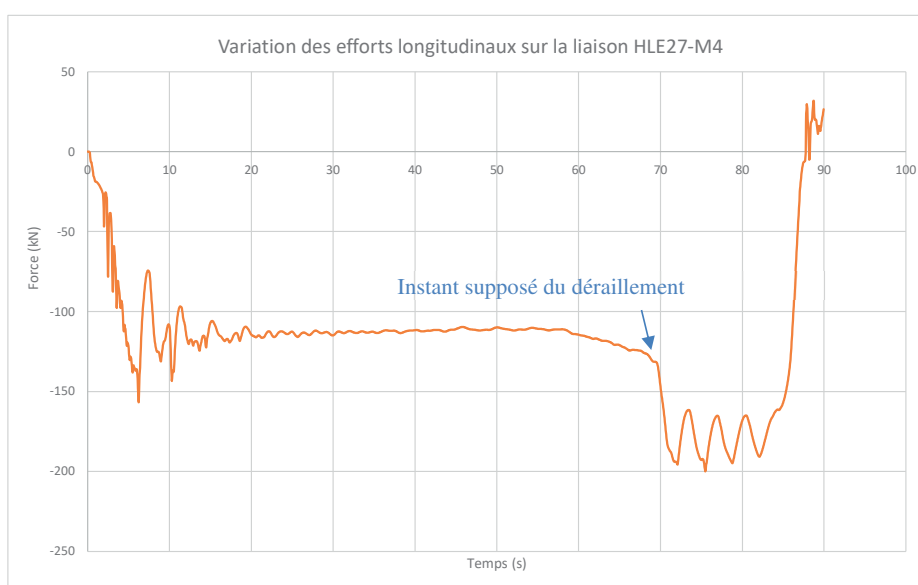


Figure 17 : Les ELC et ELT calculés pour la liaison HLE/M4

Les ELC calculés ne dépassent pas 130 kN sur cette liaison avant l'instant du déraillement. Cette valeur reste très inférieure à l'ELC admissible de 504 kN retenu dans le cadre de ce lot et ne permet pas à ce jour d'expliquer le déraillement de Liège. Cette donnée pourra cependant servir de donnée d'entrée pour le lot 2 de la prestation.

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2021-2446	Version 4 du 13/02/2023	Lot 1 : Analyse des facteurs contributifs et calcul des efforts générés	19/20

5.2.4 Synthèse de la section 5

A ce stade, les analyses des données d'entrée fournies ainsi que les calculs TrainDy effectués ne permettent pas de mettre en évidence que les sollicitations longitudinales en compression sont seules responsables du déraillement. En effet les ELC calculés (130 kN ou 200 kN en valeur haute) restent très en deçà du critère empirique retenu et présenté dans ce lot 1. Le lot 2 permettra de confirmer cette hypothèse ou d'en déterminer d'autres pour expliquer l'événement du déraillement de Liège.

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2021-2446	Version 4 du 13/02/2023	Lot 1 : Analyse des facteurs contributifs et calcul des efforts générés	20/20

6 Conclusions

6.1 Réponse à la question posée

Le présent document est le livrable du lot 1 (Analyse des facteurs contributifs et calcul des efforts générés).

Dans ce livrable, nous avons commencé par une analyse sur la conformité de l'infrastructure. Pour cela, le tracé du parcours emprunté par le train déraillé a été d'abord reconstitué sur Autocad en prenant en compte les éléments entre les appareils de voie, les rayons de voies déviées empruntées, ainsi que les angles de déviation présents en pointe des aiguillages. Un premier calcul de déport géométrique des tampons a été ensuite réalisé. Au vu des résultats, il apparaît que l'itinéraire emprunté par le train ne présente pas de tracé sinueux non-conforme. Par ailleurs, les autres paramètres de tracé sont conformes. Le déraillement n'est à priori pas dû au tracé théorique.

Une analyse complémentaire sur le risque d'enchevêtrement des plateaux de tampons a été poursuivie en ajoutant les jeux caisse-bogie et bogie-voie maxi disponibles. La valeur de déport maximal atteint reste encore inférieure à la valeur limite du risque d'enchevêtrement. Cependant, sur la base des nouveaux éléments de configuration de voie analysés, l'hypothèse que l'enchevêtrement des plateaux de tampon soit intervenu avant le déraillement et ait entraîné par la suite le déraillement reste peu probable.

En ce qui concerne le scénario de freinage, deux approches indépendantes ont été utilisées afin de confirmer que 100% du freinage électrique de la locomotive HLE18, soit un effort d'environ 150 kN a été appliqué avant le déraillement. Ce freinage électrique permet de maintenir la vitesse du train autour de 30 km/h sur la pente de la zone de déraillement. Le déraillement a eu lieu a priori vers la fin de la pente, au niveau de l'aiguille BS 14AE, au début d'une contre-courbe de rayon 215 m. Une simulation numérique de la circulation du train sur cette zone identifiée sera réalisée dans le lot 2.

Enfin, le logiciel TrainDy a été utilisé pour calculer les efforts de compression générés en considérant le scénario de freinage identifié et la géométrie de la zone de voie de déraillement. A ce stade de l'étude, les résultats ne permettent pas de mettre en évidence que les sollicitations longitudinales en compression sont les seules responsables du déraillement. En effet les ELC calculés (130 kN ou 200 kN en valeur haute) restent très en deçà du critère déterminé et retenu dans le cadre du lot 1. Le lot 2 permettra de confirmer cette hypothèse ou d'en déterminer d'autres pour expliquer l'événement du déraillement de Liège.

7.2. LIVRABLE 2 DE MASTÉRIS - SIMULATION NUMÉRIQUE DU COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU VÉHICULE DÉRAILLÉ SUR LA ZONE DE DÉRAILLEMENT

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	3/36

SYNTHESE

Dans le cadre d'une enquête ouverte suite à un déraillement d'un train de voyageurs (à vide) de la SNCB survenu en gare de Liège-Guillemins le 7 juillet 2019, l'Organisme d'Enquête sur les Accidents et les Incidents Ferroviaires (ci-après, « l'OE ») a rassemblé et réalisé une première analyse de diverses données concernant l'état de la voie, le matériel roulant et la circulation. Partant de ces données, la présente mission est composée de deux lots :

- Lot 1 : Analyse des facteurs contributifs et calcul des efforts générés.
- Lot 2 : Simulation numérique du comportement dynamique du véhicule déraillé sur la zone de déraillement.

Dans ce lot 2, des simulations numériques ont été réalisées afin d'étudier le comportement dynamique du train dans la zone de déraillement.

Les études paramétriques réalisées ont permis de tirer les conclusions ci-dessous :

- **la prise en compte de l'alignement de 8.1m** (au lieu de 37,18m) engendre une augmentation du critère de déraillement en entrée de la zone 14AE, zone la plus critique sur le parcours,
- **L'application d'un effort de freinage de 150kN** a un effet notable sur le risque de déraillement sur cette zone 14AE ce qui n'était pas le cas avec une zone d'alignement de 37m,
- **Le coefficient de frottement** au niveau du contact roue-rail joue un rôle important. Un rail sec augmente sensiblement le risque de déraillement,
- **L'augmentation de l'écartement de la voie** contribue à augmenter notablement le risque de déraillement quand celui-ci est combiné à un effort de freinage,
- **Le profil du rail** a un impact sur le risque de déraillement qu'il soit ou non combiné à un effort de freinage. De plus, avec un changement progressif du profil de l'aiguille dans une courbe serrée et de potentiels défauts locaux de voie, la zone en question est une zone sensible vis-à-vis de risque de déraillement. Les données suivantes doivent être mesurées lors d'un déraillement :
 - o Profils de rail,
 - o Défauts de nivellement par file de rail,
 - o Défauts de dressage par file de rail,
 - o Ecartement de la voie,
 - o Dévers.
- **Les défauts de gauche** liés à la déformation du bogie ou de la voie et/ou le déséquilibre de charge à la roue augmentent fortement le risque de déraillement. Ces défauts cumulés avec l'usure de rail et les défauts ponctuels de voie (dressage, nivellement, écartement) peuvent faire dérailler le train dans la zone étudiée.

Ces travaux ont permis d'identifier que la zone de l'aiguillage 14AE correspondait bien à la zone présentant le plus de risque de déraillement. Il a été mis en évidence des facteurs d'influence dont :

- La typologie du tracé (courbe contre courbe),
- Le freinage,
- L'écartement de la voie,
- Les profils de rail,
- le coefficient de frottement roue/rail,
- Les défauts de gauche liés à la déformation du bogie ou de la voie.

Les conditions réellement rencontrées par le train lors du déraillement ne sont malheureusement pas toutes connues mais la présente étude montre qu'un cumul « dans le mauvais sens » de plusieurs de ces facteurs d'influence est de nature à atteindre ou dépasser les critères de déraillement.

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	4/36

SOMMAIRE

1	OBJET	5
1.1	Question posée – problématique	5
1.2	Client – Référence de la demande	5
2	MODELISATION	6
2.1	Modèle de la voiture M4	6
2.2	Modélisation de la locomotive HLE27 & HLE18	7
2.3	Modélisation de l'ensemble choc et traction	7
2.4	Modèle réduit du train	8
2.5	Modélisation de la voie et du profil de rail	9
3	RESULTATS AVEC TRACE INITIAL : ALIGNEMENT 37,18M	12
3.1	Critères utilisés pour cette étude de déraillement.....	12
3.2	Cas de référence.....	12
3.3	Cas 1 : Influence de l'effort de freinage.....	14
3.4	Cas 2 : Influence du coefficient de frottement de contact roue-rail	15
3.5	Cas 3 : Influence du profil de rail	16
3.6	Cas 4 : Influence d'un défaut de gauche de bogie et/ou de voie	17
3.7	Cas 5 : Influence de défaut de gauche combiné avec un rail usé.....	18
4	RESULTATS AVEC TRACE MODIFIE : ALIGNEMENT 8,1M	19
4.1	Méthodologie de calculs	19
4.2	Critères utilisés pour cette étude de déraillement.....	19
4.3	Influence du tracé.....	20
4.4	Influence de l'effort de freinage	22
4.5	Influence de l'écartement des rails avec et sans freinage	25
4.5.1	Avec freinage.....	26
4.5.2	Sans freinage.....	28
4.5.3	Conclusion	29
4.6	Influence du profil de rail avec et sans freinage	30
4.6.1	Avec freinage.....	32
4.6.2	Sans freinage.....	34
4.6.3	Conclusion	35
5	CONCLUSIONS	36

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	5/36

1 Objet

1.1 Question posée – problématique

Dans le cadre d'une enquête ouverte suite à un déraillement d'un train de voyageurs (à vide de 304 m, 608 T, 11 voitures M4 + 2 locomotives HLE27 à 2 extrémités), tracté par une locomotive HLE18 (figure 1 et 2), de la SNCB survenu en gare de Liège-Guillemins le 7 juillet 2019, l'Organisme d'Enquête sur les Accidents et les Incidents Ferroviaires (ci-après, « l'OE ») a rassemblé et réalisé une première analyse de diverses données concernant :

- l'état de la voie (tracé, profil en long, rayons de courbure, règles applicables,...),
- le matériel roulant (tampons, roues, masses, type de bogies,...),
- les bandes d'enregistrements du train (distances, vitesse, freinage),
- la maintenance tant de la voie et des appareils de voie que du matériel roulant.



Figure 1 : Configuration du train

Partant des données analysées par l'OE et mise à disposition au début de la présente prestation, la mission est composée de deux lots :

- Lot 1 : Analyse des facteurs contributifs et calcul des efforts générés. Ce lot consiste à vérifier dans un premier temps la conformité de l'infrastructure (tracé et pose des appareils de voie) et du matériel roulant déraillé (tampons, système d'attelage). Puis, une reconstitution du scénario de freinage sera proposée. Enfin, un calcul des efforts générés sera réalisé en utilisant le logiciel dédié TrainDy.
- Lot 2 : Simulation numérique du comportement dynamique du véhicule déraillé sur la zone de déraillement. Ce lot consiste à modéliser et simuler le mouvement du véhicule sur la zone de déraillement en prenant en compte les données issues du lot 1 (efforts générés, caractéristiques de l'infrastructure et du matériel roulant). Cela permettra d'étudier le soulèvement des roues par rapport au rail qui pourrait causer le déraillement dans une zone particulière de l'infrastructure (avec des appareils de voie).

Le présent document est le livrable du lot 2.



Figure 2 : déraillement des voitures

1.2 Client – Référence de la demande

Le client final de cette affaire est l'Organisme d'Enquête sur les Accidents et les Incidents Ferroviaires belge. Commande MASTERIS No. 000012375, le 06/04/2021

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	6/36

2 Modélisation

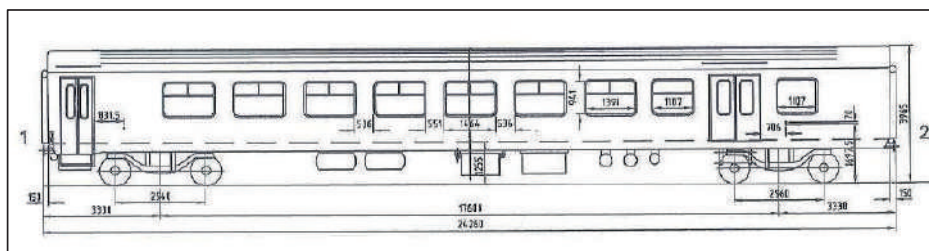
Dans le cadre de cette étude, le logiciel SIMPACK version 2021x.4 de la société Dassault Systèmes, est utilisé.

Le modèle est décrit à l'aide de corps solides indéformables reliés entre eux par des liaisons cinématiques et des éléments d'efforts.

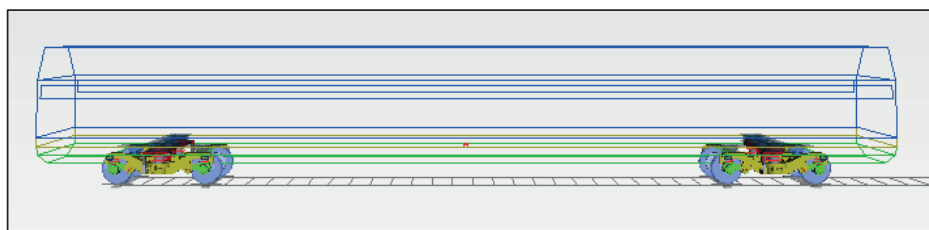
Chaque solide indéformable est défini par son centre de gravité, sa masse et sa matrice d'inertie. Les liaisons cinématiques entre les solides sont modélisées à l'aide de liaisons définies dans SIMPACK qui donnent les degrés de liberté autorisés entre deux solides. Les éléments d'efforts (ressorts, amortisseurs, butées, articulations, etc.) sont modélisés à l'aide d'éléments définis dans la boîte à outils de SIMPACK.

2.1 Modèle de la voiture M4

La voiture M4 (figure 3) est modélisée à partir du plan 662-0-001M. Sa masse totale à vide est de 38 tonnes. Cet état de charge correspond à l'état au moment de déraillement.



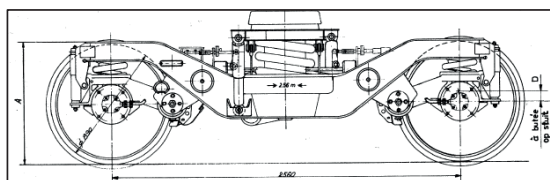
a. Plan 662-0-001M de la voiture M4



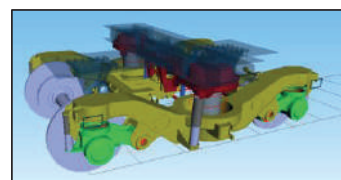
b. Modélisation avec le logiciel SIMPACK de la voiture M4

Figure 3: Plan (a) et modélisation (b) de la voiture M4

Les bogies (figure 4) de la voiture M4 sont modélisés à partir du plan 660.2.002M.



a. Plan 660.2.002M du bogie Y32 type 42



b. Modélisation SIMPACK

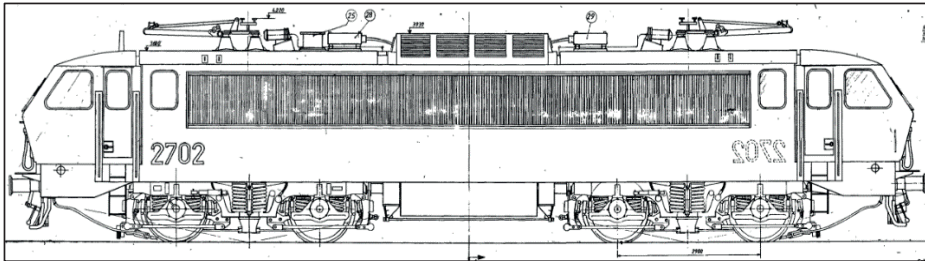
Figure 4: Plan (a) du bogie Y32 et modélisation (b) SIMPACK

Les profils et les diamètres de roue mesurés pour les deux premières voitures (58008, 52363) sont pris en considération dans les modèles SIMPACK.

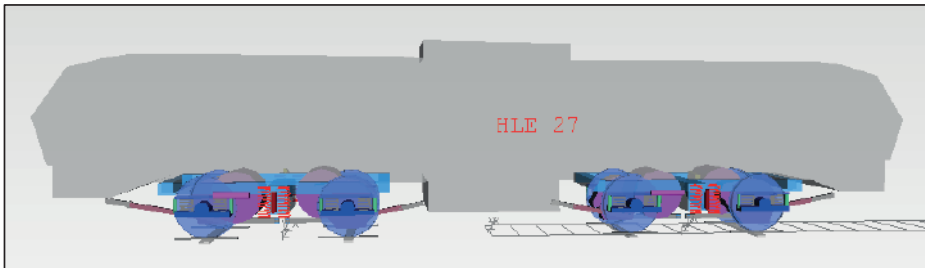
Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	7/36

2.2 Modélisation de la locomotive HLE27 & HLE18

La locomotive HLE27 (figure 5) est modélisée à partir du plan 313-0-007M. Sa masse totale est de 85 tonnes.

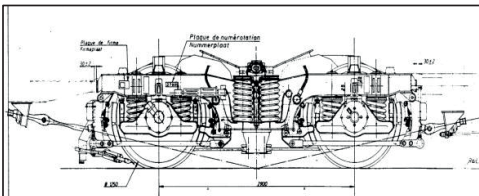


a. Plan 313-0-007M de la locomotive HLE27

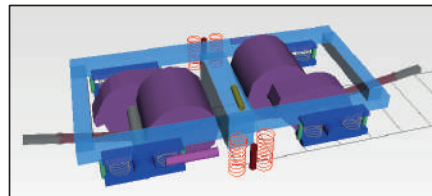


b. Modélisation avec le logiciel SIMPACK de la locomotive HLE27
Figure 5: Plan (a) et modélisation (b) de la locomotive HLE27

Les bogies (figure 6) de la locomotive sont modélisés à partir du plan 313.2.001M.



a. Plan 313.2.001M du bogie de la loc 27



b. Modélisation SIMPACK

Figure 6: Plan (a) du bogie de la loc 27 et modélisation (b) SIMPACK

Le profil de roue utilisé pour la locomotive HLE27 est S1002 (profil neuf).

La locomotive HLE18 est modélisée par un simple point d'application de la force de freinage (voir la figure 10). Ce point est lié à la locomotive HLE27 par l'ensemble de choc et traction (voir la section ci-dessous).

2.3 Modélisation de l'ensemble choc et traction

L'ensemble de choc et traction (figure 7) pour chaque couplage M4/M4, M4/HLE27 et HLE27/HLE18 est modélisé dans SIMPACK.

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	8/36

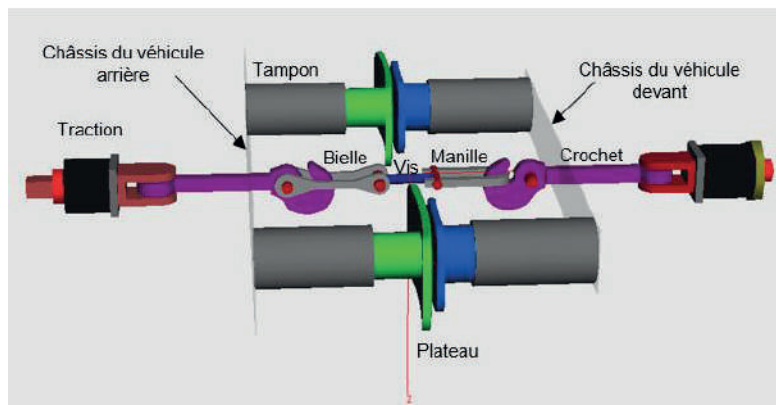


Figure 7 : Modélisation SIMPACK de l'ensemble choc-traction

Les fonctionnalités du logiciel SIMPACK permettent de déterminer le point de contact entre deux sphères. Dans le cas présent, il s'agit pour les plateaux de tampon de deux surfaces sphériques avec le rayon de chaque tampon concerné ($R = 1500$ mm pour la voiture M4 et la locomotive HLE27, $R = 2750$ mm pour la locomotive HLE18. Voir dessins des tampons dans la figure 8).

Les éléments d'efforts des tampons et des tractions intègrent les caractéristiques non linéaires de ceux-ci (courbes de compression et de détente selon les plans C-6-068M, C-6-096M et A6Z00001614511M). L'importante hystérésis qui caractérise ce type d'éléments engendre un fort amortissement, pris en compte par la modélisation.

Pour l'ensemble des simulations, le coefficient de friction pour le contact entre les plateaux est de **0,1**.

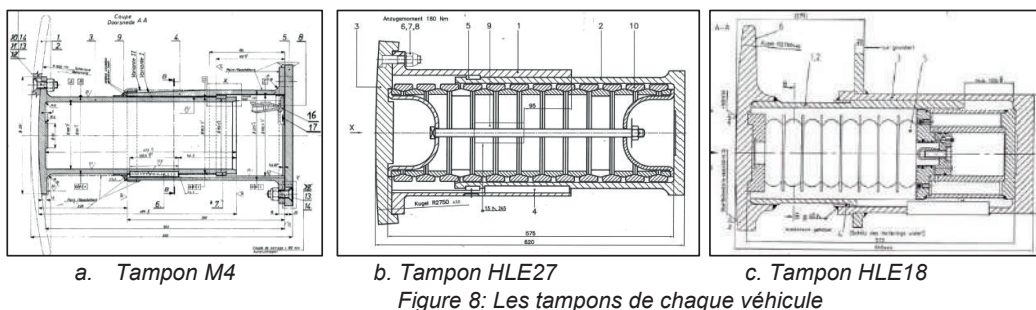


Figure 8: Les tampons de chaque véhicule

2.4 Modèle réduit du train

Le modèle complet (figure 9) du train déraillé se compose de onze voitures M4, deux locomotives HLE27 et tracté par une locomotive HLE18.

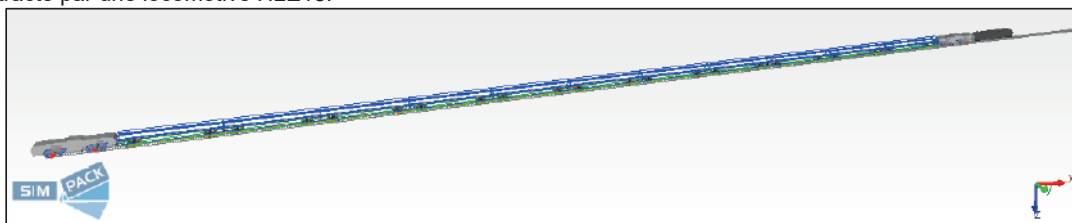


Figure 9 : Modèle complet du train déraillé

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	9/36

Cependant, afin de réduire le temps de calcul, un modèle réduit (figure 10) est utilisé dans le cadre de cette étude. Pour ce modèle réduit, les éléments ci-dessous sont modélisés :

- Une locomotive HLE18 simplifiée pour l'application de l'effort de freinage;
- Un ensemble choc et traction pour le couplage HLE18/HLE27;
- Une locomotive HLE27;
- Un ensemble choc et traction pour le couplage HLE27/M4;
- Deux voitures M4 (représentant les voitures No. 58008 et No. 52363);
- Deux ensembles choc et traction pour le couplage M4/M4;
- Une dernière voiture M4 simplifiée pour le contrôle de vitesse de circulation.

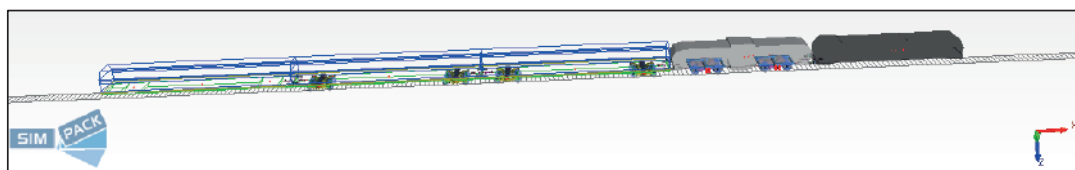


Figure 10 : Modèle réduit utilisé dans le cadre de cette étude

NOTA : Les résultats obtenus avec le modèle réduit sont similaires à ceux obtenus avec le modèle complet. La modélisation retenue est donc sans impact sur les résultats et a pour but de réduire les temps de calculs.

2.5 Modélisation de la voie et du profil de rail

Le tracé de la voie de la zone de déraillement identifiée dans le lot 1 est modélisé (figure 11). Cependant, une erreur sur la longueur d'alignement entre les zones 6BE et 14AE a été identifiée, celle-ci passant de 37,18m à 8,1m.

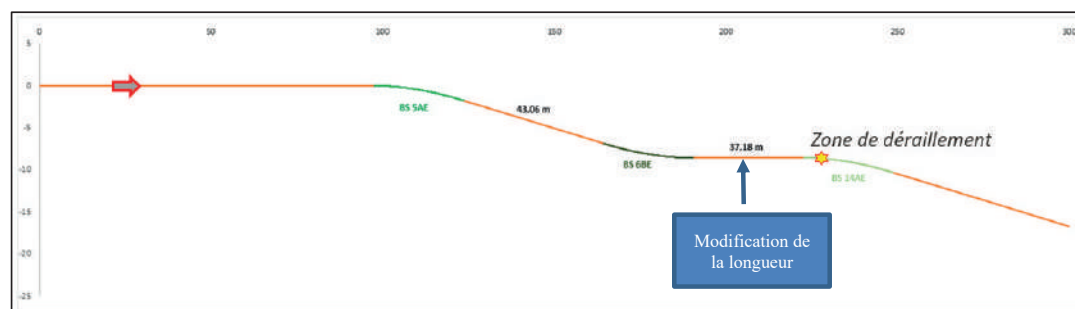


Figure 11 : Tracé de la voie de la zone de déraillement

Cette voie sans dévers est constituée de 3 courbes et des sections en alignement :

- Alignement de 116 m (début de la simulation);
- Pleine courbe centrée à droite de rayon 215,06 m sur 19,28 m puis de rayon 208,79 m sur 3,38 m (aiguillage BS 5AE);
- Alignement de 43,06 m;
- Pleine courbe centrée à gauche de rayon 208,79 m sur 3,38 m puis de rayon 215,06 m sur 19,28 m (aiguillage BS 6BE);
- Alignement de **8,1 m** (au lieu de 37,18m initialement modélisé);
- Pleine courbe centrée à droite de rayon 215,06 m sur 19,28 m puis de rayon 208,79 m sur 3,38 m (aiguillage BS 14AE);
- Alignement de 83 m (fin de la simulation).

Les défauts géométriques de voie (nivellement, dressage, gauche et écartement) ne sont disponibles que pour la ligne 36 voie A (ligne bleue sur la figure 12). Cependant, cette ligne n'est pas le parcours emprunté par le train déraillé. Le déraillement a eu lieu autour de l'aiguillage 14AE.

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	10/36

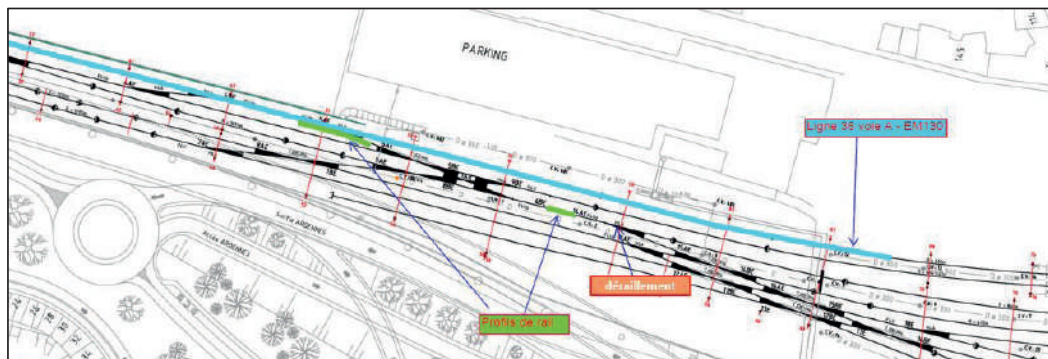


Figure 12 : zones avec les mesures disponibles de défauts de voie et de profil de rail

Concernant les profils de rail, les mesures disponibles sont dans les 2 zones (parties vertes sur la figure 12) de quelques dizaines de mètres avant la zone de déraillement. De plus, les données fournies par le client sont des images (figure 13). Ces images ne sont pas exploitables directement pour le logiciel SIMPACK car des données (coordonnées) numériques sont nécessaires. Pour exploiter toutefois ces informations, les images sont importées dans le logiciel CATIA et traitées par une macro que nous avons créée afin d'obtenir les coordonnées des points (figure 14). Ces données sont ensuite transformées en un format compatible avec SIMPACK.

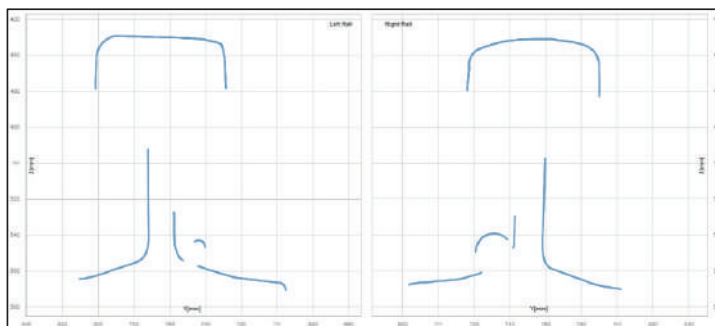
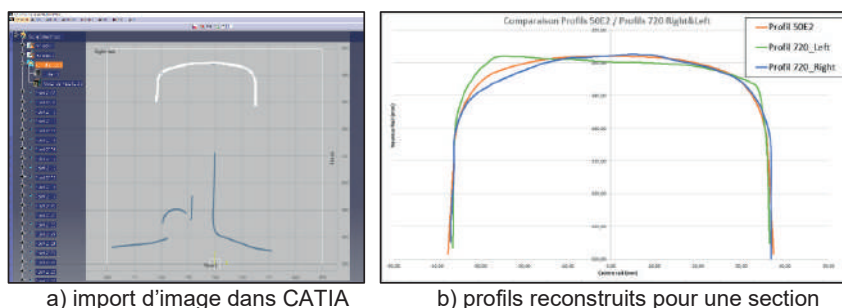


Figure 13 : Une image de profils mesurés de rail avant la zone de déraillement



a) import d'image dans CATIA

b) profils reconstruits pour une section

Figure 14 : Reconstruction des profils de rail

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	11/36

Des données complémentaires ont finalement été fournies sur la zone 14AE concernant les profils de rails. La même macro a été utilisée pour reconstruire les profils et les prendre en compte dans les simulations.

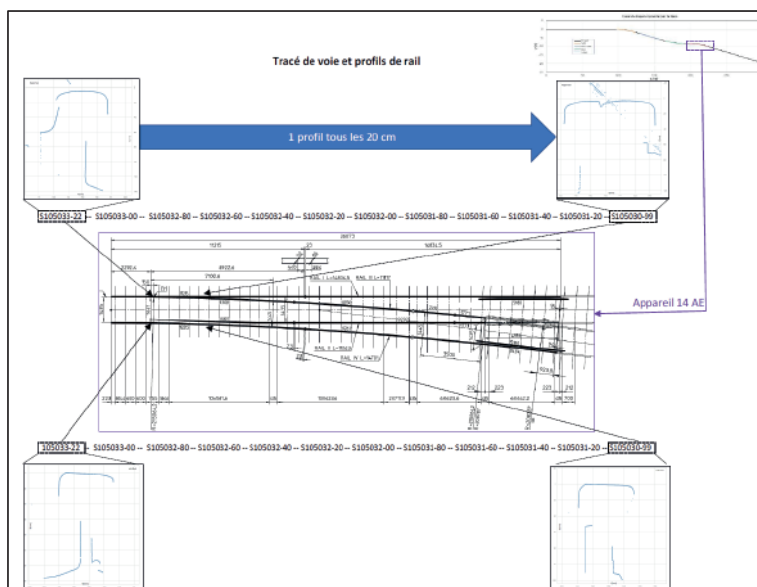


Figure 15 : Tracé de voie et N° des profils de rails sur la zone 14AE

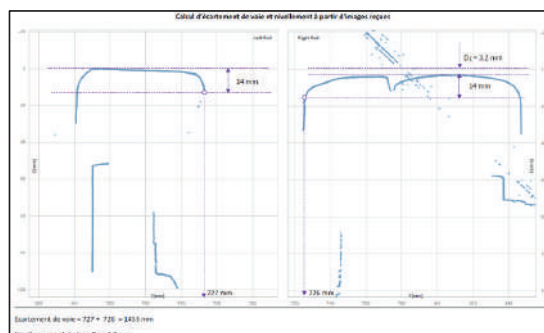


Figure 16 : Une image de profils mesurés de rail sur la zone 14AE

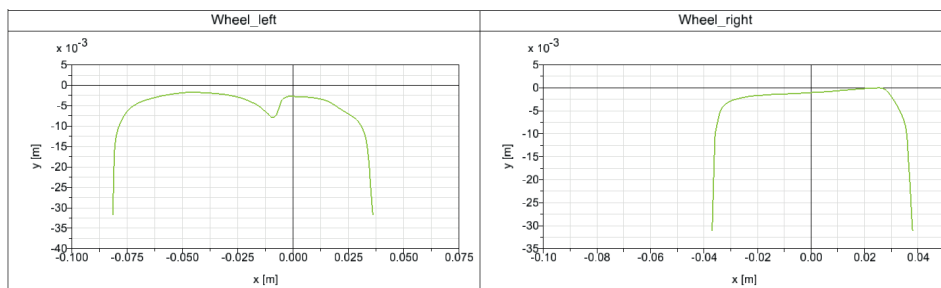


Figure 17 : Reconstruction des profils de rail – Zone 14AE

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	12/36

3 Résultats avec tracé initial : Alignement 37,18m

3.1 Critères utilisés pour cette étude de déraillement

Comme évoqué dans la section 2.4, le modèle réduit d'un train est utilisé dans cette étude. Le train circule avec une vitesse d'environ 30 km/h sur la voie présentée dans la section 2.5. La locomotive HLE18 est freinée avec une force constante.

Afin d'étudier le risque de déraillement, deux critères sont utilisés (figure 18) :

- Le soulèvement (dz) de la roue extérieure de l'essieu de tête (roue extérieure à la courbe considérée).
- Le ratio des efforts de contact Y/Q. Y est l'effort transversal. Q est l'effort vertical.

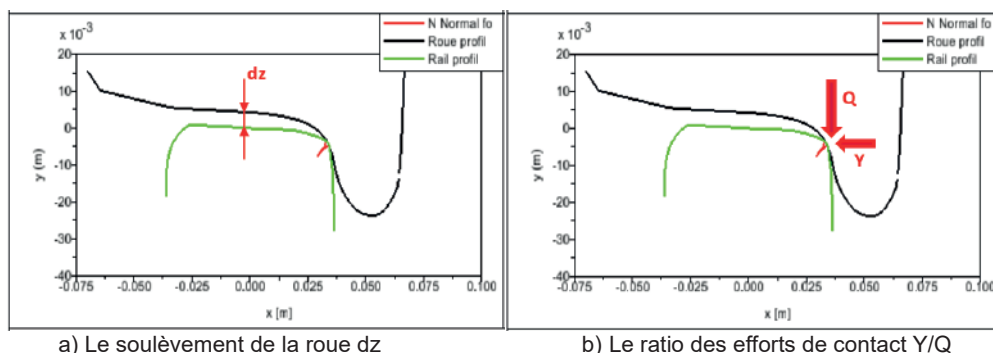


Figure 18 : critères utilisés pour l'étude de risque de déraillement

La norme européenne EN14363 :2016+A1 :2018 donne des valeurs limites pour ces 2 quantités lors des essais dédiés :

- Pour les essais d'homologation de l'aptitude au franchissement des gauches de voie sans déraillement, la valeur limite du soulèvement de la roue est $dz < dz_{lim} = 5 \text{ mm}$. Cependant, il faut noter que cela correspond à des conditions bien définies par la norme (rayon de courbe de 150 m, gauche de 7 mm/m).
- Pour les essais d'homologation du comportement en dynamique du train, le coefficient de déraillement Y/Q pour la roue d'attaque doit rester inférieur à $Y/Q_{lim} = 0,8$.

NOTA : ces valeurs « limites » ont été prises pour disposer d'un ordre de grandeur (à titre indicatif). L'idée de notre étude est de quantifier l'influence des paramètres identifiés vis-à-vis du phénomène de déraillement.

3.2 Cas de référence

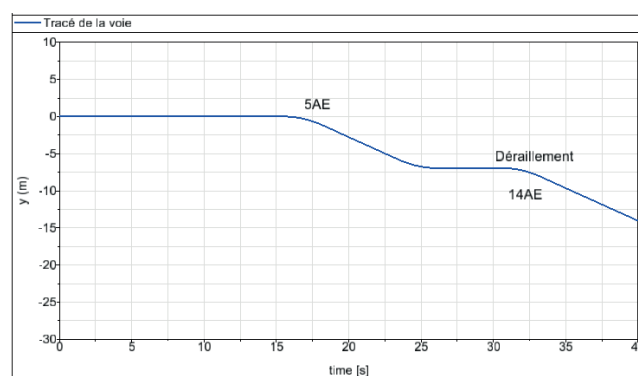
Le premier calcul de référence est réalisé en utilisant les paramètres ci-dessous :

- Profil de rail : 50E2 (profil neuf)
- Profil de roue: S1002 (profil neuf)
- Coefficient de frottement entre la roue et le rail: $\mu = 0.5$
- Effort de freinage: $F = 150 \text{ kN}$
- Ecartement de voie: $e = 1448 \text{ mm}$
- Voie parfaite sans défauts
- Train avec les caractéristiques nominales

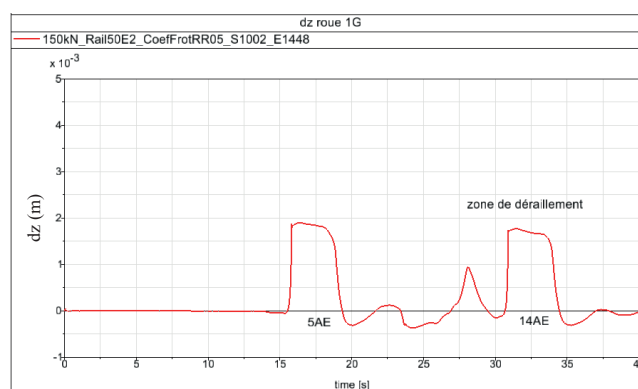
Le soulèvement et le ratio Y/Q de la roue gauche du premier essieu de la première voiture (la roue la plus critique) sont tracés ci-dessous (figures 19b et 19c).

Nota : l'écartement de voie de 1448 mm (dans l'appareil de voie) est issu de données mesurées fournies (fiche de contrôle d'appareil de voie 14AE post accident).

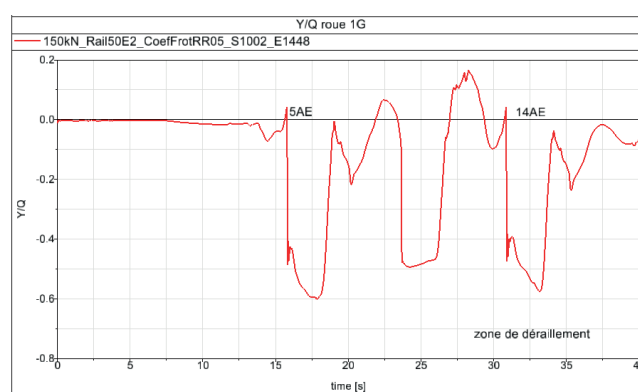
Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	13/36



a) Tracé de la voie



b) Soulèvement de la roue gauche du premier essieu



c) Ratio Y/Q de la roue gauche du premier essieu

Figure 19 : Résultats du cas de référence

Nous constatons que les critères de risque de déraillement ne sont pas dépassés pour ce cas de référence ($dz < 2 \text{ mm}$, $Y/Q < 0.6$). Cependant, cela montre que la zone de déraillement (aiguille 14AE) est une zone **sensible** vis-à-vis de ces 2 critères de déraillement. Nous remarquons aussi que le comportement du train dans les 2 zones (aiguilles 5AE et 14AE) est quasi identique. Ceci est logique car dans ce calcul de référence il n'y a pas de défauts et les caractéristiques des aiguillages sont identiques.

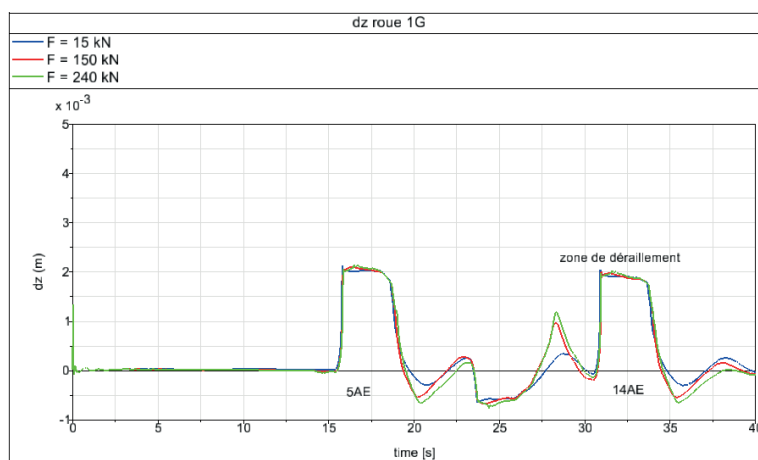
Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	14/36

3.3 Cas 1 : Influence de l'effort de freinage

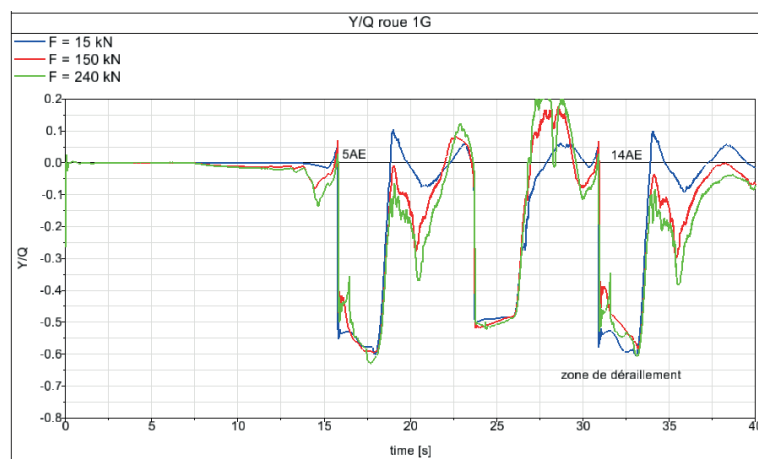
Selon l'analyse du lot 1 (document de référence P/CIM CAB3/2021-2446), l'effort de freinage est de l'ordre de 150 kN. Cependant, à la demande du client, une étude de l'influence de ce paramètre a été réalisée dans le cadre de ce lot 2. Pour cette étude, les paramètres du modèle sont :

- profil de rail neuf 50E2;
- profils mesurés de roue (Nota: le profil de roue mesuré n'a pas d'impact sur les résultats car très proche de roue neuve pour la roue concernée).
- coefficient de frottement de contact roue-rail : 0,5;
- écartement de voie : 1448 mm.

Les résultats obtenus en utilisant 3 valeurs d'effort de freinage de 15 kN, 150 kN et 240 kN, sont présentés ci-dessous (figure 20).



a) Soulèvement de la roue gauche du premier essieu



b) Ratio Y/Q de la roue gauche du premier essieu

Figure 20 : Influence de l'effort de freinage

Nous constatons que l'influence de l'effort de freinage sur le risque de déraillement est **faible**. Le fait que l'effort de freinage n'a pas une influence notable alors qu'on attendait une influence dans une courbe en S peut être expliqué par le fait que les courbes successives sont suffisamment éloignées les unes des autres (environ 40 m). L'effort longitudinal de compression dans le présent cas n'a donc pas d'effet notable sur le risque de déraillement. Le reste de l'étude retient l'effort initialement déterminé pour le freinage : 150 kN.

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

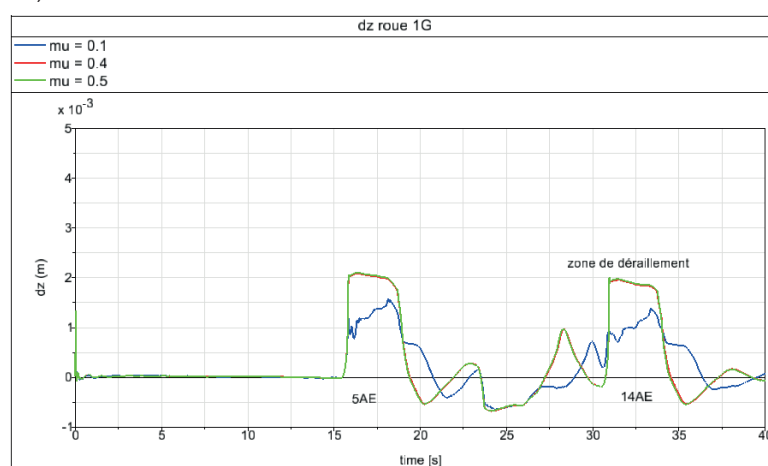
Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	15/36

3.4 Cas 2 : Influence du coefficient de frottement de contact roue-rail

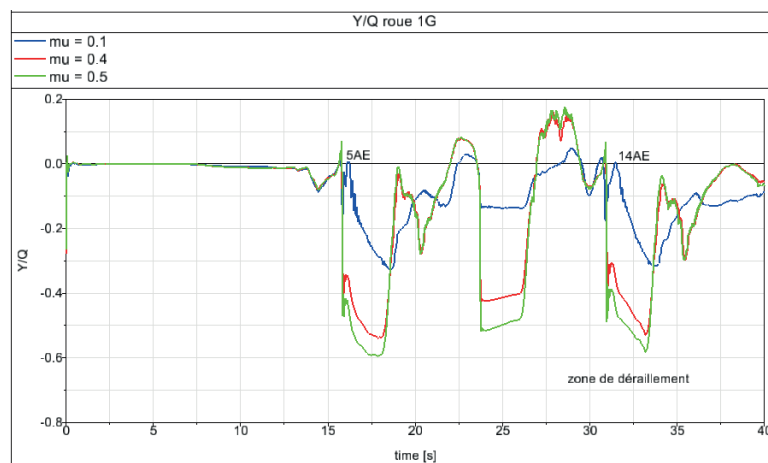
Dans cette section, l'influence du coefficient de frottement de contact roue-rail (différent selon les conditions locales et météorologiques) sur le risque de déraillement est étudiée. Pour cette étude, les paramètres du modèle sont :

- profil de rail neuf 50E2;
- profil de roue neuve S1002;
- effort de freinage: $F = 150 \text{ kN}$;
- écartement de voie : 1448 mm.

Les résultats obtenus en utilisant 3 valeurs du coefficient de frottement de 0,1 ; 0,4 et 0,5 sont présentés ci-dessous (figure 21).



a) Soulèvement de la roue gauche du premier essieu



b) Ratio Y/Q de la roue gauche du premier essieu

Figure 21 : Influence du coefficient de frottement de contact roue-rail

Ces résultats montrent que l'influence du coefficient de frottement du contact roue-rail sur le risque de déraillement est **notable**. Un rail sec augmente sensiblement le risque de déraillement.

Nota : Avec une voie parfaite (sans défauts, sans usure...) et un train nominal (sans déformation, masses équilibrées...), la zone de déraillement reste sensible mais les critères de déraillement sont toujours inférieurs aux valeurs limites quel que soit l'état de surface du contact roue-rail.

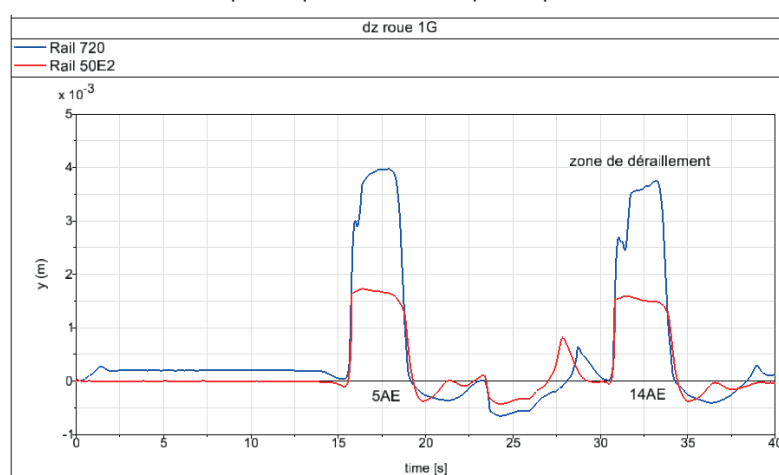
Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	16/36

3.5 Cas 3 : Influence du profil de rail

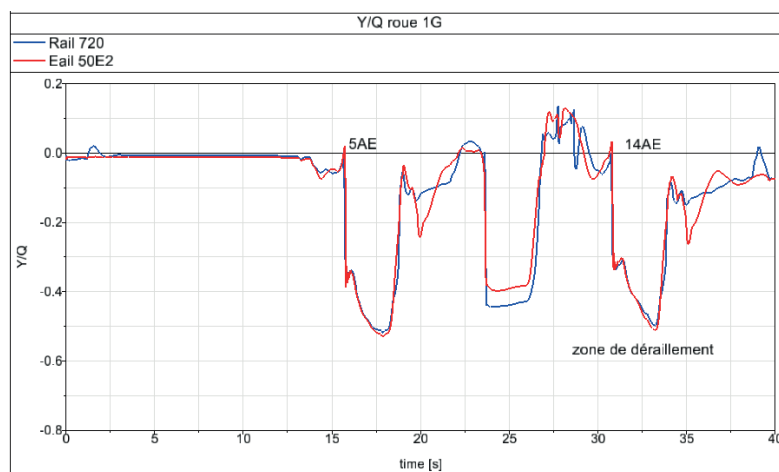
Pour cette étude, les paramètres du modèle sont :

- profil de roue neuve S1002;
- effort de freinage: $F = 150 \text{ kN}$;
- coefficient de frottement : 0.4
- écartement de voie : 1448 mm.

Nous présentons ci-dessous (figure 22) les résultats obtenus en utilisant 2 profils de rail : un rail neuf 50E2 et un rail usé (rail 720). Ce profil de rail usé est celui mesuré à quelques dizaines de mètres avant la zone de déraillement (14AE). Cette étude vise juste à montrer l'influence du profil de rail. Comme les profils exacts dans la zone de déraillement ne sont pas disponibles, elle ne peut représenter la réalité sur la zone.



a) Soulèvement de la roue gauche du premier essieu



b) Ratio Y/Q de la roue gauche du premier essieu

Figure 22 : Influence du profil de rail

Ces résultats montrent que l'influence du profil de rail usé sur le risque de déraillement est **notable**. Il est par ailleurs important de préciser qu'au voisinage de l'aiguille 14AE (comme pour tout aiguillage), la conception de base impose un changement progressif du profil de rail, ce qui influe donc nécessairement sur les critères de risque de déraillement (sans que l'on puisse dire dans quel sens, ni dans quelle proportion). Dans notre simulation, ce changement de profil de rail/aiguille n'est pas modélisé.

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

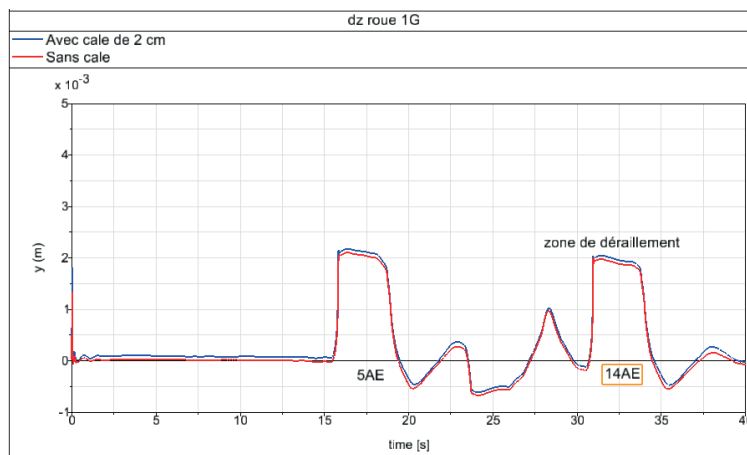
Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	17/36

3.6 Cas 4 : Influence d'un défaut de gauche de bogie et/ou de voie

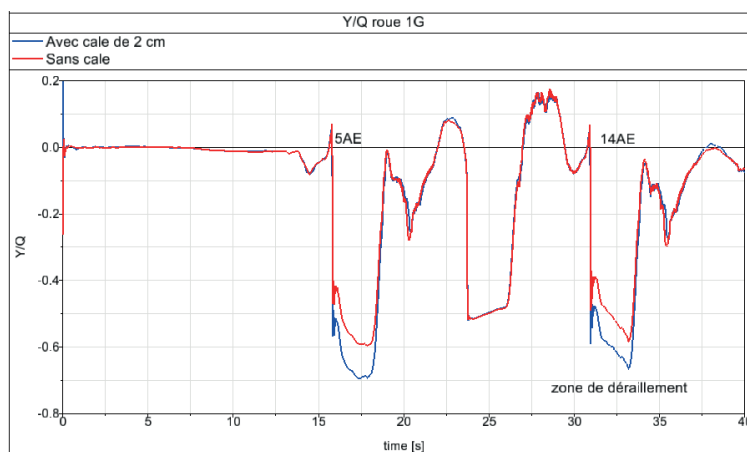
Il est connu qu'un gauche lié à la déformation du bogie et/ou à un défaut de voie augmente le risque de déraillement. Cependant, en l'absence de données réelles disponibles pour préciser la valeur de gauche de voie et de bogie, nous modéliserons ces défauts de gauche (voie et bogie), pour une étude paramétrique, en ajoutant une cale de 20 mm au niveau de la suspension primaire de la première roue extérieure gauche. Cela est équivalent à un gauche total (voie et bogie) de 7,8 mm/m.

Pour cette étude, les paramètres du modèle sont :

- profil de roue neuve S1002;
- profil de rail neuf 50E2;
- effort de freinage: $F = 150$ kN;
- coefficient de frottement : 0.5;
- écartement de voie : 1448 mm.



a) Soulèvement de la roue gauche du premier essieu



b) Ratio Y/Q de la roue gauche du premier essieu

Figure 23 : Influence de défaut de gauche de bogie et de voie

Les résultats obtenus (figure 23) montrent bien qu'un défaut de gauche augmente le risque de déraillement. Cependant, avec un rail neuf et sans autres défauts de voie (dressage, nivellement), les valeurs de 2 critères sont toujours inférieures aux valeurs limites.

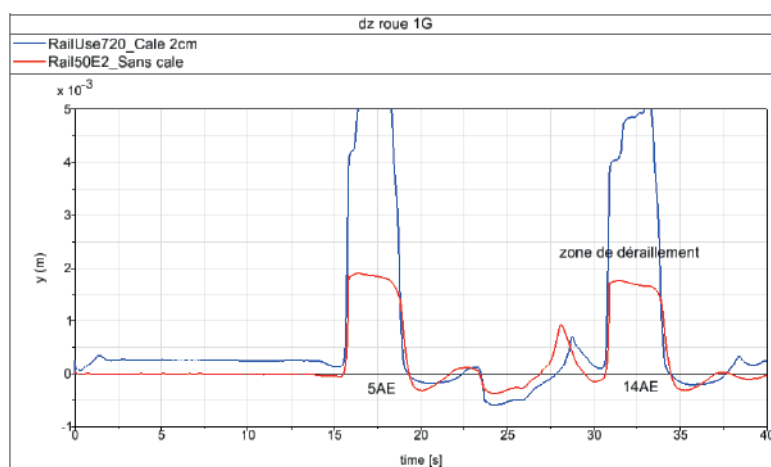
Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	18/36

3.7 Cas 5 : Influence de défaut de gauche combiné avec un rail usé

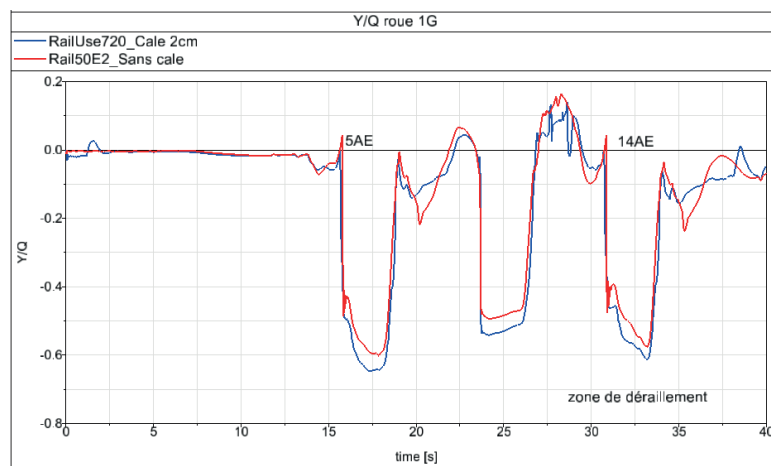
Dans cette section, nous considérons une combinaison d'un défaut de gauche (cale de 20 mm) avec un rail usé (rail 720). Les autres paramètres du modèle sont :

- profil de roue neuve S1002;
- effort de freinage: $F = 150$ kN;
- coefficient de frottement : 0.5;
- écartement de voie : 1448 mm.

Les résultats obtenus sont comparés avec le cas d'un rail neuf 50E2, sans défaut de gauche (figure 24).



a) Soulèvement de la roue gauche du premier essieu



b) Ratio Y/Q de la roue gauche du premier essieu

Figure 24 : Influence d'une combinaison de défaut de gauche et rail usé

Nous constatons qu'en combinant différents paramètres, un déraillement pourrait avoir lieu (critère de soulèvement $dz=5$ mm dépassé).

Il est important de noter que parmi tous ces calculs, le risque de déraillement d'un véhicule est similaire entre les 2 zones, 5AE et 14AE quelles que soit les configurations analysées. Ces résultats sont obtenus en considérant un profil de rail (et aiguille) constant sur la voie et sans défauts de voie. Par conséquent, une différence de profil de rail (et aiguille) et/ou des défauts de voie entre ces 2 zones est à prendre en considération pour expliquer le déraillement sur la zone 14AE.

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	19/36

4 Résultats avec tracé modifié : Alignement 8,1m

4.1 Méthodologie de calculs

Comme évoqué dans la section 2.5, le tracé de la voie a été modifié au niveau de l'alignement entre les zones 6BE et 14AE, afin de tenir compte de la longueur réelle de l'alignement (8,1m au lieu de 37,18m).

De plus, les résultats de calculs initiaux, objet du §3, ont permis d'identifier l'influence de certains paramètres sur le risque de déraillement et ne feront donc pas l'objet d'une nouvelle analyse :

- Le coefficient de frottement au niveau du contact roue-rail joue un rôle important. Un rail sec augmente sensiblement le risque de déraillement. Par conséquent, le coefficient de frottement entre la roue et le rail: $\mu = 0.5$, est considéré dans les nouvelles simulations,
- Les défauts de gauche liés à la déformation du bogie ou de la voie et/ou le déséquilibre de charge à la roue augmentent fortement le risque de déraillement. Ces paramètres ne seront pas considérés dans les nouvelles simulations

Par conséquent, les calculs seront menés avec les paramètres ci-dessous. Certains paramètres vont être modifiés afin de voir l'impact sur le ratio d'efforts Y/Q

- Alignement 6BE - 14AE : 37,18m et 8,1m => §4.3
- Effort de freinage : $F = 15 \text{ kN}$ et 150 kN => §4.4
- Ecartement de voie : $e = 1448 \text{ mm}$, 1452 mm , 1455 mm et 1458 mm => §4.5
- Profil de rail : 50E2 (profil neuf) et mise en place des profils réels => §4.6
- Profil de roue: S1002 (profil neuf),
- Coefficient de frottement entre la roue et le rail: $\mu = 0.5$.
- Voie parfaite sans défauts,
- Train avec les caractéristiques nominales,

Le modèle réduit d'un train est utilisé dans cette étude. Le train circule avec une vitesse d'environ 30 km/h sur la voie présentée dans la section 2.5. La locomotive HLE18 est freinée avec une force constante.

4.2 Critères utilisés pour cette étude de déraillement

Les critères sont identiques à ceux précisés au §3.1 et rappelés ci-après :

- Pour les essais d'homologation de l'aptitude au franchissement des gauches de voie sans déraillement, la valeur limite du soulèvement de la roue est $dz < dz_{lim} = 5 \text{ mm}$. Cependant, il faut noter que cela correspond à des conditions bien définies par la norme (rayon de courbe de 150 m, gauche de 7 mm/m).
- Pour les essais d'homologation du comportement en dynamique du train, le coefficient de déraillement Y/Q pour la roue d'attaque doit rester inférieur à $Y/Q_{lim} = 0,8$.

NOTA : ces valeurs « limites » ont été prises pour disposer d'un ordre de grandeur (à titre indicatif). L'idée de notre étude est de quantifier l'influence des paramètres identifiés vis-à-vis du phénomène de déraillement.

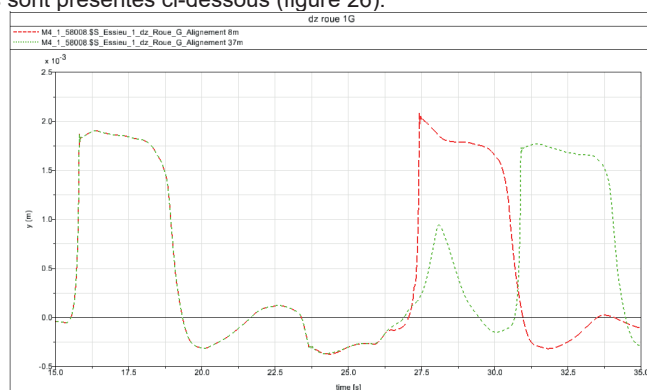
Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	20/36

4.3 Influence du tracé

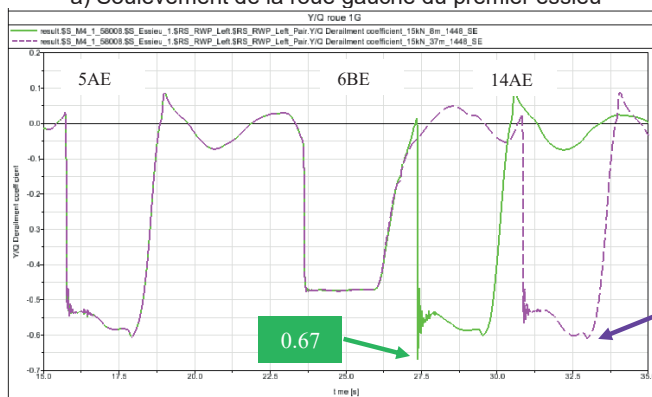
Ce calcul est réalisé en utilisant les paramètres ci-dessous :

- **Alignement 6BE - 14AE : Passage de 37m à 8.1m**
- Effort de freinage : $F = 15 \text{ kN}$
- Ecartement de voie : $e = 1448 \text{ mm}$,
- Profil de rail : 50E2 (profil neuf)
- Profil de roue: S1002 (profil neuf)
- Coefficient de frottement entre la roue et le rail: $\mu = 0.5$

Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous (figure 26).



a) Soulèvement de la roue gauche du premier essieu



b) Ratio Y/Q de la roue gauche du premier essieu

Figure 26 : Influence de l'alignement

La prise en compte de l'alignement de 8,1m au lieu de 37,18m engendre un comportement différent du train sur la zone 14AE. L'enchaînement d'une courbe à gauche (zone 6BE) suivi d'une courbe à droite (zone 14AE) avec un alignement de 8,1m amène :

- Une localisation du ratio maximal des efforts de contact Y/Q en **entrée de courbe**, correspondant à la zone de déraillement, et non en fin de courbe dans le cas d'un alignement de 37,18m,
- Un ratio des efforts de contact **Y/Q plus important sur la zone 14AE** comparé à la zone 5AE alors que ces zones sont identiques en termes de géométrie de voie. Ce ratio est plus élevé, de l'ordre de 20%, suite à un effort Y plus élevé avec un alignement de 8,1m.

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	21/36

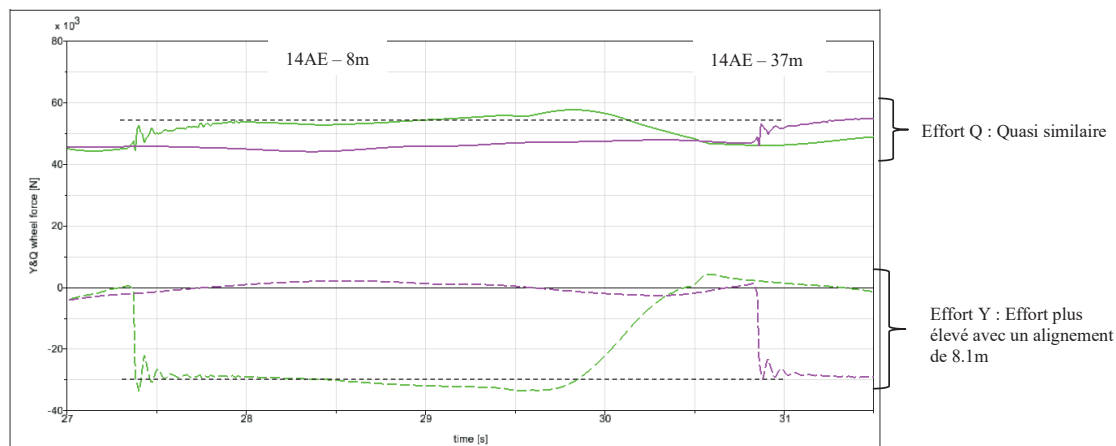


Figure 27 : Influence de l'alignement – Distribution des efforts Y&Q

En conclusion, **la prise en compte de l'alignement de 8,1m au lieu de 37,18m** engendre une augmentation du critère de déraillement (Y/Q) en entrée de la zone 14AE. Ce critère n'est toutefois pas dépassé ($Y/Q < 0.8$) mais les résultats montrent qu'il est sensible aux caractéristiques de tracé de la zone 14AE.

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	22/36

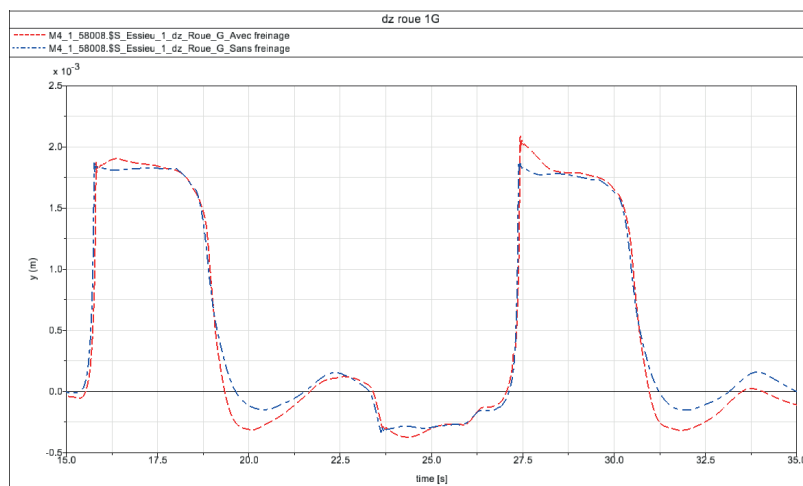
4.4 Influence de l'effort de freinage

Selon l'analyse du lot 1 (document de référence P/CIM CAB3/2021-2446), l'effort de freinage est de l'ordre de 150 kN. Cet effort va donc être injecté sur le train avec les paramètres suivants :

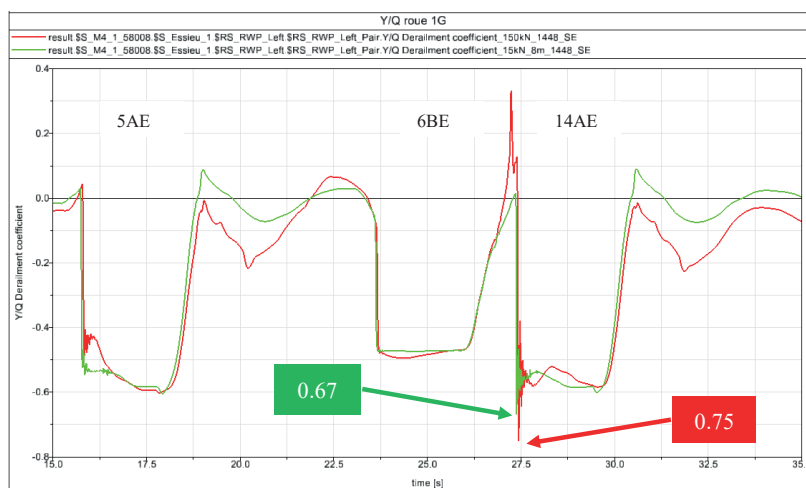
Ce calcul est réalisé en utilisant les paramètres ci-dessous :

- Alignement 6BE - 14AE : 8.1m
- **Effort de freinage : $F = 15 \text{ kN}$ et 150 kN**
- Ecartement de voie : $e = 1448 \text{ mm}$,
- Profil de rail : 50E2 (profil neuf)
- Profil de roue: S1002 (profil neuf)
- Coefficient de frottement entre la roue et le rail: $\mu = 0.5$

Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous (figure 28).



a) Soulèvement de la roue gauche du premier essieu



b) Ratio Y/Q de la roue gauche du premier essieu

Figure 28 : Influence de l'effort de freinage

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	23/36

L'application d'un effort de freinage de 150kN conduit à augmenter le ratio des efforts de contact Y/Q de 12% en passant de 0.67 à 0.75.

Le critère de risque de déraillement, $Y/Q < 0.8$, n'est pas dépassé mais cet effort longitudinal de compression a donc un effet notable sur le risque de déraillement sur cette zone 14AE avec un alignement de 8,1m. On peut d'ailleurs noter d'ailleurs aucune différence de résultats sur la zone 5AE, zone similaire à la zone 14AE.

L'analyse détaillée de la distribution de l'effort Y et Q (figure 29) sur la roue gauche permet d'apporter une meilleure compréhension du phénomène. Nous pouvons noter qu'en entrée de courbe, le freinage amène :

- Pour l'effort Q : une diminution de l'effort d'environ 25% => **Délestage de la roue d'attaque**
- Pour l'effort Y : une diminution de l'effort d'environ 13%

Dans ces conditions, le ratio des efforts de contact Y/Q va donc augmenter d'environ 12%.

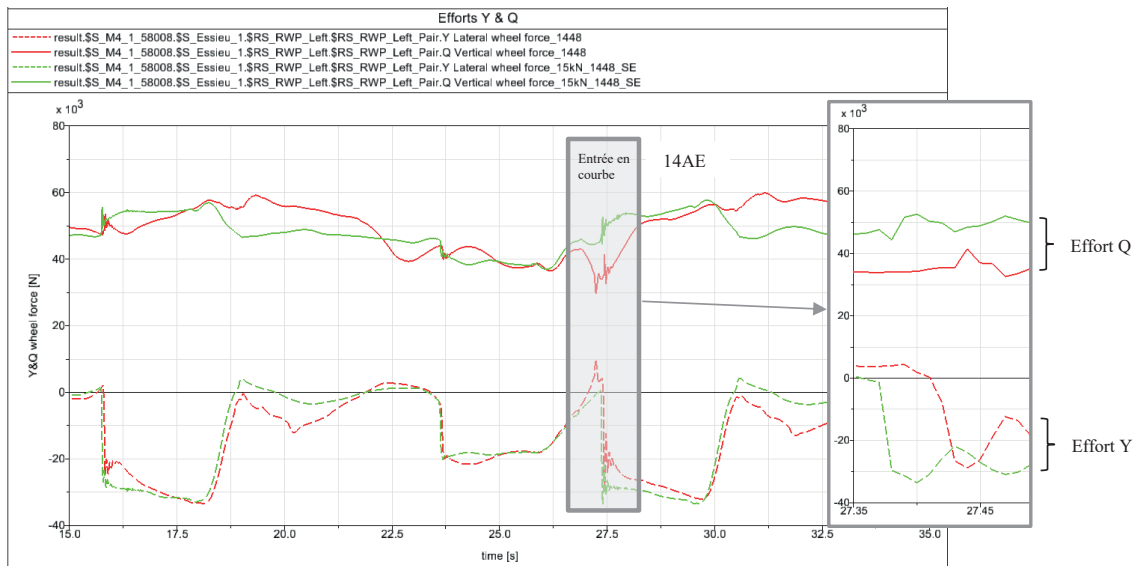


Figure 29 : Distribution des efforts Y&Q

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	24/36

L'application d'un effort de freinage de 150kN provoque donc un fort délestage de la roue d'attaque gauche. Les résultats ci-dessous montrent l'évolution sur les 3 zones (5AE – 6BE – 14AE) de cet effort Q, roue gauche et droite de l'essieu d'attaque, avec et sans freinage. Nous pouvons noter que :

- Point 1&2 : L'application d'un effort de freinage de 150kN entraîne un déséquilibre roue droite et gauche en entrée de courbe et un rééquilibrage en sortie de courbe sur la zone d'alignement plus progressif,
- Point 3 : L'essieu attaque donc la zone 14AE avec un fort déséquilibre gauche droite, qui n'a pu être compensé sur la zone d'alignement de 8m.

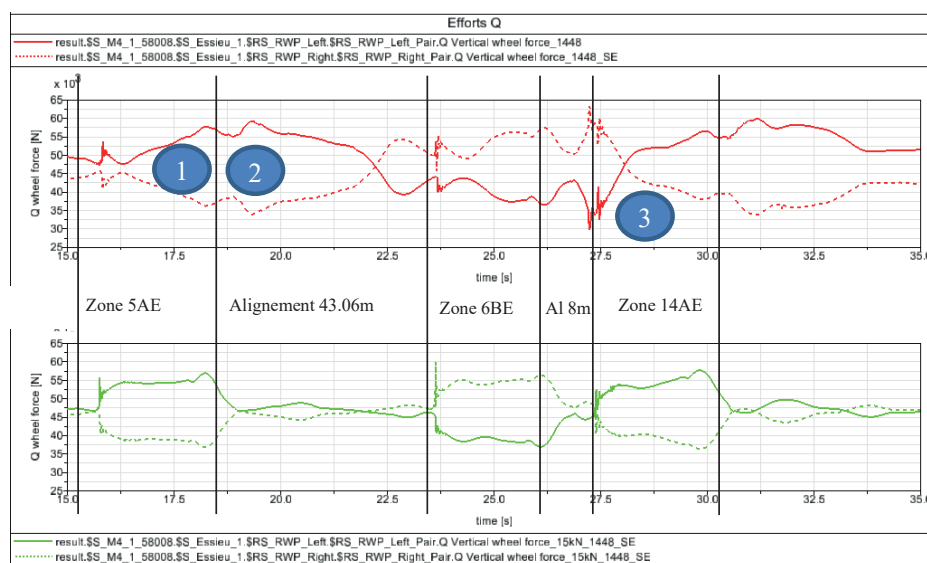


Figure 30 : Distribution des efforts Q – Roue droite et gauche

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	25/36

4.5 Influence de l'écartement des rails avec et sans freinage

Ce calcul est réalisé en utilisant les paramètres ci-dessous :

- Alignement 6BE - 14AE : 8.1m
- **Effort de freinage : $F = 15 \text{ kN}$ et 150 kN**
- **Ecartement de voie : 1448 mm, 1452mm, 1455mm, 1458mm.**
- Profil de rail : 50E2 (profil neuf)
- Profil de roue: S1002 (profil neuf)
- Coefficient de frottement entre la roue et le rail: $\mu = 0.5$

Ces valeurs d'écartement ont été déterminées à partir des profils fournis et retracés sur un logiciel de CAO.

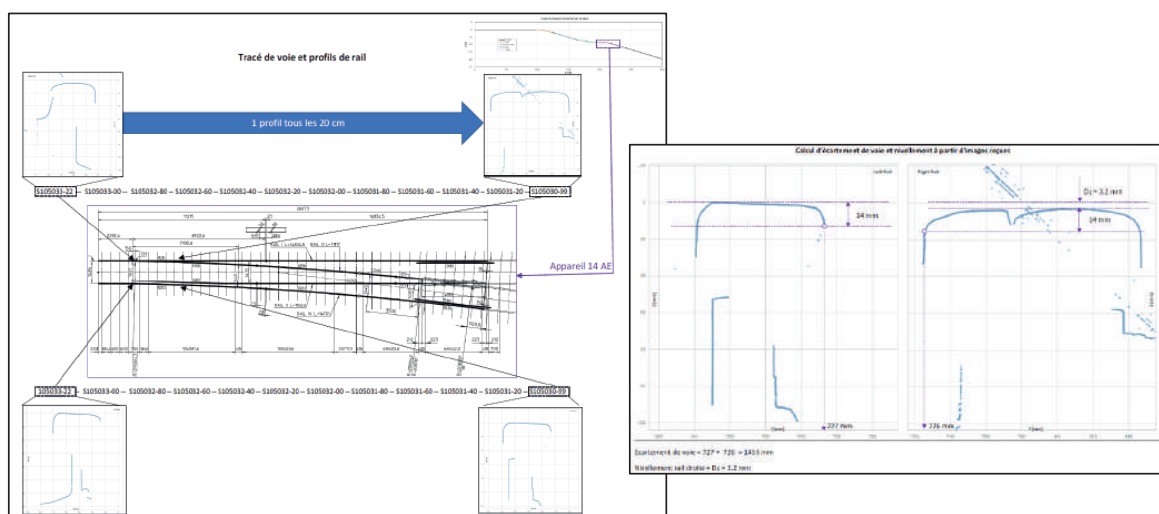


Figure 31 : Tracé de voie et N° des profils de rails sur la zone 14AE

Le graphique ci-dessous montrent l'évolution de cet écartement sur l'entrée de la zone 14AE. Nous pouvons constater que celui-ci est différent de la valeur nominale de 1448mm avec des valeurs comprises entre 1452 et 1461mm.

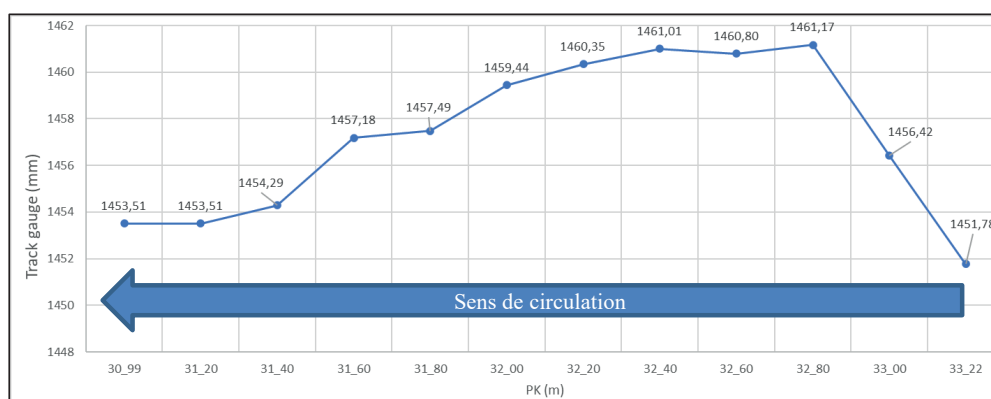


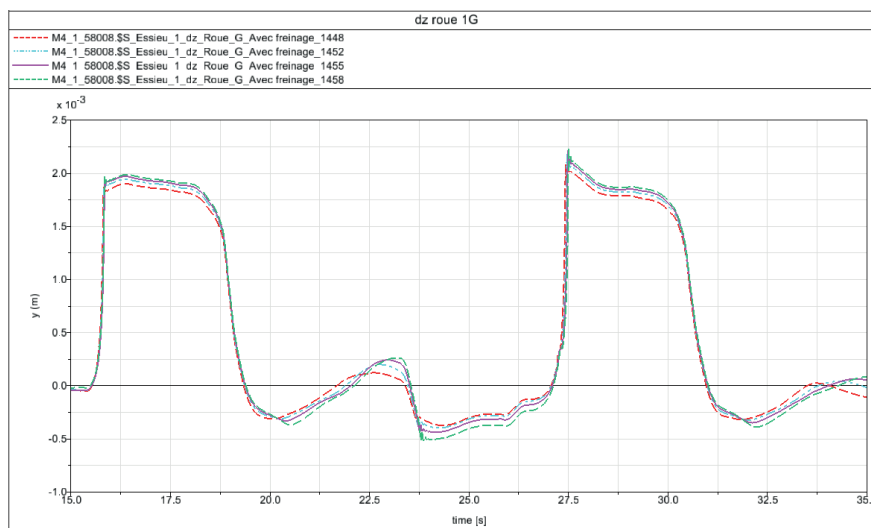
Figure 32 : Ecartement de la voie – Zone 14AE

Par conséquent, les valeurs d'écartement suivantes seront prises dans les calculs : 1452 ; 1455 ; 1458mm

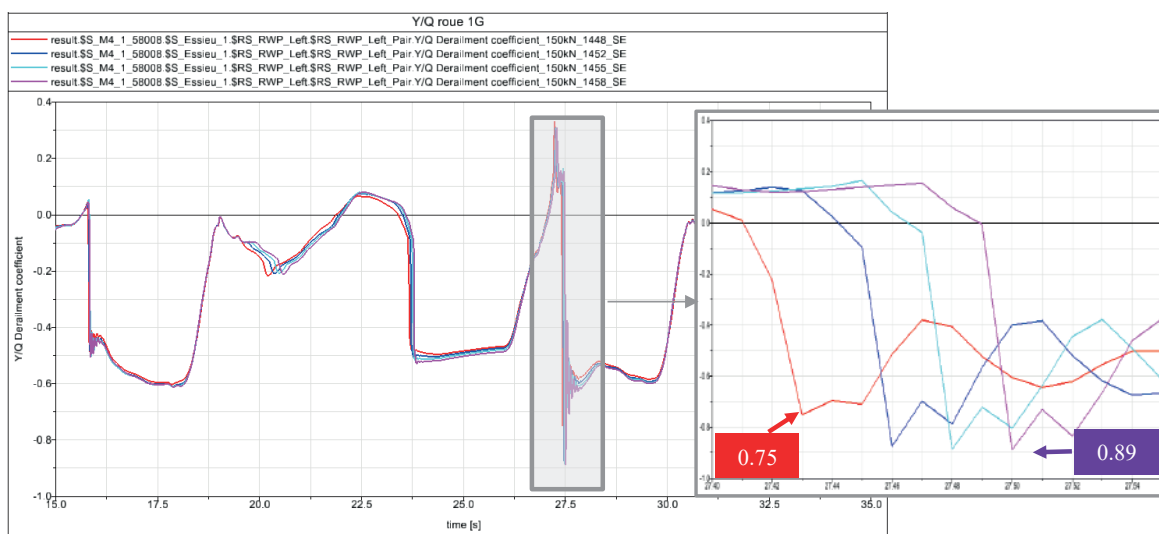
Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	26/36

4.5.1 Avec freinage

Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous (figure 33).



a) Soulèvement de la roue gauche du premier essieu



b) Ratio Y/Q de la roue gauche du premier essieu

Figure 33 : Influence de l'écartement

L'augmentation de l'écartement de voie conduit à augmenter le ratio des efforts de contact Y/Q de 18% en passant de 0.75 à 0.89. Le critère de risque de déraillement, $Y/Q < 0.8$, est donc dépassé. L'analyse détaillée de la distribution de l'effort Y et Q sur la roue gauche permet d'apporter une meilleure compréhension du phénomène. En effet, nous pouvons noter qu'en entrée de courbe,

- Pour l'effort Q : une diminution de l'effort d'environ 16% => **Délestage supplémentaire de la roue d'attaque**
- Pour l'effort Y : une légère augmentation de l'effort Y.

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	27/36

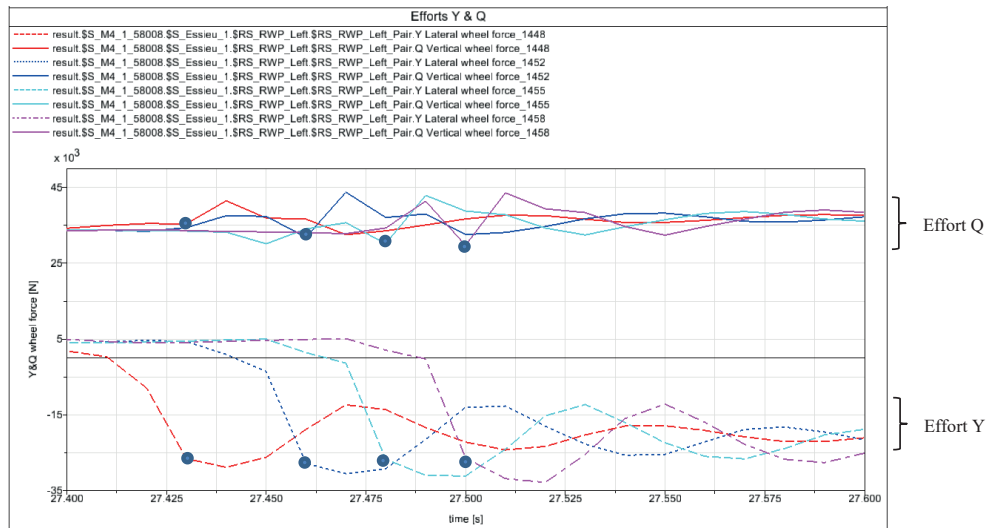


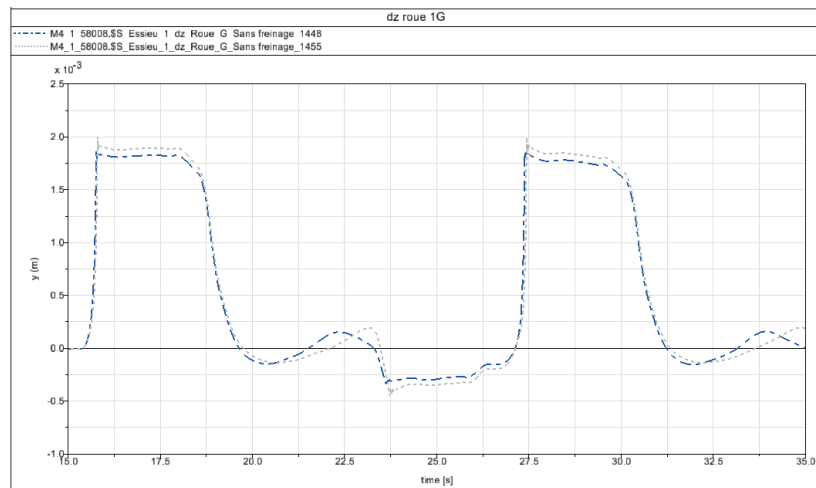
Figure 34 : Distribution des efforts Y&Q

Dans ces conditions, le ratio des efforts de contact Y/Q va donc augmenter.

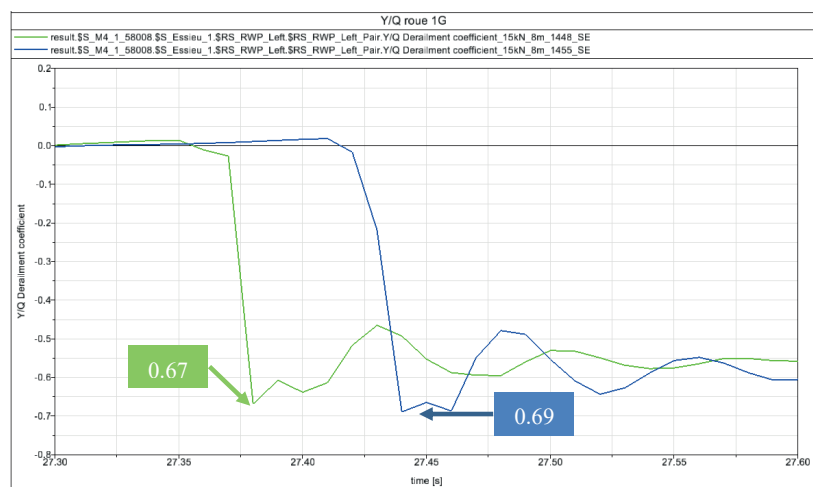
Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	28/36

4.5.2 Sans freinage

Les résultats obtenus, sont présentés ci-dessous (figure 35). L'influence de l'écartement de la voie sur le ratio des efforts de contact Y/Q est négligeable dès lors que l'effort de freinage n'est pas appliqué. En effet, celui est quasi constant comme le montre l'image de gauche.



a) Soulèvement de la roue gauche du premier essieu



b) Ratio Y/Q de la roue gauche du premier essieu

Figure 35 : Influence de l'écartement

Ce résultat est lié à l'évolution des efforts Y et Q lors de l'entrée de courbe du véhicule. Nous pouvons ainsi constater que :

- Pour l'effort Q : une augmentation de l'effort d'environ 10%. Sans freinage, le roulis de l'essieu est possible n'entraînant ainsi pas de délestage de la roue comme constaté avec freinage
- Pour l'effort Y : une augmentation de l'effort d'environ 13% qui vient compenser l'augmentation du Q.

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	29/36

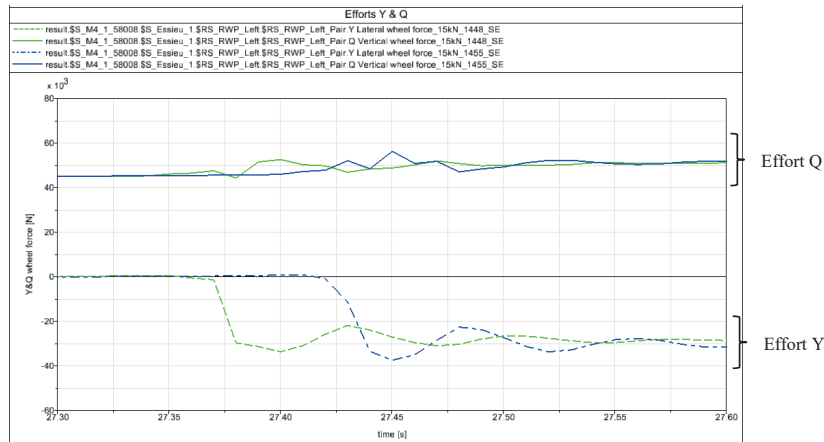


Figure 36 : Distribution des efforts Y&Q

Dans ces conditions, le rapport Y/Q reste quasi constant.

4.5.3 Conclusion

L'augmentation de l'écartement de la voie contribue à augmenter notablement le risque de déraillement quand celui-ci est combiné à un effort de freinage.

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	30/36

4.6 Influence du profil de rail avec et sans freinage

Ce calcul est réalisé en utilisant les paramètres ci-dessous :

- Alignement 6BE - 14AE : 8.1m
- Effort de freinage : $F = 15 \text{ kN}$ et 150 kN
- Ecartement de voie : $e = 1452 \text{ mm}$,
- Profil de rail : 50E2 (profil neuf) et mise en place des profils réels
- Profil de roue: S1002 (profil neuf)
- Coefficient de frottement entre la roue et le rail: $\mu = 0.5$

Ces profils ont été construit à partir des profils fournis et retracés sur un logiciel de CAO. (Voir §2.5)

De plus, les défauts de nivellement n'ont pas pu être défini à partir des profils transmis et cette information n'a pas été fournie par l'activité infrastructure BELGE. Ainsi la position Z de chaque file de rail a été définie à partir des images ci-dessous transmises par le client.

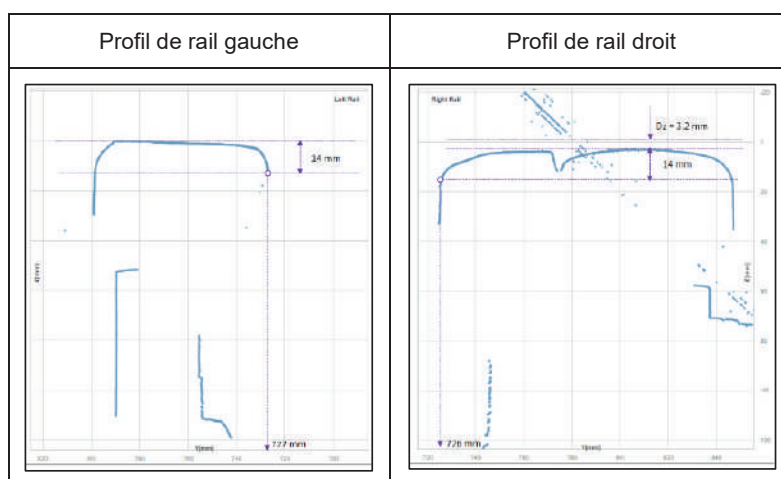


Figure 37 : Image des profils – Position Z

Les positions Y et Z pour chaque profil sont différentes et ont été prise en compte dans les simulations.

- La figure 38 montre la variation de la position Z pour chaque profil, file droite et file gauche.

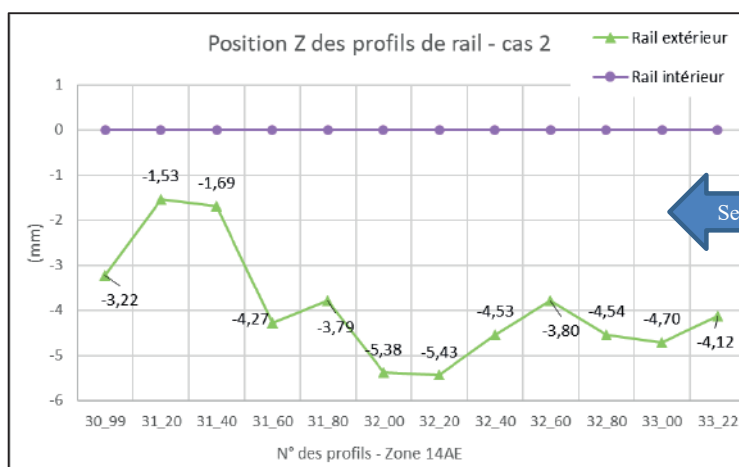


Figure 38 : Position Z de chaque profil

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	31/36

- La figure 39 montre la variation de la position Y pour chaque profil, file droite et file gauche. A noter que les 1ers profils droite et gauche, référencés 33_22, seront positionner à la même côte que le profil théorique utilisé en amont de cette zone afin d'assurer une transition correct. Ainsi, comme le montre la figure ci-dessous, nous pouvons noter que le décalage de ces 1ers profils est de 0mm puis varie par rapport à cette position de référence.

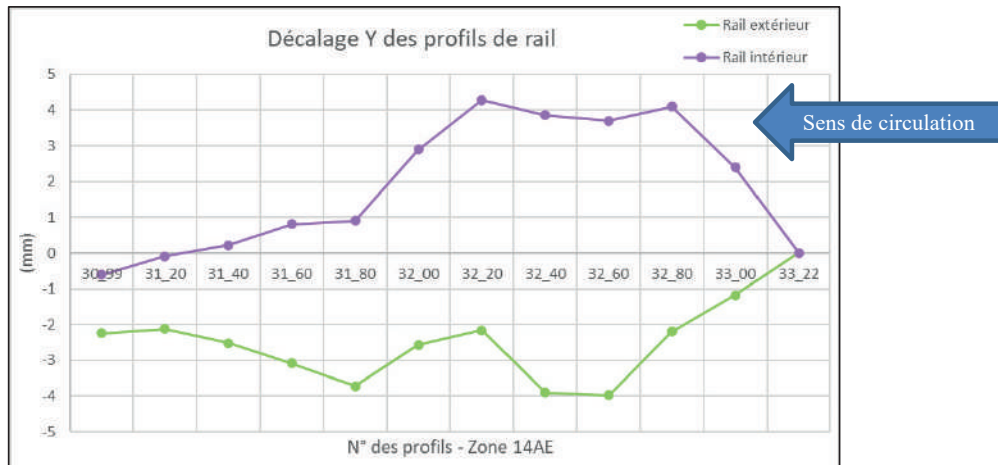


Figure 39 : Position Y de chaque profil

La figure 40 montre ainsi la position Y et Z réelle des profils vis-à-vis du profil théorique en bleu pour une meilleure compréhension de ce point.

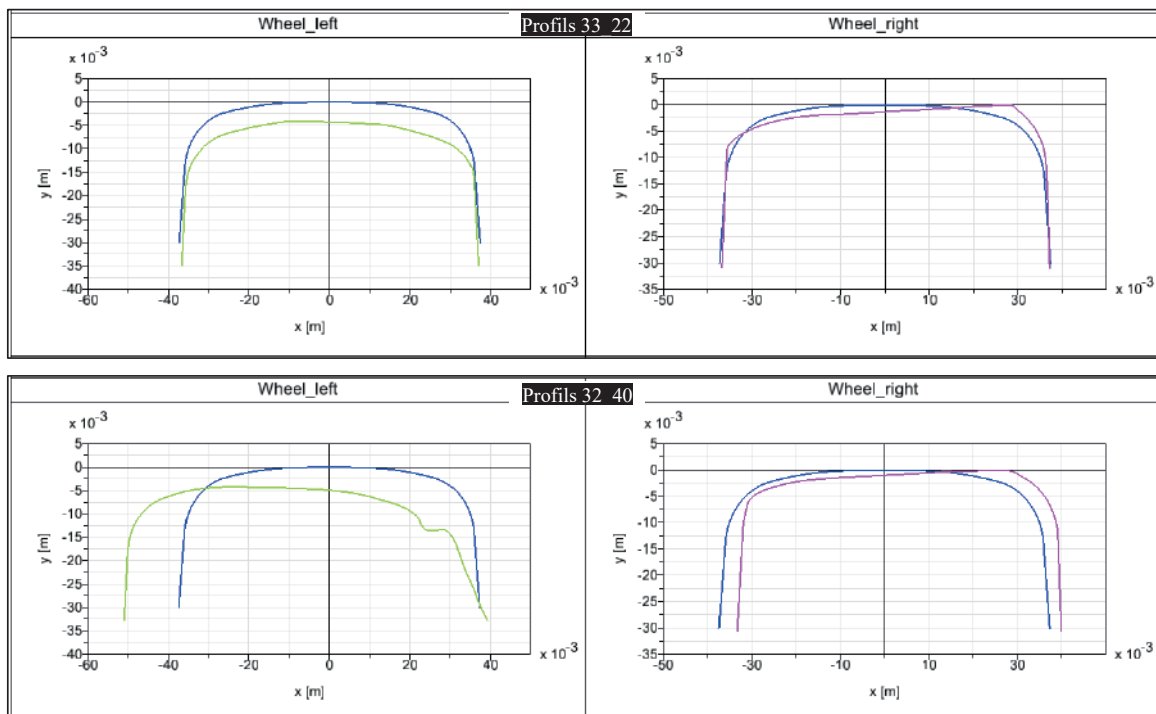


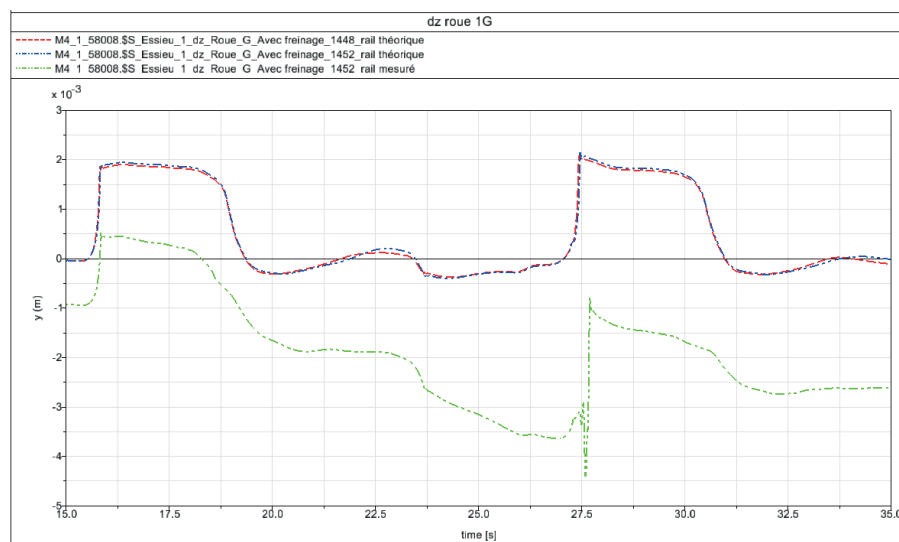
Figure 40 : Position des profils lors de la simulation

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	32/36

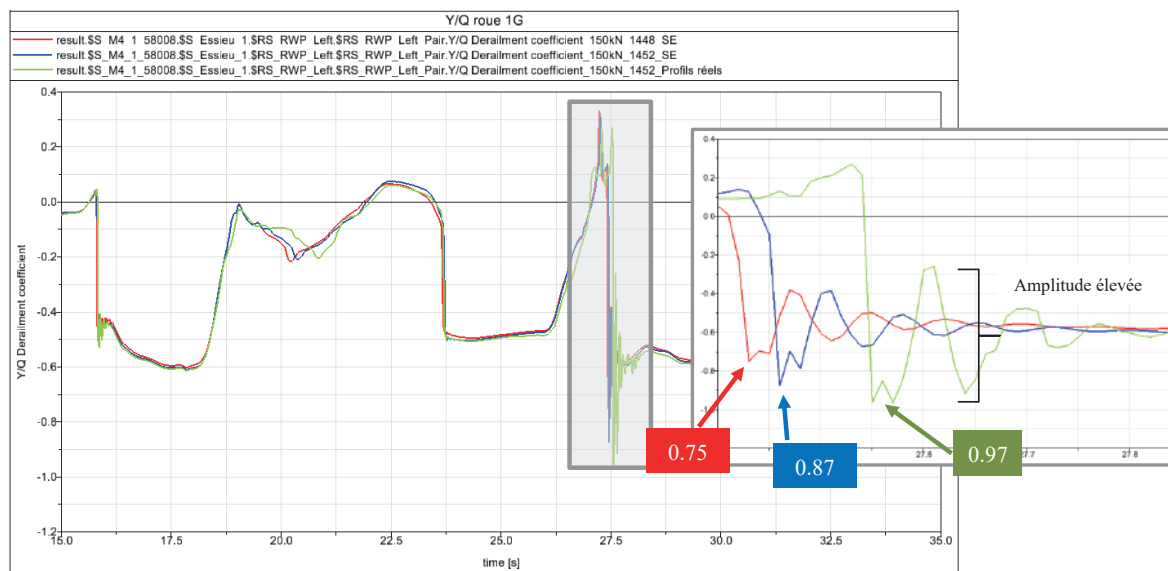
4.6.1 Avec freinage

Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous (figure 41) :

- rail théorique avec écartement 1448 mm (rouge)
- rail théorique avec écartement 1452 mm (bleu)
- rail mesuré avec écartement 1452 mm (vert).



a) Soulèvement de la roue gauche du premier essieu



b) Ratio Y/Q de la roue gauche du premier essieu

Figure 41 : Influence du profil de rail

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	33/36

La prise en compte du profil mesuré dans les simulations conduit à différents comportements :

- Dans l'ensemble, la prise en compte des profils amène une variation du ratio des efforts de contact Y/Q avec de plus grandes amplitudes après le contact avant de se stabiliser en comparaison d'un tracé avec profil théorique. Ce comportement est lié à la variation du profil selon l'axe Y et Z.
- Le ratio des efforts de contact Y/Q de 10% en passant de 0,87 à 0.97. Le critère de risque de déraillement, $Y/Q < 0.8$, est donc dépassé.

L'analyse détaillée de la distribution de l'effort Y et Q sur la roue gauche permet d'apporter une meilleure compréhension du phénomène.

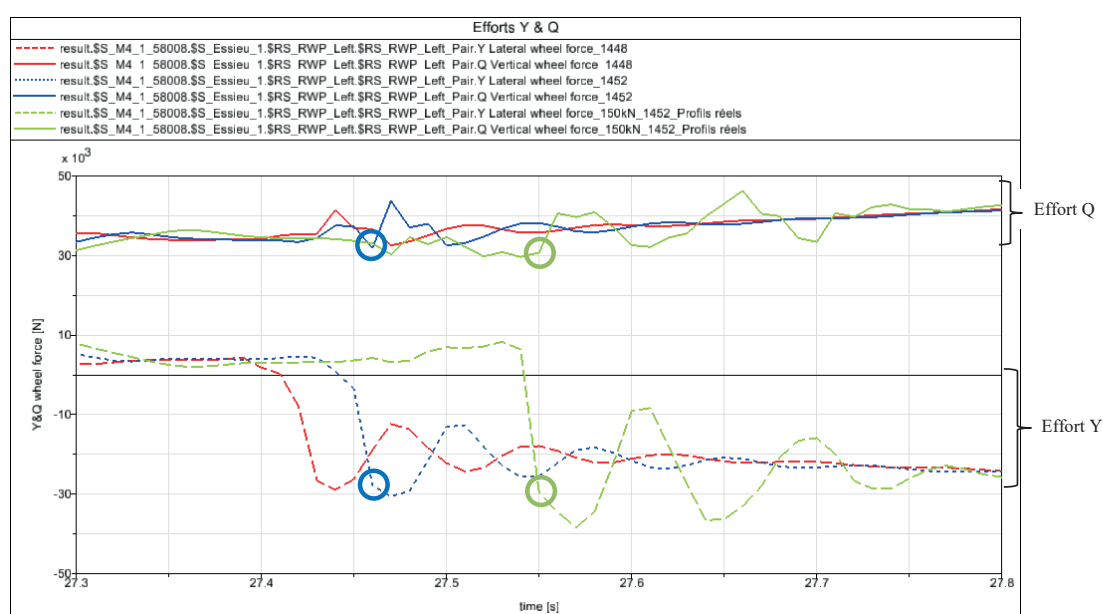


Figure 42 : Distribution des efforts Y&Q

Nous pouvons noter qu'en entrée de courbe, avec des profils réels et écartement de 1452mm :

- Pour l'effort Q : une légère diminution de l'effort d'environ 3,5%.
- Pour l'effort Y : une augmentation de l'effort d'environ 6,5%

Dans ces conditions, le ratio des efforts de contact Y/Q va donc augmenter d'environ 10%.

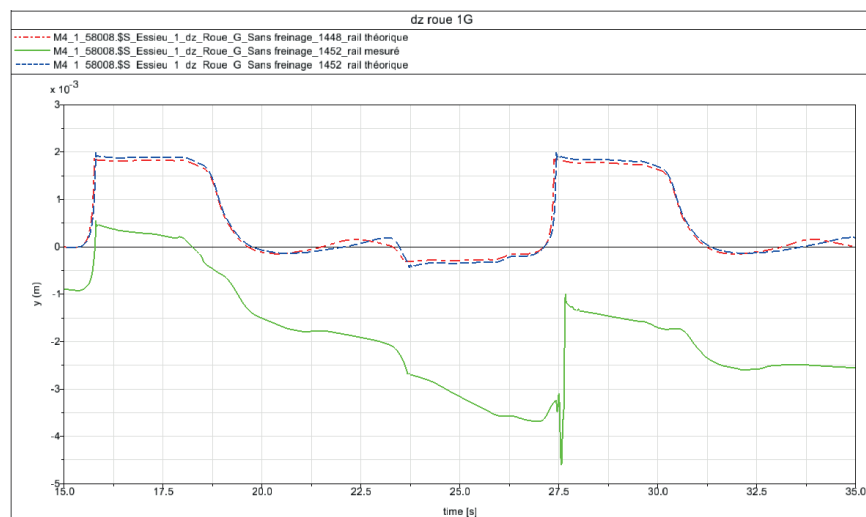
NOTA : Les variations des profils selon Y et Z sont sans impact sur le résultat du ratio des effort Y/Q. Seule la mise en place du profil réel est impactant.

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	34/36

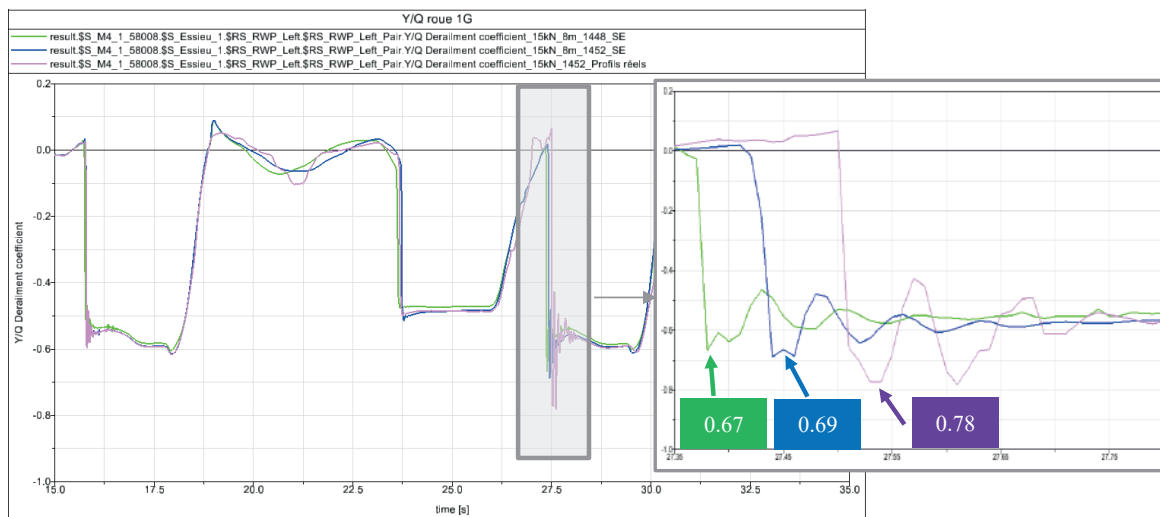
4.6.2 Sans freinage

Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous (figure 43).

La prise en compte du profil mesuré dans les simulations n'est pas sans impact sur le ratio des efforts de contact Y/Q même sans l'effort de freinage. En effet, celui-ci augmente d'environ 15%.



a) Soulèvement de la roue gauche du premier essieu



b) Ratio Y/Q de la roue gauche du premier essieu

Figure 43 : Influence du profil de rail

Ce résultat est lié à l'évolution des efforts Y et Q lors de l'entrée de courbe du véhicule. Nous pouvons ainsi constater que :

- Pour l'effort Q : une augmentation de l'effort d'environ 5%.
- Pour l'effort Y : une augmentation de l'effort d'environ 20%

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	35/36

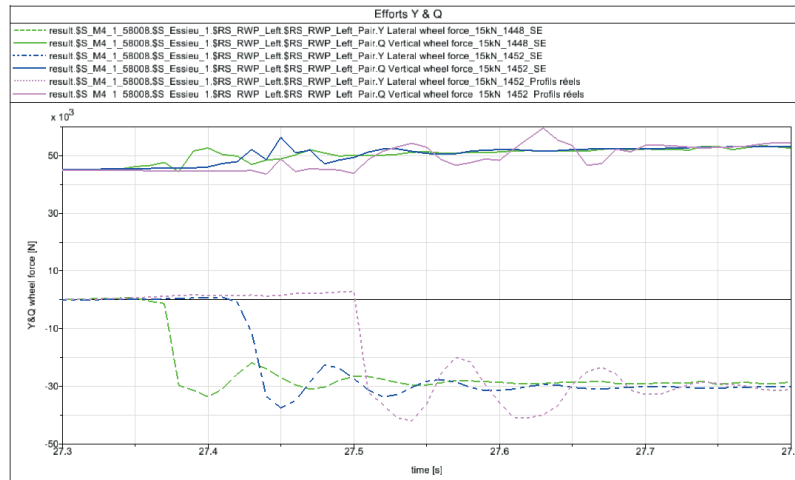


Figure 44 : Distribution des efforts Y&Q

Dans ces conditions, le rapport Y/Q va donc augmenter de 15%.

4.6.3 Conclusion

Le profil du rail a un impact sur le risque de déraillement qu'il soit ou non combiné à un effort de freinage.

En l'occurrence, le changement progressif du profil de l'aiguille dans une courbe serrée et de potentiels défauts locaux de voie impactent le ratio d'effort Y/Q.

Référence	Version	Expertise du déraillement en gare de Liège	Page
Affaire n° 20-1563 P/CIM CAB3/2022-0101	Version 4 du 30/01/2023	Lot 2 : Simulations du comportement dynamique du train	36/36

5 Conclusions

Dans ce lot 2, des simulations numériques ont été réalisées afin d'étudier le comportement dynamique du train dans la zone de déraillement.

Les études paramétriques réalisées ont permis de tirer les conclusions ci-dessous :

- **la prise en compte de l'alignement de 8.1m** (au lieu de 37,18m) engendre une augmentation du critère de déraillement en entrée de la zone 14AE, zone la plus critique sur le parcours,
- **L'application d'un effort de freinage de 150kN** à un effet notable sur le risque de déraillement sur cette zone 14AE ce qui n'était pas le cas avec une zone d'alignement de 37m,
- **Le coefficient de frottement** au niveau du contact roue-rail joue un rôle important. Un rail sec augmente sensiblement le risque de déraillement,
- **L'augmentation de l'écartement de la voie** contribue à augmenter notablement le risque de déraillement quand celui-ci est combiné à un effort de freinage,
- **Le profil du rail** a un impact sur le risque de déraillement qu'il soit ou non combiné à un effort de freinage. De plus, avec un changement progressif du profil de l'aiguille dans une courbe serrée et de potentiels défauts locaux de voie, la zone en question est une zone sensible vis-à-vis de risque de déraillement. Les données suivantes doivent être mesurées lors d'un déraillement :
 - o Profils de rail,
 - o Défauts de nivellement par file de rail,
 - o Défauts de dressage par file de rail,
 - o Ecartement de la voie,
 - o Dévers.
- **Les défauts de gauche** liés à la déformation du bogie ou de la voie et/ou le déséquilibre de charge à la roue augmentent fortement le risque de déraillement. Ces défauts cumulés avec l'usure de rail et les défauts ponctuels de voie (dressage, nivellement, écartement) peuvent faire dérailler le train dans la zone étudiée.

Ces travaux ont permis d'identifier que la zone de l'aiguillage 14AE correspondait bien à la zone présentant le plus de risque de déraillement. Il a été mis en évidence des facteurs d'influence dont :

- La typologie du tracé (courbe contre courbe),
- Le freinage,
- L'écartement de la voie,
- Les profils de rail,
- le coefficient de frottement roue/rail,
- Les défauts de gauche liés à la déformation du bogie ou de la voie.

Les conditions réellement rencontrées par le train lors du déraillement ne sont malheureusement pas toutes connues mais la présente étude montre qu'un cumul « dans le mauvais sens » de plusieurs de ces facteurs d'influence est de nature à atteindre ou dépasser les critères de déraillement.

7.3. COMMENTAIRES DES PARTIES CONCERNÉES

7.3.1. COMMENTAIRES DE LA SNCB

Remarques au sujet de l'analyse Mastéris.

- 1. Points 3.1 et 4.2: pour les critères de déraillement, on se réfère à la norme EN14363. Pour la bonne compréhension de la suite, il faut préciser que ces critères et leurs valeurs limites sont définis pour des situations bien particulières (configuration de voie, essai, simulation ou calcul, profils de rail et roue nominaux, (remarquons que la Figure 18 du rapport montre un profil de rail usé), filtrage des grandeurs et calcul d'une moyenne,...).

Dans ce sens, nous attirons plus particulièrement l'attention sur la valeur limite de 0,8 (rapport Y/Q) reprise dans le rapport de Mastéris, qui nous semble très restrictive (la norme permet 1,2) et qui est appliqué à l'instant (la norme l'applique sur une valeur de distance moyenne de 2 mètres) (voir aussi notre remarque sur Point 4). Voir p.ex. EN14363 les §§ d'évaluation dans §6, le Tableau 4 et sa note « a » (petit « a » en exposant), la Figure 10, le Tableau 5 et l'annexe B.

- 2. Point 4.2 : le critère du soulèvement dz n'est plus du tout évalué dans l'analyse avec tracé modifié, bien que son influence indépendante du critère Y/Q est bien démontrée dans p.ex. §3.5 et §3.7 de l'étude.

En outre, l'EN14363 considère le dz comme critère prioritaire dans le cas d'évaluation d'un essai sur une voie présentant des gauches (§6.1.5.1.6 de la norme EN14363).

- 3. Point 3.5 : le coefficient de frottement retenu pour cette analyse (0.4) n'est pas celui du cas de référence (0.5), ce qui complique la comparaison avec les autres analyses de sensibilité.

- 4. Point 4 : les valeurs maximales de Y/Q (de 0.67 et plus) citées dans les différentes analyses avec tracé modifié ne sont présentes que pendant de très courtes durées (ordre du dixième de seconde). Bien qu'ils suggèrent un comportement dynamique plus « agressif », il s'agit d'effets dynamiques de courtes durées qui n'ont rien à voir avec le critère de Y/Q défini par l'EN14363. Si nous comprenons bien, l'analyse repose sur l'hypothèse de base selon laquelle l'écartement de voie sur tout le trajet vaut 1448mm, valeur qui est reprise des mesures relevées post-accident au niveau de l'aiguillage 14AE.

Néanmoins, selon la fiche UIC527, l'écartement de voie en alignement devrait valoir 1435mm. Un écartement de voie augmenté dans la zone en alignement peut négativement impacter la mise en crabe du bogie lors de l'entrée dans une courbe.

- 5. Point 4.5 : L'analyse dans le point 4.5 confirme l'influence négative et l'importance d'une analyse de sensibilité suite à l'augmentation de l'écartement de voie en alignement de 1435mm à 1448mm. En d'autres termes : la situation réellement nominale n'est pas analysée.

- 6. Point 5 : est-ce que le choix d'une formulation différente (« notable », « augmentation », « important », « fortement »,...) pour qualifier l'ampleur de la contribution de chaque paramètre au risque de déraillement implique un ordre d'importance de chaque contribution à ce risque ? Si oui, quel est cet ordre ? Si non, svp expliciter.

7.3.2. COMMENTAIRES D'INFRABEL

- 1. La modification apportée à la section 3.5 du dossier fait suite à notre commentaire relatif à la section 2.4 du lot 2 V4 30.01.2023.
Nous notons que cette modification n'apporte pas la preuve que les résultats obtenus avec le modèle réduit sont similaires à ceux obtenus avec le modèle complet.
- 2. Concernant les paramètres d'influence liés au matériel roulant, nous notons donc que les simulations réalisées par Mastéris n'intègrent pas la variation des paramètres spécifiques : couple de rotation du bogie, raideur longitudinale et verticale des suspensions.

Organisme d'Enquête sur les Accidents et Incidents Ferroviaires
<http://www.oeaif.be>

