Onderzoeksorgaan voor Ongevallen en Incidenten op het Spoor

Veiligheidsonderzoeksverslag

Ontsporing van een lege reizigerstrein

Liège-Guillemins - 11 juli 2019

.be

Juni 2023

TABEL VAN DE VERSIES VAN HET VERSLAG

Nummer van de versie	Voorwerp van de herziening	Datum
1.0	Eerste versie	22/06/2023

Elk gebruik van dit rapport voor een ander doel dan ongevallenpreventie – bijvoorbeeld voor het bepalen van verantwoordelijkheden en a fortiori van individuele of collectieve schuld – zou volledig in strijd zijn met de doelstellingen van dit rapport en de methodes die gebruikt werden voor het opstellen ervan, de selectie van de verzamelde feiten, de aard van de gestelde vragen en de concepten waarvan het gebruik maakt en waaraan het begrip verantwoordelijkheid vreemd is. De conclusies die dan getrokken zouden kunnen worden, zouden bijgevolg een misbruik vormen in de letterlijke betekenis van het woord.
In geval van tegenstrijdigheid tussen bepaalde woorden en termen, is het noodzakelijk te verwijzen naar de Franstalige versie.

Inhoudstafel

1. SAMENVATTING 5

2. DE ONMIDDELLIJKE FEITEN 13
2.1. De gebeurtenis 13
2.1.1. Beknopte beschrijving van de gebeurtenis 13
2.1.2. Plaatsomschrijving 14
2.1.3. De beslissing om een onderzoek te openen 14
2.1.4. Samenstelling van de ploeg 14
2.1.5. Het voeren van het onderzoek 15
2.2. De omstandigheden van de gebeurtenis 16
2.2.1. Betrokken ondernemingen 16
2.2.2. Trein 17
2.2.3. Beschrijving van de infrastructuur en van het seinsysteem 18
2.2.4. Communicatiemiddel 19
2.3. Doden, gewonden en materiële schade 20
2.3.1. Reizigers, personeel en derden 20
2.3.2. Rollend materieel & infrastructuur 20
2.4. Externe omstandigheden 22
2.4.1. Weersomstandigheden 22
2.4.2. Geografische verwijzingen 22

3. SAMENVATTING VAN HET ONDERZOEK 24
3.1. Samenvatting van de getuigenverklaringen 24
3.2. Veiligheidsbeheersysteem 24
3.3. Regels en regelgeving 24
3.3.1. Regels en regelgeving publiek gemeenschappelijk en nationaal toepasselijk 24
3.3.2. Andere regels, zoals de operationele regels, de lokale instructies, de vereisten die gelden voor het personeel, de onderhoudsvoorschriften en de geldende normen 24
3.4. Werking van het rollend materieel en de technische installaties 25
3.4.1. EBP-beelden van de reisweg van de trein 25
3.4.2. Controle van het rollend materieel 29
3.4.3. Gedrag van de trein – analyse van de boordgegevens 29
3.4.4. Controle van de infrastructuur 32
3.5. Expertise 35
3.6. Maatregelen genomen voor de bescherming en de vrijwaring van de site van de gebeurtenis 36

4. ANALYSE EN BESLUITEN 39
4.1. Definitieve samenvatting van de opeenvolging van gebeurtenissen 39
4.2. Besluit 40

5. GENOMEN MAATREGELEN 43
5.1. Genomen maatregelen door de NMBS 43

6. AANBEVELINGEN 45

7. BIJLAGEN 47
7.1. Deliverable 1 van Mastéris: "Analyse van de bijdragende factoren en berekening van de gegenereerde krachten" (geen vertaling beschikbaar in het Nederlands) 47
7.2. Deliverable 2 van Mastéris: "Computersimulatie van het dynamische gedrag van het ontspoorde rijtuig in de ontsporingszone" (geen vertaling beschikbaar in het Nederlands) 66
7.3. Opmerkingen van de betrokken partijen 101

1. SAMENVATTING

Op donderdag 11 juli 2019 staat een reizigerstrein van de spoorwegonderneming NMBS ingevolge een technisch probleem (onderbrekingen in de hoogspanning op de elektrische locomotieven van de trein) stil in het station van Waremme en dienen de reizigers uit te stappen.
Nadat hij tevergeefs geprobeerd heeft zijn trein te repareren, verklaart de treinbestuurder zijn trein in nood.

Er wordt een locomotief van het type 18 als hulpelement gestuurd teneinde de defecte trein naar het station van Liège-Guillemins te slepen. Nadat de kop van de gestrande trein werd vastgekoppeld aan locomotief 18 en na een succesvolle remproef van type A, wordt de trein door locomotief 18 weggesleept van het station van Waremme.

Omstreeks 9.48 uur, wanneer de trein aankomt in het station van Liège-Guillemins, ontsporen de eerste wagons van de trein op de wissels aan de ingang van het rooster van het station. Door een breuk in de voedingsleiding van het remsysteem komt de trein tot stilstand.
Er zijn geen slachtoffers en er is geen relevante materiële schade.
Het Onderzoeksorgaan (OO) was niet van plan een onderzoek op te starten naar deze ontsporing, die niet voldoet aan de definitie van een ernstig of significant ongeval.

Tijdens een vergadering waarbij de eerste elementen werden voorgesteld die NMBS en Infrabel hadden verzameld, besefte het OO echter:

- dat de analyse van deze ontsporing aan lage snelheid aan de ingang van het station van Liège-Guillemins complexer bleek dan het leek,
- dat er geen consensus was tussen de twee partijen.

Na de kwalificatie van het ongeval waren de gedane metingen op de plaats van het ongeval beperkt en betroffen zij:

- de staat van het spoor,
- het rollend materieel,
- de opnamebanden van de trein.

Daarnaast werden, nadat de onderzoekers van het OO aangekomen waren op de plaats van het ongeval, bepaalde elementen van het rollend materieel (koppelingshaak, pneumatische slangen) aangepast zonder dat er opnames of foto's van werden gemaakt, wat in strijd is met artikel 8 van het koninklijk besluit van 16 januari 2007 tot vaststelling van sommige regels betreffende de onderzoeken naar ongevallen en incidenten bij de spoorwegen.

Het OO heeft verschillende gegevens geanalyseerd: ze bleken binnen de normen en toleranties te vallen en de analyse van de verschillende factoren afzonderlijk kon de ontsporing niet verklaren.

In het kader van een overheidsopdracht heeft het OO het externe adviesbureau Mastéris aangesteld om een analyse te maken van de factoren en de krachten waaraan de trein werd blootgesteld bij het binnenrijden van het station van Liège-Guillemins, en om een computersimulatie te maken van de treindynamica, om zo de combinatie van factoren die potentieel bijgedragen hebben aan de ontsporing in kaart te brengen.

In een eerste deliverable heeft Mastéris:

- een scenario samengesteld dat alle bijdragende factoren omvat;
- de opgewekte krachten berekend.

Alle benodigde gegevens voor het onderzoek van Mastéris, en specifieker voor de simulatie met de spoorwegdynamicasoftware, waren niet beschikbaar. Daarom heeft het bedrijf Mastéris, op vraag van het OO, tijdens de analyses en simulaties verschillende parameters laten variëren op basis van de beschikbare informatie-elementen.

Ongeacht de ernst van de gevolgen van een ongeval moeten de betrokken partijen, in het kader van een ontsporing van een reizigerstrein in hoofdspoor, bij een ontsporing alle relevante informatie verzamelen over de infrastructuur, het rollend materieel en de handelingen van de operatoren om te achterhalen welke factoren ertoe hebben bijgedragen dat het ongeval kon gebeuren. Indien alle gegevens op de plaats van het ongeval waren verzameld, zou de simulatie de werkelijke situatie dichter benaderen.

De resultaten van deze simulaties zijn opgenomen in de tweede deliverable van Mastéris.
De deliverables die Mastéris heeft geleverd, zijn als bijlage opgenomen in dit onderzoeksverslag en beschrijven in extenso de uitleg en berekeningen; hierna worden de belangrijkste benaderingen samengevat.

TRACÉ VAN HET DOOR DE TREIN GEBRUIKTE TRAJECT

De ontsporing vond plaats aan de ingang van het station van Liège-Guillemins: de reisweg die de trein op de dag van de ontsporing gebruikte, wordt niet vaak gebruikt; deze doorkruist het rooster om het station van Liège-Guillemins binnen te rijden en is kronkelig. Het kronkelige tracé leidt tot een geometrische afwijking tussen 2 gekoppelde rijtuigen, wat zorgt voor een kleiner contactoppervlak tussen de twee buffers. Dit kan leiden tot ontsporingsgevaar

Er werd gecontroleerd of het tracé voldoet aan de regels van de TSI "Infrastructuur" en van de Europese norm EN 13803: het traject heeft geen kronkelig tracé dat niet-conform is.
De ontsporing was a priori niet te wijten aan het theoretische tracé.

TYPE REMMING EN OPGEWEKTE KRACHTEN

De trein reed door de wisselzone aan de ingang van het station van Liège-Guillemins aan een snelheid van ongeveer 30 km/u: deze lage snelheid voldoet aan de voorschriften. Toen hij de wisselzone passeerde, gebruikte de bestuurder echter enkel de rheostatische rem (of dynamische rem) van de locomotief om de trein te vertragen. Het gaat om een elektrische rem waarin, schematisch, de stroomrichting in de motor van de locomotief wordt omgekeerd, waardoor een weerstandskoppel in de motoraandrijfas wordt opgewekt.

Bij deze manier van remmen, remt enkel het tractievoertuig. Dit kan een longitudinale drukkracht uitoefenen op het treinstel dat zich achteraan de locomotief bevindt.

Een interne regel bij NMBS beschrijft:

Aan het gebruik van de dynamische rem van de locomotieven in korte bochten en wisselstraten zijn enkele gevaren verbonden. In vermelde zones kunnen de drukkrachten het verbufferen alsook het ontsporen van voertuigen veroorzaken.
Daarom verbieden we het gebruik van de onafhankelijk bediende dynamische rem in deze zones als de toegelaten maximale snelheid gelijk aan of kleiner is dan 40 km/h.

De wisselzone aan de ingang van Liège-Guillemins is een zone met een steile helling waar zich bochten en tegenbochten bevinden.

Op Europees niveau bepaalt paragraaf 4.2.4.4.4 van Verordening 1302/2014 van 18 oktober 2014 betreffende een technische specificatie inzake interoperabiliteit van het subsysteem "rollend materieel — locomotieven en reizigerstreinen" van het spoorwegsysteem in de Europese Unie dat:

Als een eenheid voorzien is van een dynamisch remsysteem:
1) De bestuurder moet het gebruik van recuperatieremming op elektrische eenheden kunnen voorkomen, zodat er geen energieterugvoering plaatsvindt naar de bovenleiding tijdens het rijden op een lijn waarbij energieterugvoering niet mogelijk is.
2) […]
3) Wanneer de dynamische rem van locomotieven onafhankelijk van andere remsystemen wordt gebruikt, moet het mogelijk zijn om de maximumwaarde en het maximale variatiepercentage tot vooraf bepaalde waarden te beperken.
Opmerking: Deze beperking heeft betrekking op de krachten die op het spoor worden uitgeoefend wanneer een locomotief/locomotieven in een trein is/zijn geïntegreerd. Deze beperking kan op operationeel niveau worden toegepast door de voor een bepaalde lijn toelaatbare waarden voor een bepaalde lijn vast te stellen (bijv. lijn met steile hellingen en kleine boogstralen).

Op het niveau van de regelgeving van de infrastructuurbeheerder Infrabel, vermeldt het VVESI 4.2 de maximumkracht van de dynamische rem wanneer de maximumkracht van de dynamische rem alsook de maximumgradient van toename of afname van de dynamische remkracht van een locomotief niet automatisch worden beheerd.

	Maximumkracht van de dynamische rem	Maximumkracht van de dynamische rem die samen met een andere rem wordt gebruikt
Eén locomotief levert de tractie	150 kN	105 kN
Meerdere gekoppelde locomotieven leveren de tractie	75 kN	105 kN

Het boordregistratiesysteem van de locomotief voorziet geen registratie van de intensiteit van deze remming. Op basis van de snelheidsopnames en van het profiel van de door de trein bereden sporen werd de remmingsintensiteit berekend door Mastéris. De bepaling van deze waarde is niet enkel belangrijk om de longitudinale drukkracht op het treinstel te berekenen, maar ook om de computersimulatie te kunnen maken (voorwerp van het tweede deel van de analyse door Mastéris).

De waarde die bepaald werd door Mastéris (150 kN) komt overeen met de maximaal toegelaten waarde van Infrabel in zijn regelgeving voor wanneer de locomotief de trekkracht verzekert en wanneer enkel de dynamische rem wordt gebruikt.

Overwegende het geïdentificeerde remmingsscenario en de geometrie van de spoorzone waar de ontsporing plaatsvond, tracht Mastéris een analyse te maken van de longitudinale dynamiek en de opgewekte drukkrachten te berekenen.

Longitudinale drukkrachten

Gewoonlijk en historisch gezien betreft deze specialiteit goederentreinen, die meer risico's lopen door hun lengte en tonnage, alsmede door hun heterogeniteit en met name door de aanwezigheid van lege wagons, die deze risico's in de hand werken. De longitudinale drukkrachten worden in goederentreinen opgewekt bij verschillende rijconfiguraties (pneumatische remming, achteruitduwen, dynamische remming enz.) en kunnen in sommige gevallen groter zijn dan de toelaatbare LDK's van de wagons waaruit de trein is samengesteld.

Een ontsporingsrisico wordt geacht te bestaan wanneer de bereikte longitudinale drukkracht voor een bepaald voertuig groter is dan de toegelaten waarde voor het voertuig. Ontsporing treedt echter op wanneer zich ongunstige karakteristieken voordoen op het moment dat de maximale longitudinale drukkracht wordt bereikt (bocht en tegenbocht met kleine straal, belading van de wagon, toestand van het oppervlak van de bufferplaten enz.). De risico's op ontsporing als gevolg van de longitudinale drukkrachten zijn niet bestudeerd bij reizigerstreinen om meerdere redenen, waaronder de korte lengte van de konvooien die leidt tot geringe longitudinale drukkrachten en de massa van de rijtuigen die tot hoge toelaatbare longitudinale drukkrachten leidt. Het onderzoek van Mastéris is dan ook een van de eerste onderzoeken in het "Reizigersdomein" waarin dit onderwerp aan de orde komt.

Mastéris heeft de referentiewaarden voor goederenwagons geëxtrapoleerd naar het materiaal dat betrokken is bij de ontsporing: deze waarden komen uit onderzoeken en normen van de Internationale Spoorwegunie.

Deze analyse toont aan dat de berekende longitudinale drukkrachten (130 kN of 200 kN in hoge waarde) ver onder de empirische toegelaten waarde vallen (504 kN) die weerhouden wordt in het kader van de studie.

De computersimulatie, die erna gemaakt werd door Mastéris van het dynamische gedrag van het rijtuig dat ontspoorde in de ontsporingszone, heeft tot doel de optilling van de wielen ten aanzien van de rail te bestuderen die de ontsporing zou kunnen veroorzaken in de wisselzone waarover de trein rijdt.

Er worden twee criteria gehanteerd om het ontsporingsrisico te bestuderen:

- de optilling (dz), aan de buitenkant van de bocht, van het wiel van de voorste as van de eerste treinwagon;
- de Y/Q-contactkrachtenverhouding (waarbij Y voor de transversale kracht en Q voor de verticale kracht staat) van hetzelfde wiel.

Om over een grootteorde te beschikken voor deze twee criteria, werden er "grenswaarden" gehaald uit de Europese norm EN14363:2016+A1:2018:

- Voor de homologatieproeven over de overbrugbaarheid van de scheluwten zonder ontsporing is de grenswaarde voor de optilling van het wiel (dz) 5 mm. Er zij echter op gewezen dat dit overeenkomt met omstandigheden die goed door de norm worden gedefinieerd (boogstraal van 150 m, scheluwte van 7 mm/m).
- Voor de homologatieproeven van het dynamische gedrag van de trein moet de contactkrachtenverhouding (Y/Q) voor het voorste wiel onder 0,8 blijven.

Een eerste geval wordt gesimuleerd en dient als referentie en vergelijking voor de volgende simulaties waarin variaties worden gebruikt van de verschillende parameters: het doel is alle parameters die het ontsporingsrisico verhogen in kaart te brengen.

De tweede deliverable van Mastéris in de bijlage herneemt gedetailleerd de verschillende gemaakte simulaties: hierna worden de factoren die het ontsporingsrisico verhogen opgesomd.

ADHESIE EN WRIJVINGSCOËFFICIËNT VOOR HET SPOOR-WIELCONTACT

De spoor-wieladhesie vormt de basis voor tractie en remming. Het tractie- en remvermogen wordt door de wielen overgebracht op het spoor. Bijgevolg heeft de adhesiecoëfficiënt een invloed op de versnelling en de remming.

De adhesiecoëfficiënt varieert naargelang de temperatuur van de rail en andere elementen op de rail zoals regen, luchtvochtigheid, oliën, vetten ...
De verschillende parameters om de adhesiecoëfficiënt te bepalen werden niet meegedeeld, noch door de spoorwegonderneming, noch door de infrastructuurbeheerder.

In zijn studie deed Mastéris tijdens de simulaties de wrijvingscoëfficiënt variëren: dit zorgt ervoor dat de reële waarde, die niet gekend is, geschat kan worden. Uit de resultaten blijkt dat het ontsporingsrisico beïnvloed wordt door de wrijvingscoëfficiënt van het spoor-wielcontact: een droge rail zorgt voor een hoger ontsporingsrisico.

Bij een perfect spoor (geen gebreken, geen slijtage enz.) en een nominale trein (geen vervorming, evenwichtige massa's enz.) is de ontsporingszone kwestbaar, maar zijn de ontsporingscriteria nog steeds lager dan de grenswaarden, ongeacht de toestand van het oppervlak van het contact tussen wiel en rail.

SPOORTRACÉ

Hoewel het kronkelige tracé conform is aan de regels van de Internationale Spoorwegunie, kon door middel van de computersimulatie het gedrag van de trein in de ontsporingszone onderzocht worden. Deze zone wordt gekenmerkt door een opeenvolging van een bocht naar links en een bocht naar rechts met een recht stuk van 8,1 m.
Deze opeenvolging toont aan dat de locatie van de maximale contactkrachtverhouding (Y/Q) aan de ingang van een bocht ligt, wat overeenkomt met de ontsporingszone.

De simulatie die gemaakt werd met een nieuw railprofiel en een minimale remkracht (15 kN) toont aan dat de contactkrachtverhouding (Y/Q) onderhevig is aan de kenmerken van het tracé van de ontsporingszone, zonder dat de grenswaarde wordt overschreden (0,8).

TOEPASSING VAN EEN REMKRACHT

In het eerste deel van zijn studie berekende Mastéris de maximale remkrachtwaarde van de dynamische rem van de locomotief, deze waarde werd niet geregistreerd aan boord van het rollend materieel.
Het resultaat van deze berekening had een waarde van 150 kN.
Bij simulaties van de tweede fase van het onderzoek van Mastéris werden twee gevallen vergeleken, met nieuwe rail- en wielprofielen:

- toepassing van een remkracht van 15kN
- toepassing van een remkracht van 150kN

Met nieuwe rail- en wielprofielen, doet een remkracht van 150 kN de verhouding van de Y/Q-contactkrachten met 12 % toenemen (in vergelijking met een remkracht van 15 kN), waardoor ze stijgt van 0,67 tot 0,75.
Ze blijft kleiner dan 0,8, maar deze remkracht van 150 kN heeft dus een aanzienlijke invloed op de contactkrachtenverhouding.

RAILPROFIEL

De rails zijn verticaal gesleten (weinig voorkomend) en lateraal gesleten (veel vaker voorkomend). Deze slijtage is te wijten aan het verkeer, d.w.z. de tonnage, het aantal en de snelheid van de treinen.
De laterale slijtage doet zich vooral op de buitenste rail voor.

Uit de simulatieresultaten blijkt dat, onafhankelijk van de remkracht, een versleten railprofiel een aanzienlijke invloed heeft op het ontsporingsrisico.

SPOORBREEDTE MET REMKRACHT

De spoorbreedte is de afstand tussen de beide binnenkanten van twee spoorstaven van een spoorlijn.
De standaardbreedte is 1435 mm wat overeenkomt met de standaardbreedte van de Internationale Spoorwegunie.

De breedtemetingen waren niet beschikbaar voor de gehele sectie die betrokken was bij de ontsporing: de breedtewaarden werden bepaald door Mastéris op basis van aangeleverde en door middel van ontwerpsoftware gereconstrueerde profieltekeningen.

Aan het begin van de zone waar de ontsporing zich voordeed, varieerden de wijdtewaarden breedtewaarden tussen 1452 en 1461 mm (de nominale waarde is voor deze zone 1448 mm)
Er werden drie waarden weerhouden voor de simulatie: 1452, 1455 en 1458 mm.

Met een remkracht van 150 kN brengt de toename in spoorbreedte (van 1448 naar 1458 mm) een stijging van de contactkrachtenverhouding (Y/Q) van 18 % met zich mee: van 0,75 naar 0,89. De grenswaarde voor deze verhouding (0,8) wordt dus overschreden.
Die stijging is met name te wijten aan de vermindering van de verticale kracht van ongeveer 16 % (bijkomende ontlasting van het voorste wiel).
De invloed van de spoorbreedte op de contactkrachtenverhouding (Y/Q) is verwaarloosbaar wanneer er geen remkracht wordt uitgeoefend.

De toename in spoorbreedte heeft een significante invloed op het ontsporingsrisico wanneer die wordt gecombineerd met een remkracht van 150 kN.

SCHELUWTEGEBREK AAN DRAAISTEL EN/OF SPOOR

Het is bekend dat een scheluwte als gevolg van een gebrek aan het spoor en/of een vervorming van het draaistel het risico op ontsporing vergroot:

- De hoogste waarde van de scheluwte die door de infrastructuurbeheerder geregistreerd werd, bedraagt 2,15 mm/m op 13,54 m van de punt van het spoortoestel;
- Omdat er geen reële gegevens beschikbaar zijn om de waarde van de scheluwte van het draaistel te bepalen, wordt er in de simulatie van Mastéris een wig van 20 mm toegevoegd aan de primaire ophanging van het eerste linkerbuitenwiel om de gebreken van de scheluwte te modelleren in het kader van een parametrische studie.
- Dit komt overeen met een totale scheluwte (spoor + draaistel) van 7,8 mm/m.

De simulatie, die een remwaarde gebruikt van 150 kN (ofwel de maximale berekende waarde), zorgt ervoor dat het gedrag kan vergeleken worden bij een scheluwte met een versleten railprofiel en een scheluwte met een nieuw railprofiel.

De verkregen resultaten laten duidelijk zien dat een gebrek van scheluwte, in combinatie met een remkracht van 150 kN, het ontsporingsrisico verhoogt:

- **met een nieuwe spoorstaaf en zonder andere gebreken aan het spoor (richting, nivellering) liggen de waarden van de 2 criteria (optilling van het wiel en de contactkrachtenverhouding) nog steeds onder de grenswaarden;**
- **wanneer hetzelfde scheluwtegebrek gecombineerd wordt met een versleten rail, zou een ontsporing kunnen plaatsvinden (de optilling van het wiel overschrijdt de grenswaarde (5 mm)).**

BESLUIT

Een eerste simulatie met de nominale parameters (nieuwe rail, perfect spoor zonder gebreken, nominale kenmerken van de trein) heeft aangetoond dat de ontsporingszone een gevoelige zone is voor twee ontsporingscriteria:

- de optilling van het wiel (dz)
- de verhouding van de wiel-railcontactkrachten (Y/Q).

Er werden conclusies getrokken uit de uitgevoerde parametrische studies, waaronder:

- De ingang van zone 14AE, die geïdentificeerd werd als de zone waar de ontsporing plaatsvond, is veruit de meest kritieke zone van het traject, en dat is ook zo bij een spoor zonder gebreken, een nominale trein en een zwakke rheostatische remkracht door de locomotief aan de kop.
- Een droge rail verhoogt het risico op ontsporing.
- Het railprofiel heeft ook een invloed op het ontsporingsrisico, ongeacht of dit gecombineerd wordt met een remkracht of niet.
- De toename in spoorbreedte heeft een significante invloed op het ontsporingsrisico wanneer deze wordt gecombineerd met een hogere rheostatische remkracht door de locomotief aan de kop.
- De scheluwtegebreken die verband houden met de vervorming van het draaistel en/of het spoor kunnen samen met de slijtage van de rail en een verhoogde rheostatische remkracht door de locomotief aan de kop van de trein laten ontsporen in de onderzochte zone.

De studie van Mastéris toont aan dat de zone waar de trein ontspoord is, bijzonder gevoelig is in vergelijking met de voorgaande wisselzone en dat het geheel van de invloedsfactoren (dynamische remkracht, spoorbreedte groter dan de nominale waarde, scheluwtegebrek, versleten railprofiel, wrijvingscoëfficiënt) van die aard is dat de ontsporingscriteria bereikt of overschreden worden.

2. DE ONMIDDELLIJKE FEITEN

2.1. DE GEBEURTENIS

2.1.1. BEKNOPTE BESCHRIJVING VAN DE GEBEURTENIS

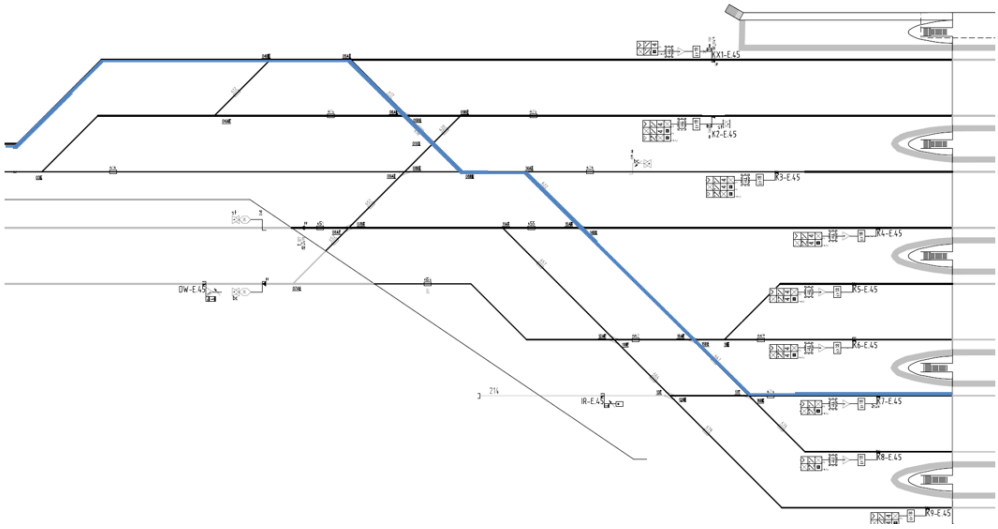
Op donderdag 11 juli 2019 staat de reizigerstrein E7400 van de spoorwegonderneming NMBS ingevolge een technisch probleem stil in het station van Waremme en dienen de reizigers uit te stappen. Nadat hij tevergeefs geprobeerd heeft zijn trein te repareren, verklaart de treinbestuurder zijn trein in nood.

Er wordt een locomotief van het type 18 als hulpelement gestuurd teneinde de defecte trein naar het station van Liège-Guillemins te slepen.

Omstreeks 9.48 uur, wanneer de trein aankomt in het station van Liège-Guillemins, ontsporen de eerste 3 wagons van de trein op de wissels aan de ingang van het rooster van het station.
Ingevolge de breuk van de voedingsleiding van het remsysteem komt de trein tot stilstand.

Een bestuurder van een trein die stilstaat aan de perrons van het station ziet de ontsporing en lanceert een GSM-R-alarm.

2.1.2. PLAATSOMSCHRIJVING



Perrons van het station Liège-Guillemins

Afbeelding: Seininrichtingsplan met aanduiding van de voor de trein voorziene reisweg.

2.1.3. DE BESLISSING OM EEN ONDERZOEK TE OPENEN

De onderzoeker van het OO die van wacht is, werd onmiddellijk verwittigd door Traffic Control en begeeft zich naar de plaats van het ongeval.
Overeenkomstig artikel 111 (tweede lid) van de wet van 30 augustus 2013[1] heeft het Onderzoeksorgaan (OO) beslist om een onderzoek te openen naar dit ongeval – dat noch aan de definitie van een ernstig ongeval noch aan de definitie van een significant ongeval voldoet - en het heeft de betrokken partijen hiervan op de hoogte gebracht.

2.1.4. SAMENSTELLING VAN DE PLOEG

Moederorganisatie	Rol
Onderzoeksorgaan	Hoofdonderzoeker
Onderzoeksorgaan	Onderzoekers
Mastéris	Technische expertise
DVIS	Technische en reglementaire expertise, documentatiesteun
Infrabel	Logistieke, technische en documentatiesteun
NMBS	Logistieke, technische en documentatiesteun

1 *Art. 111. § 1. Het onderzoeksorgaan:*
1° stelt een onderzoek in na elk ernstig ongeval dat zich op het spoorwegsysteem heeft voorgedaan;
2° naast het onderzoeken van ernstige ongevallen kan het onderzoeksorgaan ook onderzoeken voeren naar ongevallen en incidenten die, onder licht verschillende omstandigheden, hadden kunnen leiden tot ernstige ongevallen, met inbegrip van technische gebreken in de subsystemen van structurele aard of in de interoperabiliteitsonderdelen van het hogesnelheids- of conventionele spoorwegsysteem. In voorkomend geval houdt zij rekening met de criteria bepaald door de Koning;

2.1.5. HET VOEREN VAN HET ONDERZOEK

Het onderzoek is gebaseerd op:

- de vaststellingen en gedane metingen op het rollend materieel en de infrastructuur op de plaats van het ongeval;
- de analyse van technische en regelgevende documenten;
- gesprekken met het betrokken personeel alsook met managers van de betrokken ondernemingen;
- de expertise uitgevoerd door het bedrijf Mastéris, bestaande uit 2 fasen:
    - 1. Analyse van de factoren die hebben bijgedragen en berekening van gegenereerde krachten;
    - 2. Computersimulatie van het dynamische gedrag van het ontspoorde voertuig in de ontsporingszone.

Dit verslag bevat de elementen die door het OO zijn geanalyseerd, evenals de elementen uit de door het bedrijf Mastéris uitgevoerde expertise. De expertiseverslagen van het bedrijf Mastéris (één deliverable per fase) gaan als bijlage bij dit verslag (zie hoofdstuk 7).

2.2. DE OMSTANDIGHEDEN VAN DE GEBEURTENIS

2.2.1. BETROKKEN ONDERNEMINGEN

2.2.1.1. SPOORWEGONDERNEMING NMBS

De spoorwegonderneming NMBS is belast met de organisatie en de exploitatie van de activiteiten aangaande reizigersvervoer.
De opdrachten van openbare dienst van de NMBS omvatten vooral het binnenlands vervoer van reizigers met treinen van de gewone dienst alsook de binnenlandse bedieningen door hogesnelheidstreinen.

De NMBS telt 6 directies: Transport Operations, Passenger Transport & Security, Stations, Technics, Marketing & Sales, Finance.

De 2 meest rechtstreeks betrokken directies zijn:
Transport Operations
De directie Transport Operations is verantwoordelijk voor de planning van de beurtregelingen, de treinbesturing, de bundeloperaties, de uitvoering van het vervoersplan.

Technics
De directie Technics is belast met de aankoop, de modernisering en het onderhoud van het rollend materieel. De opdracht van de directie bestaat erin de klanten veilig en betrouwbaar materieel ter beschikking te stellen dat aangepast is aan de operationele en commerciële behoeften om binnen haar expertisegebied de reizigers een kwaliteitsvolle dienstverlening te kunnen aanbieden.

2.2.1.2. INFRASTRUCTUURBEHEERDER INFRABEL

Op grond van het koninklijk besluit van 14 juni 2004 is Infrabel de infrastructuurbeheerder.
De infrastructuurbeheerder moet waken over de correcte toepassing van de technische normen en van de regels die te maken hebben met de veiligheid van de spoorweginfrastructuur en het gebruik ervan.

De activiteiten van Infrabel zijn georganiseerd in 3 directies, elk met haar eigen specialiteiten en verantwoordelijkheden, en 4 algemene diensten.

Directies:
- Traffic management & services
- Asset management
- Build

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

2.2.2. TREIN

2.2.2.1. ALGEMEEN

Trein E7400 bestaat uit een elektrische locomotief type 27 aan de kop van de trein, 11 rijtuigen type M4 en een locomotief type 27 aan de staart van het konvooi (totale lengte: 304.16m).

Ingevolge het defect (herhaald uitvallen van de hoogspanning op de elektrische locomotieven 2731 en 2721) en aangezien de trein in nood verkeerde, wordt er een locomotief type 18 naar het station van Waremme gestuurd om de trein te slepen.

Afbeelding: locomotief type 18, gevolgd door de locomotief type 27 (foto genomen na het ongeval en de koppelingsbreuk).

Afbeelding: rijtuigen type M4 die na het ongeval stilstaan aan de ingang van het station Liège-Guillemins.

2.2.2.2. TECHNISCHE INFORMATIE

De NMBS heeft de volgende informatie over de trein:

Locomotief type 18

- Lengte: 19,58 m
- Massa: 88,00 T

Locomotief type 27

- Lengte: 18,65 m
- Massa: 85,00 T

Rijtuig M4

- Lengte: 24,26 m
- Massa: 38,40 T

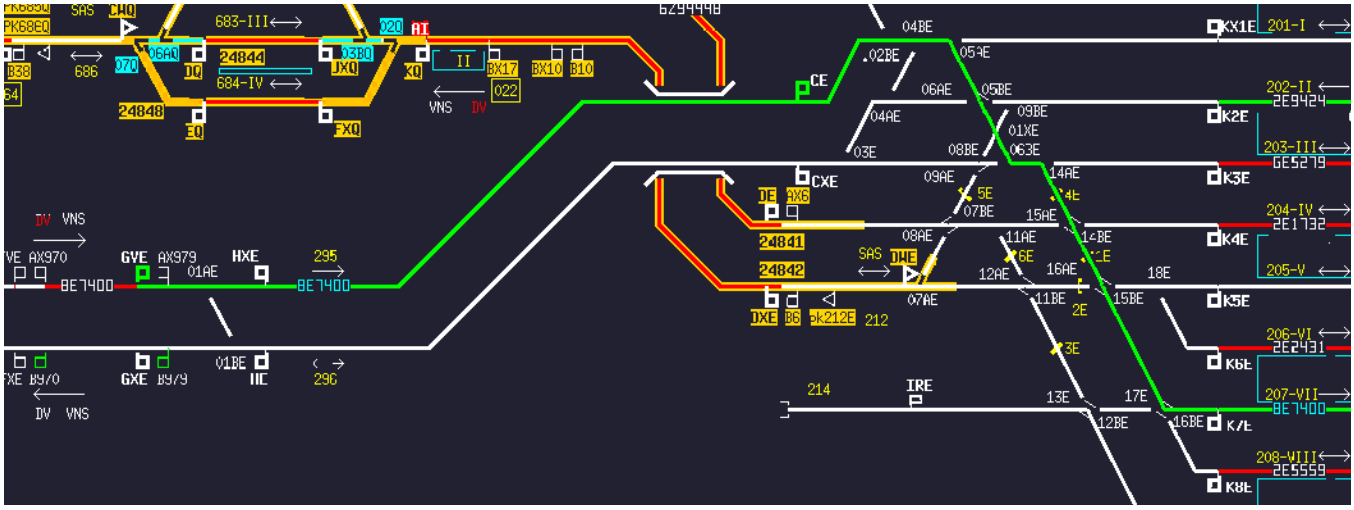
2.2.3. BESCHRIJVING VAN DE INFRASTRUCTUUR EN VAN HET SEINSYSTEEM

2.2.3.1. STATION LIÈGE-GUILLEMINS

Aan de inrit van het station van Liège-Guillemins, komende van Ans, is lijn 36 sterk hellend (gemiddelde helling ≥ 18 mm/m).

Afbeelding van de helling van het spoor (het station van Liège-Guillemins bevindt zich op de achtergrond van de foto die vanaf de achterkant van de trein werd genomen).

2.2.3.2. EBP – ALL-RELAIS - INKLINKING



EBP-beeld van de zone (de perrons van het station van Liège-Guillemins bevinden zich rechts op de afbeelding). De groene lijn symboliseert de voor trein E7400 voorziene reisweg (aankomst voorzien op spoor VII).

Het seinhuis van Liège-Guillemins beheert de zone waar het ongeval plaatsvond. Het seinsysteem werkt in EBP/PLP.

2.2.4. COMMUNICATIEMIDDEL

GSM for Railways (GSM-R) is een internationale norm voor het pan-Europese digitale radiocommunicatienetwerk bestemd voor de spoorwegsector. Het ondersteunt spraak- en datadiensten en werkt binnen identieke bandfrequenties in Europa die door de Europese Commissie zijn toegewezen.
Dit maakt het mogelijk een rechtstreekse communicatie tot stand te brengen tussen de bestuurderspost van de treinen en Traffic Control. Men kan ook oproepen per groep uitvoeren en de prioriteit van de oproepen beheren. Deze gesprekken worden opgenomen.
Wanneer hij de ontsporing ziet gebeuren, heeft een bestuurder van een trein die stilstond aan de perrons van het station Liège-Guillemins onmiddellijk een GSM-R-alarm gelanceerd.

2.3. DODEN, GEWONDEN EN MATERIËLE SCHADE

2.3.1. REIZIGERS, PERSONEEL EN DERDEN

Er valt geen enkel slachtoffer te betreuren.

2.3.2. ROLLEND MATERIEEL & INFRASTRUCTUUR

Er wordt grote schade aangericht aan:

- de infrastructuur (spoor, dwarsliggers, wissel);
- het rollend materieel (aan locomotief 27 vooraan de trein en aan de 3 eerste rijtuigen M4).

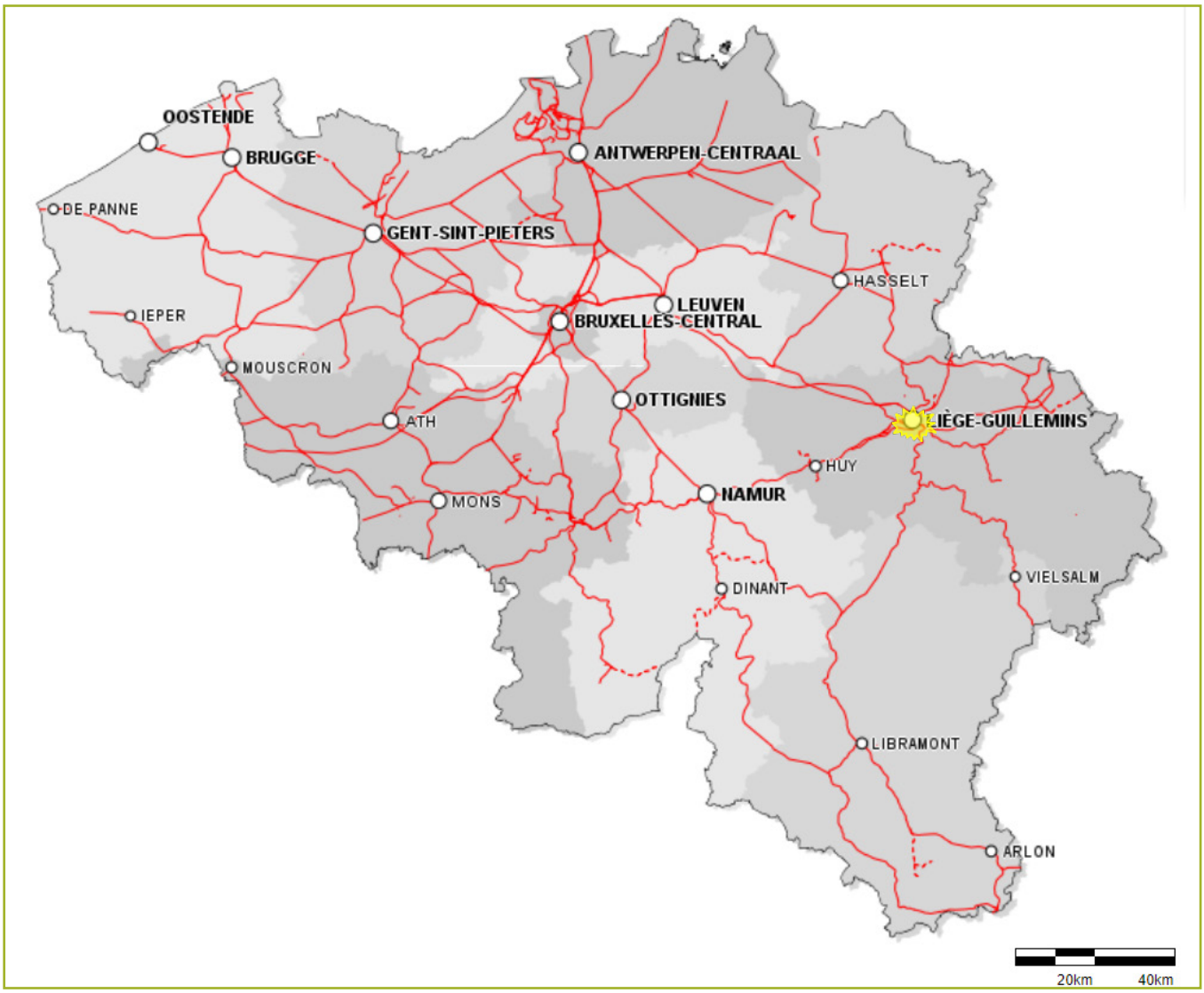
2

2.4. EXTERNE OMSTANDIGHEDEN

2.4.1. WEERSOMSTANDIGHEDEN

De lucht is betrokken en de temperatuur bedraagt ongeveer 24°C.

2.4.2. GEOGRAFISCHE VERWIJZINGEN



3. SAMENVATTING VAN HET ONDERZOEK

3.1. SAMENVATTING VAN DE GETUIGENVERKLARINGEN

In de loop van het onderzoek heeft het OO op verschillende momenten de gelegenheid gehad om verschillende interveniënten te ontmoeten: bestuurders, rangeerder, managers van werkplaatsen, verantwoordelijken voor het onderhoud van de infrastructuur. Het is niet de bedoeling om deze gesprekken woord voor woord in dit rapport op te nemen, maar wel om ze inhoudelijk te gebruiken voor de analyse van het ongeval dat zich voordeed.

3.2. VEILIGHEIDSBEHEERSYSTEEM

Het algemene doel van het veiligheidsbeheersysteem (VBS) is om de organisatie haar economische en commerciële doelstellingen op een veilige manier te laten bereiken, daarbij aantonend dat ze ten minste alle geldende verplichtingen op het vlak van veiligheid naleeft (wettelijke verplichtingen, verplichtingen verbonden aan een kwaliteitssysteem of een systeem voor voortdurende verbetering, ...).
Een gestructureerd beheer biedt de onderneming een toegevoegde waarde en helpt onder meer bij de verbetering van de algemene prestaties, bij de invoering van maatregelen voor de operationele doeltreffendheid, en bij de totstandbrenging van een positieve veiligheidscultuur.
Een gestructureerde aanpak laat ook toe om potentiële gevaren te identificeren en een continu risicobeheer te ontwikkelen dat gelinkt is aan de activiteiten van de onderneming, met het oog op het voorkomen van ongevallen.
Door alle samenstellende onderdelen van een VBS correct toe te passen, kan de onderneming de nodige zekerheid krijgen dat ze alle risico's die als inherent aan haar activiteiten zijn aangemerkt, beheerst en zal blijven beheersen, ongeacht de exploitatievoorwaarden.
Het VBS werd niet bestudeerd tijdens dit onderzoek.

3.3. REGELS EN REGELGEVING

3.3.1. REGELS EN REGELGEVING PUBLIEK GEMEENSCHAPPELIJK EN NATIONAAL TOEPASSELIJK

3.3.1.1. EUROPESE WETGEVING

- Verordening 1302/2014 van 18/11/2014 betreffende een technische specificatie inzake interoperabiliteit van het subsysteem "rollend materieel" – "Locomotieven en reizigerstreinen"

3.3.1.2. BELGISCHE WETGEVING

- Wet van 30/08/2013 houdende de Spoorcodex

3.3.2. ANDERE REGELS, ZOALS DE OPERATIONELE REGELS, DE LOKALE INSTRUCTIES, DE VEREISTEN DIE GELDEN VOOR HET PERSONEEL, DE ONDERHOUDSVOORSCHRIFTEN EN DE GELDENDE NORMEN

3.3.2.1. NMBS

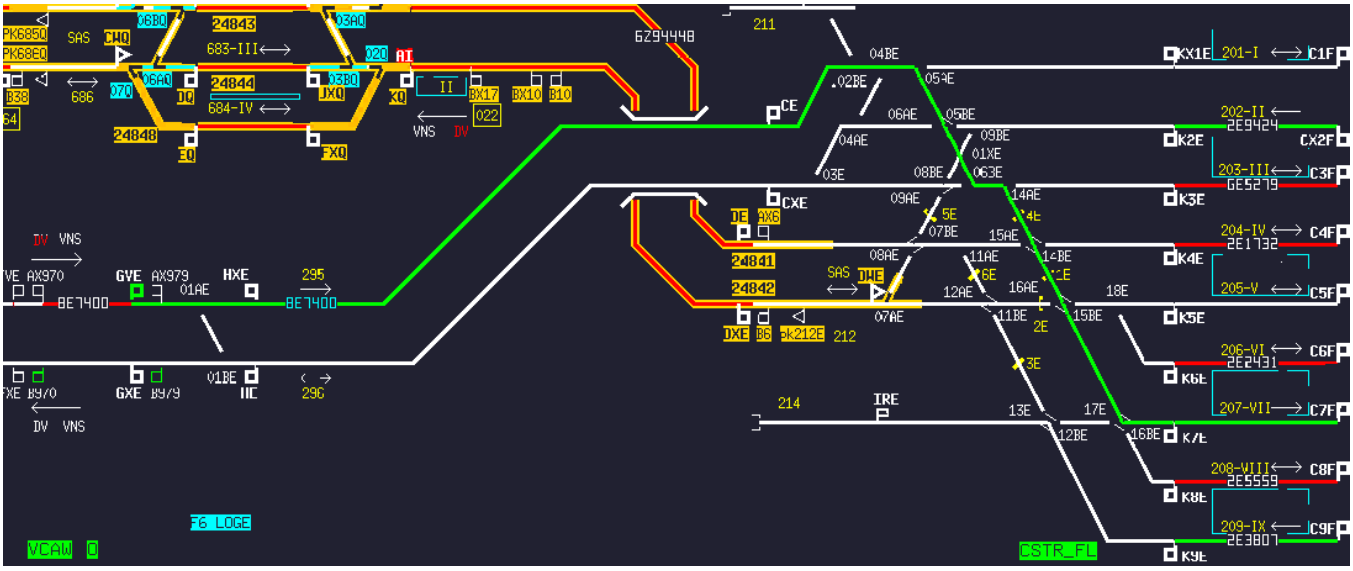
- Boekje HLT Bundel VI - Titel A: gebruik van de remuitrustingen
  Hoofdstuk 2 : kenmerken en bediening van de remuitrusting van de krachtvoertuigen en stuurrijtuigen

3.3.2.2. INFRABEL

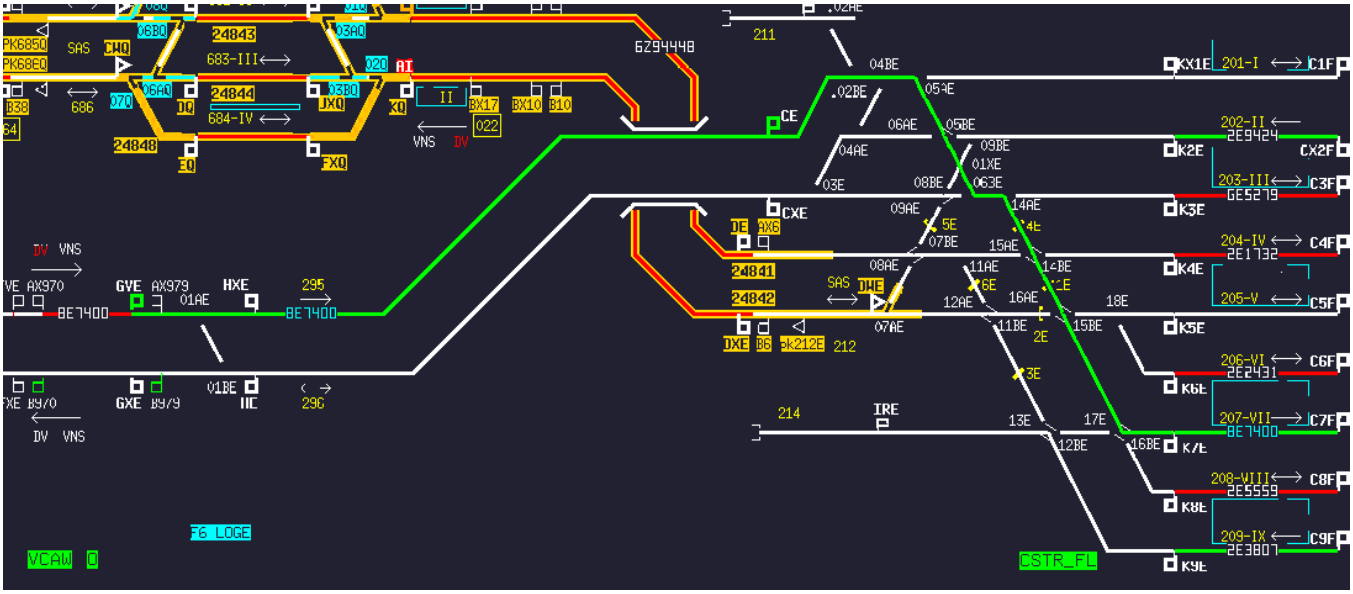
- ARE 512, 513, 521, 613
- VVESI 4.2

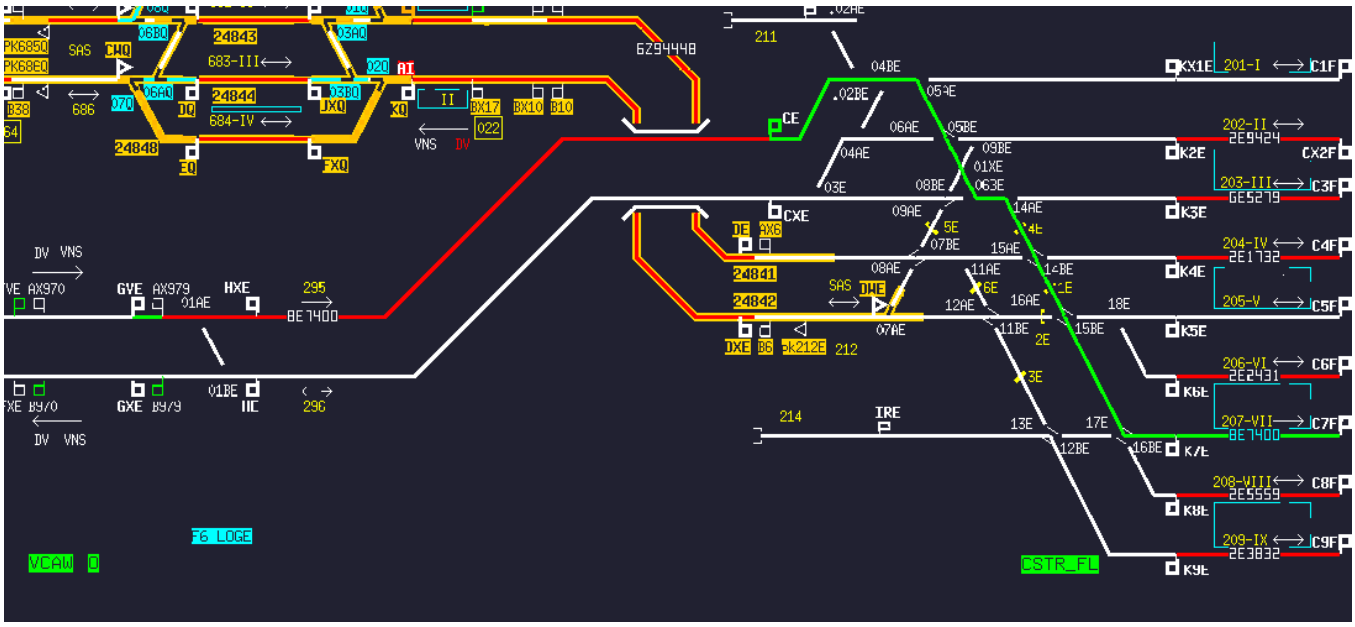
3.4. WERKING VAN HET ROLLEND MATERIEEL EN DE TECHNISCHE INSTALLATIES

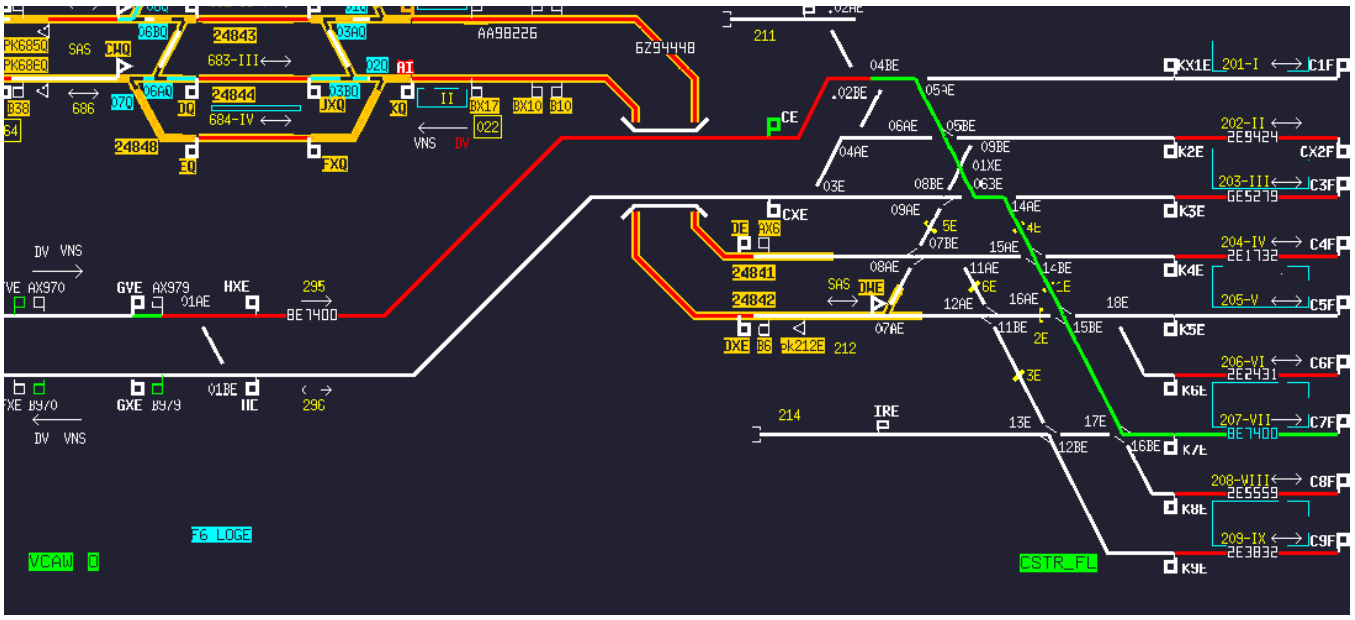
3.4.1. EBP-BEELDEN VAN DE REISWEG VAN DE TREIN

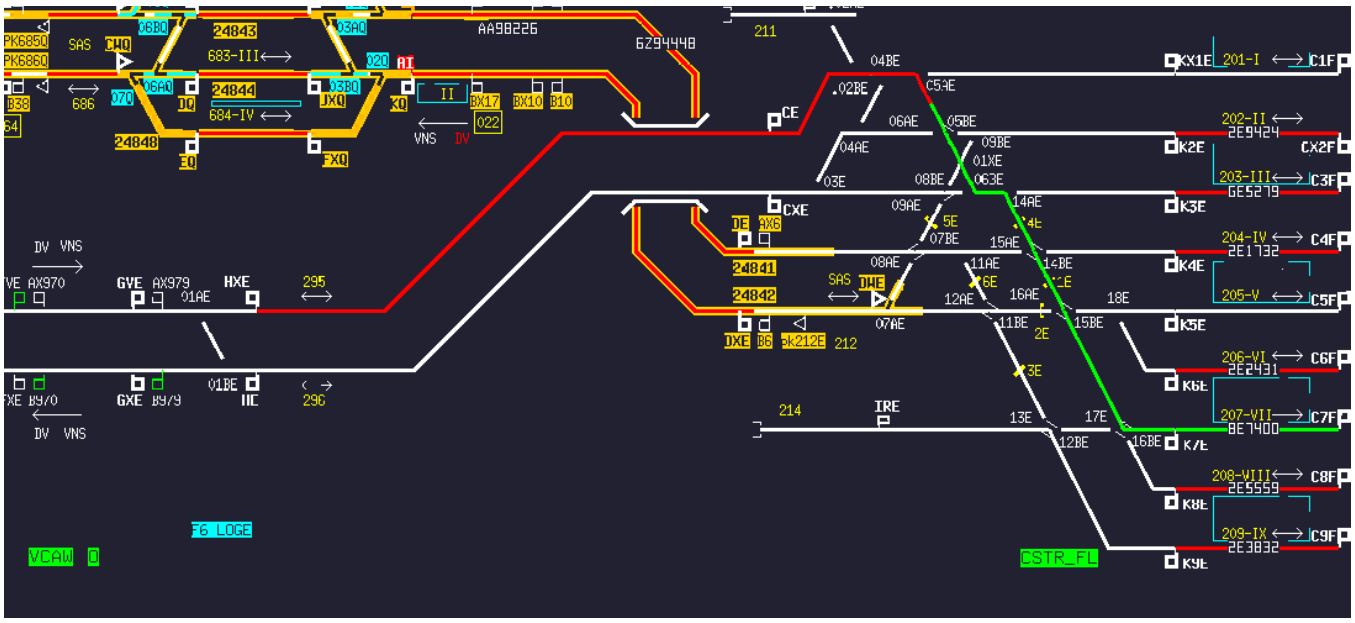


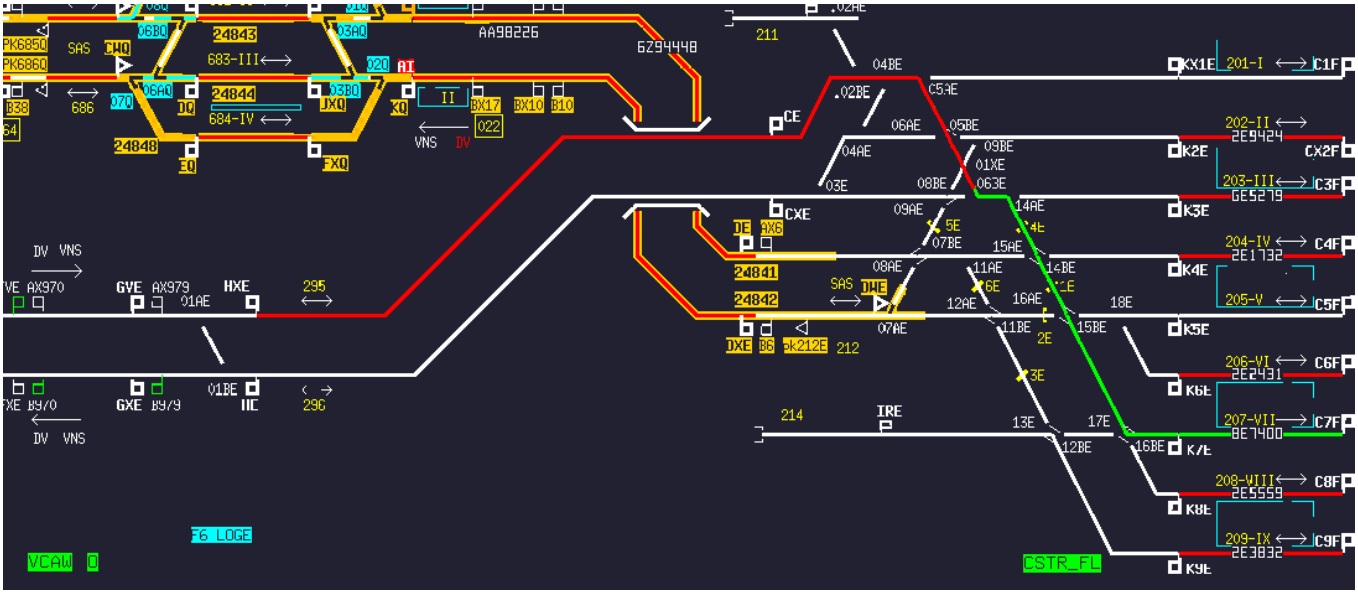
9:44.52 – De reisweg is aangelegd voor trein E7400 die door locomotief 18 van het station van Waremme naar spoor VII van het station van Liège-Guillemins wordt gesleept.
De trein rijdt de helling naar beneden (hellingsgraad van het spoor ≥ 18‰) via een reisweg die het station van Liège-Guillemins kruist van spoor I naar spoor VII.
De trein legt de reisweg af, waarbij deze achtereenvolgens de verschillende secties bezet (rode lijn in de volgende EBP-beelden).

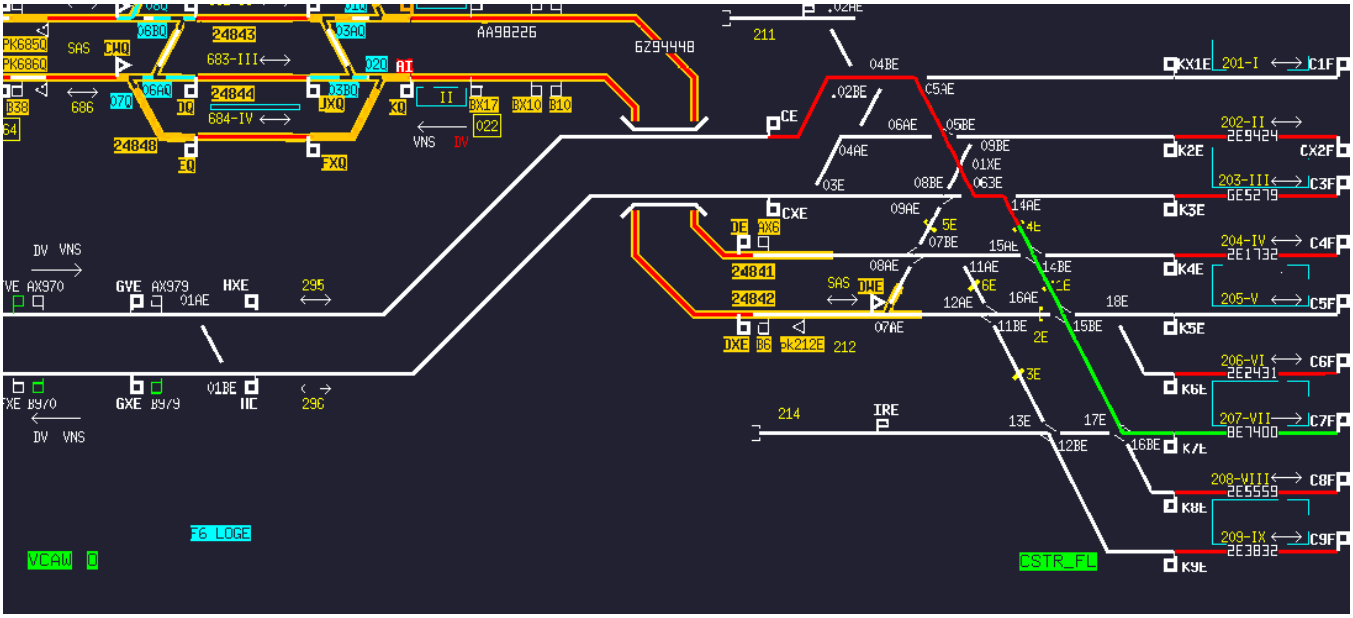


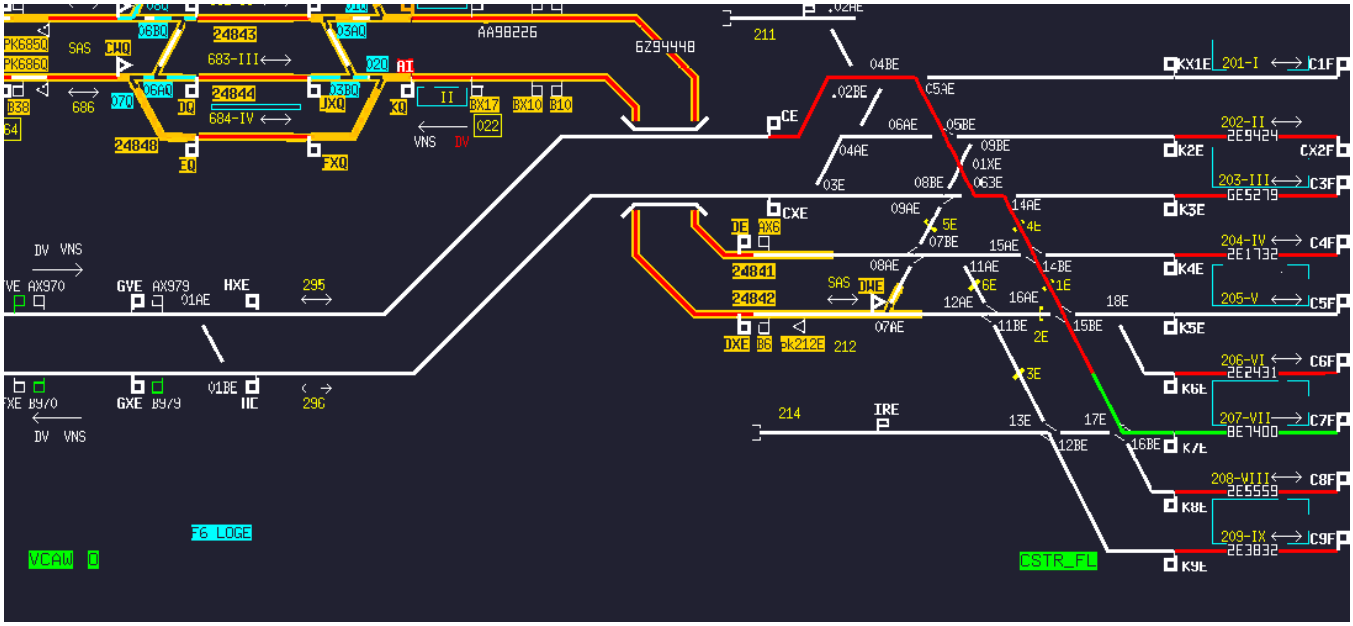

24843
683-III
24844
684-IV
24848
6Z94448
211
04BE
KX1E
201-I
C1F
CE
CXE
24841
24842
DXE
212
214
IRE
F6 LOGE
VCAW
CSTR_FL


24843
683-III
24844
684-IV
24848
AA98226
6Z94448
211
04BE
KX1E
201-I
C1F
CE
CXE
24841
24842
DXE
212
214
IRE
F6 LOGE
VCAW
CSTR_FL

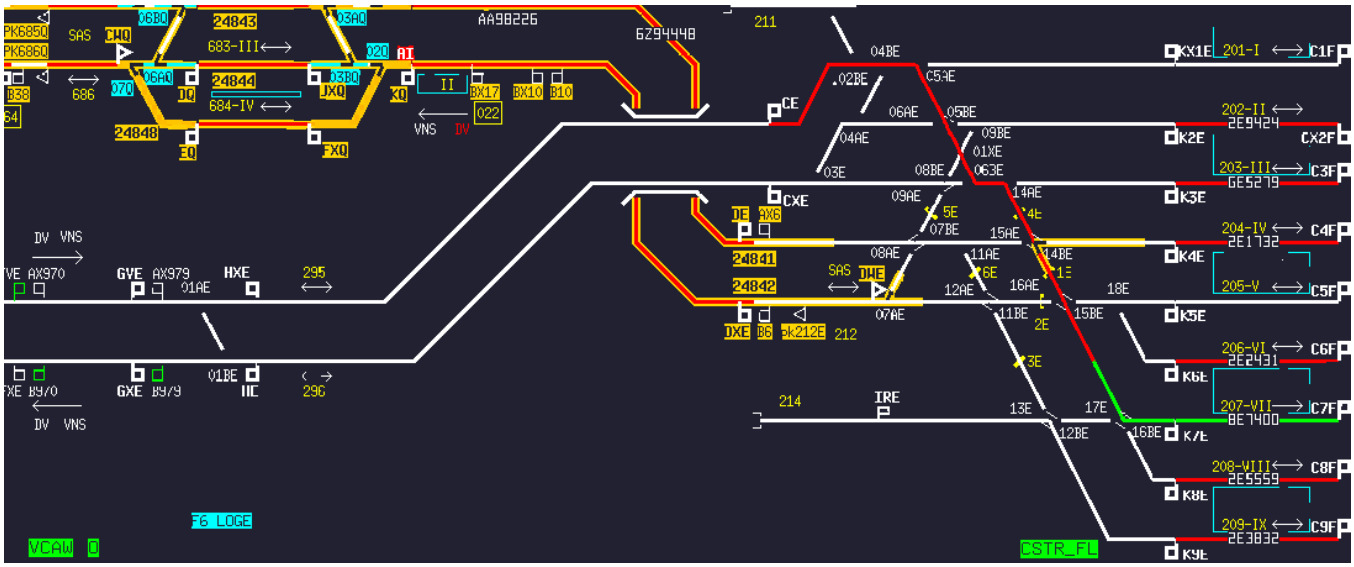

24843
683-III
24844
684-IV
24848
AA98226
6Z94448
211
04BE
KX1E
201-I
C1F
CE
CXE
24841
24842
DXE
212
214
IRE
F6 LOGE
VCAW
CSTR_FL

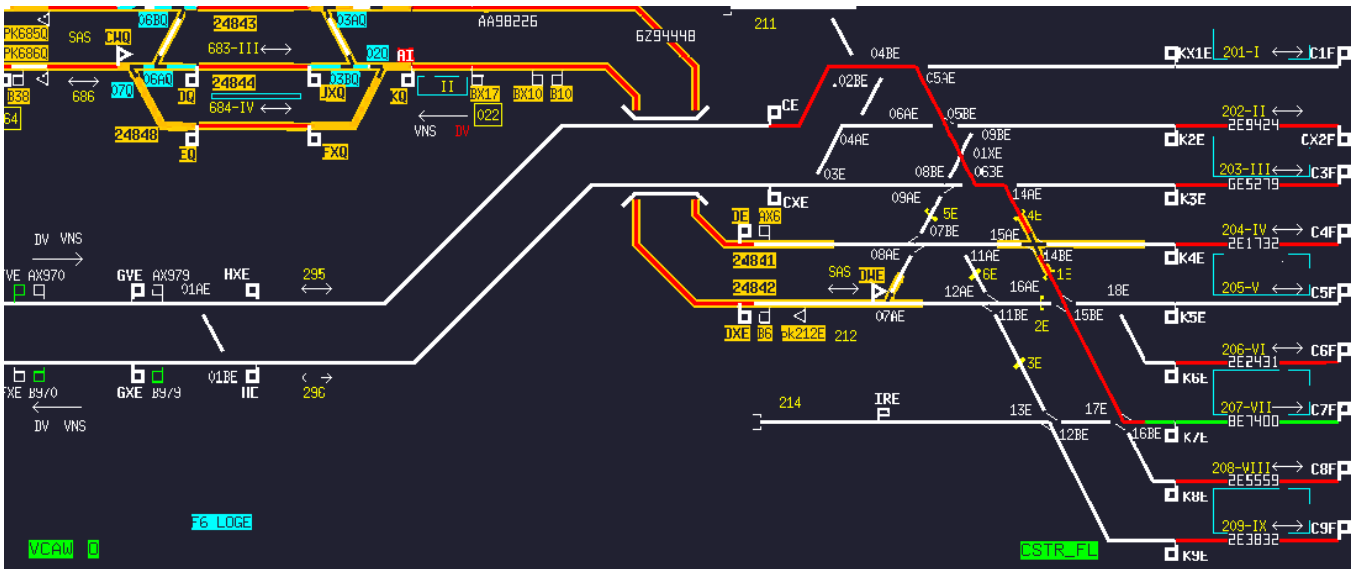

24843
683-III
24844
684-IV
24848
AA98226
6Z94448
24841
24842
F6 LOGE
VCAW
CSTR_FL


24843
683-III
24844
684-IV
24848
AA98226
6Z94448
24841
24842
F6 LOGE
VCAW
CSTR_FL

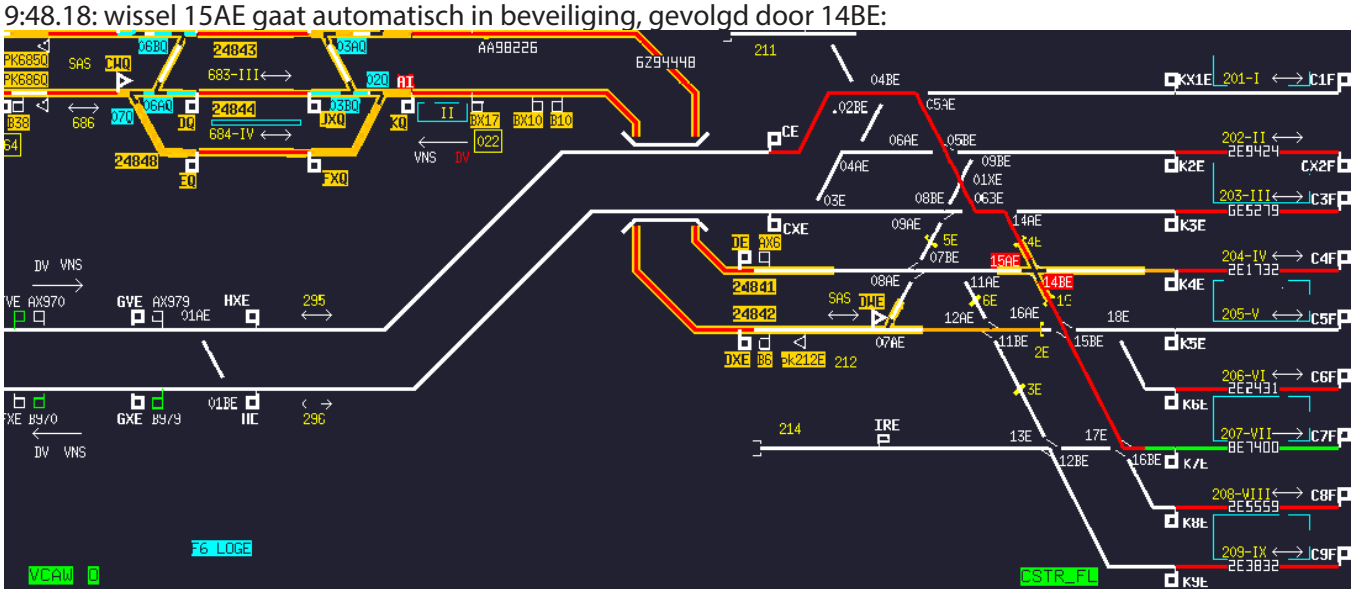

24843
683-III
24844
684-IV
24848
AA98226
6Z94448
24841
24842
F6 LOGE
VCAW
CSTR_FL

(9:48.05)
Bij de ontsporing en de koppelingsbreuk tussen locomotief 27 (die zich vlak achter locomotief 18 bevindt) en de rijtuigen verschijnt op het EBP-scherm een bezetting op spoor 4 (gedeelte tussen wissel 14BE en sein K4E) en een verlies van controle over wissel 14BE.





9:48.18: wissel 15AE gaat automatisch in beveiliging, gevolgd door 14BE:



3.4.2. CONTROLE VAN HET ROLLEND MATERIEEL

Na het ongeval werden er controles uitgevoerd op het rollend materieel (geometrische en dimensionale controles van de assen en de wielen) van de locomotieven en van de twee ontspoorde M4-rijtuigen.
Ook de historiek van deze metingen werd gecontroleerd.

In de metingen van de wielafstanden en -profielen werd geen enkele afwijking of waarde buiten de tolerantie vastgesteld.

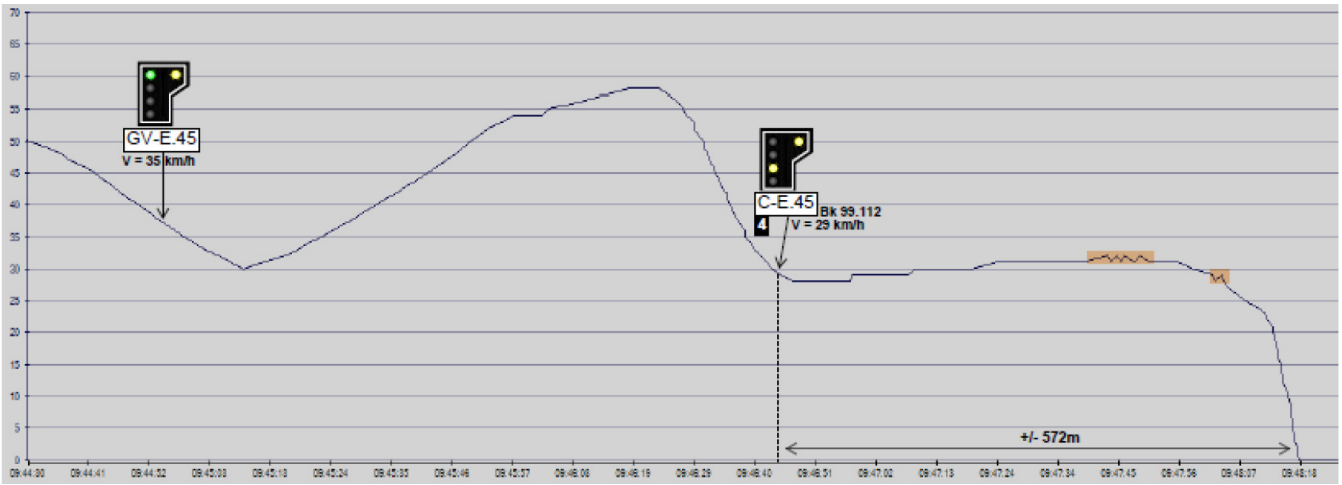
Afbeelding: Wielprofiel gemeten na het ongeval (16/07/2019), vergeleken met de metingen van 14/12/2018.

3.4.3. GEDRAG VAN DE TREIN – ANALYSE VAN DE BOORDGEGEVENS

Ingevolge het uitvallen van de hoogspanning op de elektrische locomotieven van reizigerstrein E7400 van spoorwegonderneming NMBS staat de trein stil in het station van Waremme.
Nadat hij tevergeefs geprobeerd heeft zijn trein te repareren, verklaart de bestuurder zijn trein in nood.

Een locomotief van het type 18 werd als noodelement naar het station van Waremme gestuurd.
Locomotief 18 wordt aan de kop van de defecte trein geplaatst en aangekoppeld, en er wordt een remproef van het type A uitgevoerd: deze is overtuigend.
Locomotief 18 sleept de defecte trein vervolgens naar het station van Liège-Guillemins.

De geanalyseerde gegevens zijn deze die werden opgenomen aan boord van locomotief 18.
De locomotief type 18 reed in ETCS ("full supervision").

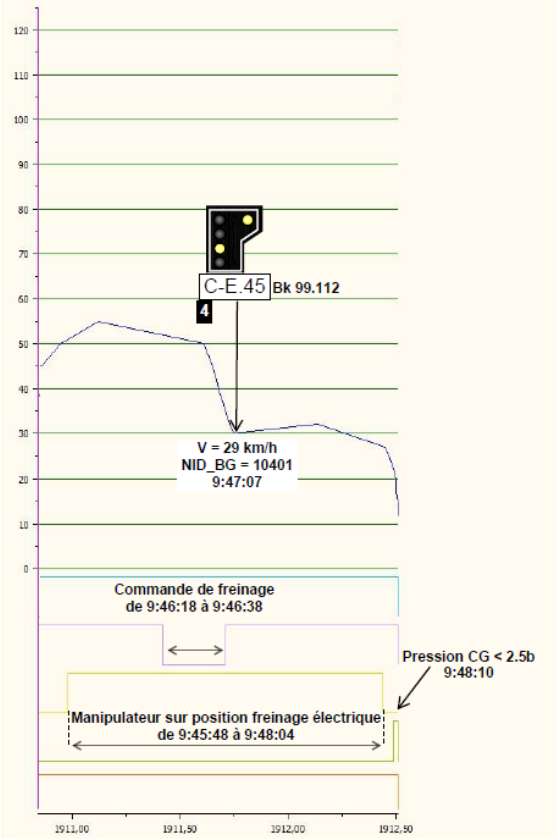


Afbeelding: uittreksel van de boordgegevens van locomotief 18: aankomst in het station van Liège-Guillemins.

NB :

- Het sein GV-E.45 bevindt zich 1495 meter opwaarts van sein C-E.45.
- Het sein C-E.45 bevindt zich ongeveer 650 meter opwaarts van de perrons van het station Liège-Guillemins.

De registraties van de gegevens van locomotief 18 werden geanalyseerd.
Uit de analyse van het laatste gedeelte van het traject (zie afbeelding) blijkt dat:



Afbeelding: uittreksel van de boordgegevens van locomotief 18: zoom op het einde van de reisweg.

- van 9u45:48 (op ongeveer 300 m van sein C-E.45) tot 9u48:04, de tractiehendel in de positie vertraging/elektrodynamische remming[2] staat; het opnamesysteem aan boord van de locomotief kan echter niet registreren of de elektrodynamische remming actief is, noch de intensiteit ervan te meten;
- van 9u46:18 tot 9u46:38, d.w.z. bij het naderen van sein C-E.45 dat een Dubbel Geel seinbeeld vertoont, er een pneumatische remming wordt bevolen;
- de snelheid van de trein vanaf sein C-E.45 tussen 29 km/u en 32 km/u schommelt, wat neerkomt op een lagere snelheid dan de maximaal toegelaten snelheid.

De analyse van de pneumatische rembediening voor het laatste deel van het traject toont:

- een pneumatische rembediening gestart bij het naderen van het sein C-E.45;
- de onderbreking van deze remming kort voor het bereiken van de voet van dit sein;
- de afwezigheid van een rembediening erna;
- de noodremming (pneumatische remming) die automatisch wordt ingeschakeld door de koppelingsbreuk.

De zone met de wissels afwaarts van sein C-E.45 werd dus binnengereden met de elektrodynamische rem van locomotief 18 als enige ingeschakelde rem, wat in strijd is met de reglementering van de spoorwegonderneming (zie hoofdstuk 2 van het Boekje HLT, Bundel VI - Titel A):

> ***2.4. De dynamische rem***
>
> De werking van deze uitrusting wordt besproken in de beschrijvingsbrochures van deze krachtvoertuigen.
>
> Aan het gebruik van de dynamische rem van de locomotieven in **korte bochten en wisselstraten** zijn enkele gevaren verbonden**.** In vermelde zones kunnen de drukkrachten het verbufferen alsook het ontsporen van voertuigen veroorzaken. Daarom **verbieden we het gebruik van de onafhankelijk bediende dynamische rem in deze zones als de toegelaten maximale snelheid gelijk aan of kleiner is dan 40 km/h**. Het op- en afbouwen van de dynamische remkracht moet oordeelkundig en langzaam gebeuren om de langskrachten in de trein te beperken en schokken te vermijden.

2 *De elektrodynamische rem is een reminrichting voor locomotieven die de tractiemotoren van de locomotief gebruikt om de aandrijfassen van de locomotief af te remmen. Deze remming werkt rheostatisch en/of recuperatief naargelang de bedrijfsspanning. Onder permanente spanning, als de opgewekte kracht niet kan worden geabsorbeerd door het net, wordt het overtollige deel in de weerstanden van de rheostatische rem gestuurd. De elektronica van de locomotief kiest de meest aangewezen modus in functie van de rijomstandigheden.*

Punt 1.7.3 van de VVESI 4.2 (Reglementering van Infrabel) geeft informatie over het gebruik van de dynamische rem op locomotieven:

GEBRUIK VAN DE DYNAMISCHE REM VAN DE LOCOMOTIEVEN

Wanneer de maximumkracht van de dynamische rem alsook de maximumgradient van toename of afname van de dynamische remkracht van een locomotief niet automatisch worden beheerd, geeft de IG de nodige onderrichtingen aan zijn bestuurders opdat zij de volgende beperkingen zouden naleven:

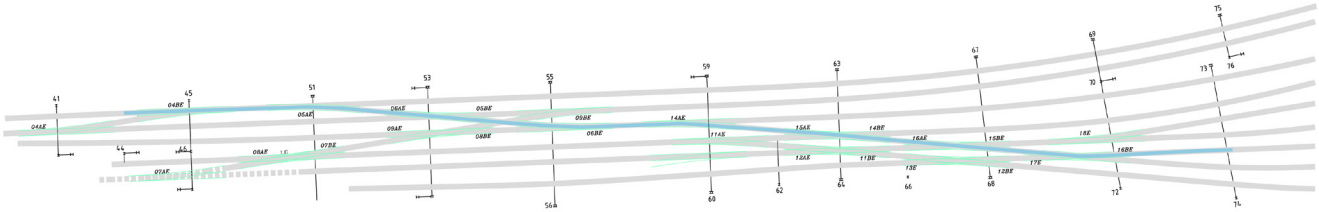
	Maximumkracht van de dynamische rem	Maximumkracht van de dynamische rem die samen met een andere rem wordt gebruikt
Eén locomotief levert de tractie	150 kN	105 kN
Meerdere gekoppelde locomotieven leveren de tractie	75 kN	105 kN

	Maximumgradient tijdens de toename van de dynamische remkracht	Maximumgradient tijdens de afname van de dynamische remkracht
In regime P	15 kN/s	6 kN/s (*)
In regime G	6 kN/s	6 kN/s (*)

(*) =15 kN/s bij een defect dat een vlugge onderbreking van de dynamische rem vereist.

3.4.4. CONTROLE VAN DE INFRASTRUCTUUR

Om het station van Liège-Guillemins binnen te rijden, doorloopt het voor trein E7400 voorziene traject de volgende wissels:
05AE – 06AE – 06BE – 14AE – 15AE – 16AE - 16BE



Afbeelding: in het blauw, het voor trein E7400 voorziene traject

3.4.4.1. SITUATIE BIJ MEETCAMPAGNES EN PERIODIEKE CONTROLES

Spoortoestel 05AE
Dit spoortoestel werd voor het laatst gecontroleerd op 16/03/2019.
De uitgevoerde metingen vallen binnen de toleranties.

Spoortoestel 06AE
Dit spoortoestel werd voor het laatst gecontroleerd op 28/05/2019.
Uit de uitgevoerde metingen blijkt dat er sprake is van een dwarsnivelleringsfout, maar dat er niet onmiddellijk moet worden ingegrepen.

Spoortoestel 06BE
Dit spoortoestel werd voor het laatst gecontroleerd op 13/05/2019.
Uit de uitgevoerde metingen blijkt dat er sprake is van een licht ondermaatse beschermingsmaat, die op 20/05/2019 werd gecorrigeerd (d.w.z. vóór de ontsporing).

Spoortoestel 14AE
Dit spoortoestel werd voor het laatst gecontroleerd op 16/03/2019.
Uit de uitgevoerde metingen blijkt dat er sprake is van:
- een licht ondermaatse beschermingsmaat, die op 05/06/2019 werd gecorrigeerd (d.w.z. vóór de ontsporing).

Uit de visuele controle van het spoortoestel blijkt dat er sprake is van:
- een oppervlaktefout (afschilfering) op de 2 wissels (lage interventieprioriteit);
- een braamfout op de 2 wissels (lage interventieprioriteit).

Deze laatste 2 gebreken werden op 12/09/2019 gecorrigeerd (d.w.z. na de ontsporing).

Spoortoestel 15AE
Het gaat om een hele Engelse wissel (TJD - traversée jonction double).
Dit spoortoestel werd voor het laatst gecontroleerd op 27/05/2019.
Uit de verrichte metingen en de visuele controle blijkt dat er geen enkele afwijking is op de takken van de hele Engelse wissel (TJD) die de trein nam.

Spoortoestel 16AE
Het gaat om een hele Engelse wissel (TJD).
Dit spoortoestel werd voor het laatst gecontroleerd op 14/05/2019.
Uit de metingen op het spoortoestel op het door de trein afgelegde traject blijkt dat er sprake is van:
- een licht ondermaatse beschermingsmaat van een van de harten van het puntstuk, die op 27/06/2019 werd gecorrigeerd (d.w.z. vóór de ontsporing).

Uit de visuele controle van het spoortoestel blijkt dat er sprake is van:
- oppervlaktefouten (afschilfering en bramen) op wissels;

Infrabel zou de wissel op 28/08/2019 gedeeltelijk vervangen.

Spoortoestel 16BE
Dit spoortoestel werd voor het laatst gecontroleerd op 02/04/2019.
De uitgevoerde metingen vallen binnen de toleranties.
Uit de visuele controle van het spoortoestel blijkt dat er sprake is van:

- een licht ondermaatse beschermingsmaat, die op 05/06/2019 werd gecorrigeerd (d.w.z. vóór de ontsporing);
- een oppervlaktefout (afschilfering) op de 2 wissels (lage interventieprioriteit);
- een braamfout op de 2 wissels (lage interventieprioriteit).

Deze laatste 2 gebreken werden op 12/09/2019 gecorrigeerd (d.w.z. na de ontsporing).

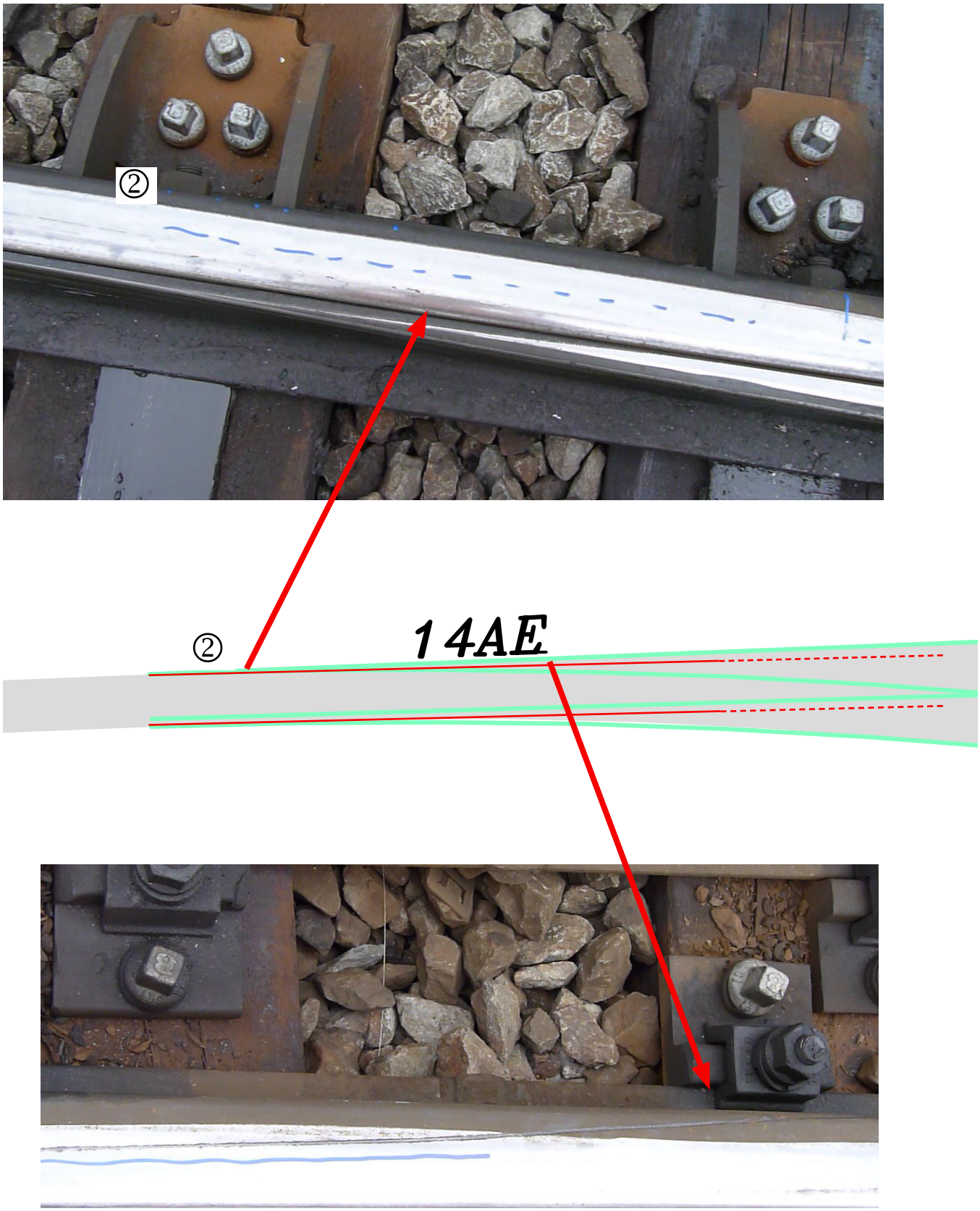
Uit de verschillende uitgevoerde controles blijkt dat de infrastructuur voldoet aan de reglementaire voorschriften wat betreft de in acht te nemen afmetingen.

3.4.4.2. CONTROLE VAN HET SPOOR NA DE ONTSPORING: PUNT VAN ONTSPORING

Een inventaris van de sporen in het spoor toont:

- ① sporen in de zone tussen wissel 06BE en wissel 14AE
- ② sporen op de wissel en de spoorstaven van wissel 14AE
- sporen van schade veroorzaakt door de doorrit van wielen door wissel 14AE en afwaarts van deze wissel

De door het Onderzoeksorgaan aangenomen hypothese is dat in wissel 14AE het linkerwiel van de eerste as van het eerste draaistel van het eerste M4-rijtuig werd opgetild (er werden geen sporen van het klimmen van het wiel gevonden) en op de spoorstaafkop heeft gereden, waarna het terugviel tussen de open wissel en de rail.



In het rood: het traject dat het ontspoorde draaistel volgde (in plaats van de wissel in rechts leidende stand te volgen).

Volgens deze hypothese werden de sporen die opwaarts van het punt ② werden waargenomen (inclusief de sporen die werden waargenomen op het punt ①) veroorzaakt door de wielen van de volgende draaistellen, die de ontsporingsbeweging van het eerste draaistel volgden.

3.5. EXPERTISE

In het kader van een overheidsopdracht heeft het OO het externe adviesbureau Mastéris aangesteld om een analyse te maken van de factoren en de krachten waaraan de trein werd blootgesteld bij het binnenrijden van het station van Liège-Guillemins, en om een computersimulatie te maken van de treindynamica, om zo de combinatie van factoren die potentieel bijgedragen hebben aan de ontsporing in kaart te brengen.

Alle benodigde gegevens voor het onderzoek van Mastéris, en specifieker voor de simulatie met de spoorwegdynamicasoftware, waren niet beschikbaar.
Daarom heeft het bedrijf Mastéris, op vraag van het OO, tijdens de analyses en simulaties verschillende parameters laten variëren op basis van de ter beschikking gestelde elementen en de eigen expertise en ervaring.

Er vonden verschillende informatie- en toelichtingsvergaderingen met de betrokken partijen plaats: Mastéris presenteerde er zijn methode en analyses. Mastéris gaf ook uitleg over de computersimulatie: er werd een model opgesteld van de volledige trein en de eerste berekeningen werden gemaakt. Mastéris werkte vervolgens een verkort model van de trein uit en maakte de eerste berekeningen opnieuw: de met het verkorte model verkregen resultaten waren vergelijkbaar met die van het volledige model. Het gebruik van het verkorte model had dus geen invloed op de resultaten, maar maakte tijdwinst bij de machineberekeningen mogelijk: alle simulaties werden dus met het verkorte model uitgevoerd.

Conform de procedures die in het raam van de onderzoeken van het Onderzoeksorgaan worden gebruikt, konden de betrokken partijen opmerkingen maken over zowel de analyse als over de presentaties die tijdens de vergaderingen werden gebruikt, alsook over het onderzoeksverslag en de deliverables van Mastéris. Met deze opmerkingen werd rekening gehouden en ze werden tevens in de bijlagen bij dit verslag gepubliceerd.

De presentaties die tijdens de vergaderingen met Mastéris werden gebruikt, zijn enkel voor intern gebruik en beperkt tot de context van deze vergaderingen (ze worden trouwens niet in dit onderzoeksverslag gepubliceerd): het gebruik en de reproductie ervan in om het even welke andere context is verboden.
De deliverables van Mastéris gaan als bijlage bij dit verslag: ze mogen niet van dit onderzoeksverslag worden losgekoppeld, noch mogen ze gedeeltelijk worden gereproduceerd, noch mogen ze voor andere doeleinden worden gebruikt dan die waarvoor ze door Mastéris in het kader van de door het Onderzoeksorgaan gevraagde analyse werden opgesteld.

Het resultaat van deze samenwerking tussen de betrokken partijen, Mastéris en het Onderzoeksorgaan is een studie die, ofschoon ze niet het exacte scenario van het ongeval in Liège-Guillemins op 11 juli 2019 vastlegt, wel toelaat om de parameters te identificeren die in samenloop een invloed op de ontsporing kunnen hebben gehad. Er is geen prioritering in de uiteenzetting van deze factoren te zien: het is in de samenloop ervan dat er een verhoogd ontsporingsrisico moet worden gevonden.

De deliverables die Mastéris heeft geleverd, zijn als bijlage opgenomen in dit onderzoeksverslag en beschrijven in extenso de uitleg en berekeningen.

3.6. MAATREGELEN GENOMEN VOOR DE BESCHERMING EN DE VRIJWARING VAN DE SITE VAN DE GEBEURTENIS

- Om 09:48 uur merkt de bestuurder van trein E1732, die stilstaat op spoor IV in het station van Liège-Guillemins, de ontsporing op en hij stuurt een GSM-R-alarm uit.
- Om 09:49 uur brengt Traffic Control blok 45 op de hoogte. Het verkeer wordt onderbroken tussen Liège-Guillemins en Ans.
- Om 09:53 uur brengt TC de verdeler ES van Luik en het SOC op de hoogte. De verdeler ES zorgt voor de toepassing van de afdekkingen van de gevallen in tabel I lijn 36 voor alle verkeer (14203 - 14204 - 14801 - 14802).
- Om 10:07 uur activeert TC het nood- en interventieplan van HR Rail.
- Om 10:48 uur verzoekt de verdeler ES om de afdekkingen van de gevallen in tabel II toe te passen:
  - lijn 36 (24257, 24264, 24265, 24266 en 24270)
  - lijn 34 (24830, 24835, 24836, 24839 en 24840).

  Blok 45 past deze toe.

Geleidelijke opheffing van de beschermingen

- Om 10:51 uur worden de afdekkingen van de gevallen in tabel I opgeheven. Het verkeer in Ans is weer op gang gekomen. Alle sporen in Liège-Guillemins zijn toegankelijk per doodlopend spoor aan de kant van Ans. Het verkeer tussen Liège-Guillemins en Ans blijft onderbroken.
- Om 11:56 uur geeft de verdeler ES toestemming om geval 24257 TII L.36 (spoor A, lijn 36 tussen Ans en Luik) op te heffen.
- Om 15:16 uur worden de afdekkingen van de gevallen 24264 en 24270 L36 opgeheven.
- Om 15:29 uur worden ook de afdekkingen van geval 24265 lijn 36 opgeheven.

Genomen maatregelen 17/07/2019:

- Om 14:08 uur worden de afdekkingen van de gevallen 24835, 24836, 24839 en 24840 L.36 opgeheven.

Einde van de werken

Op 19/07/2019, om 16:34 uur, zijn de sporen volledig hersteld.

4. ANALYSE EN BESLUITEN

4.1. DEFINITIEVE SAMENVATTING VAN DE OPEENVOLGING VAN GEBEURTENISSEN

Op donderdag 11 juli 2019 staat de reizigerstrein E7400 van de spoorwegonderneming NMBS ingevolge een technisch probleem (uitvallen van de hoogspanning op de elektrische locomotieven van de trein) stil in het station van Waremme en dienen de reizigers uit te stappen. Nadat hij tevergeefs geprobeerd heeft zijn trein te repareren, verklaart de treinbestuurder zijn trein in nood. Trein E7400 is samengesteld uit elektrische locomotief van het type 27, gevolgd door 11 rijtuigen M4 en een elektrische locomotief van het type 27 achteraan de trein.

Er wordt een locomotief van het type 18 als hulpelement gestuurd teneinde de defecte trein naar het station van Liège-Guillemins te slepen.

Bij de koppeling van locomotief 18 met de weg te slepen trein verbindt de rangeerder de 2 pneumatische leidingen (de Automatische Leiding en de Leiding Automatische Rem) van hulplocomotief 18 met de pneumatische leidingen van het weg te slepen treinstel. Remtest type A wordt vervolgens uitgevoerd en is sluitend: de continuïteit van de AL en de LAR is verzekerd over de totale lengte van het konvooi.
Bovendien is tussen locomotief 18 en de weg te slepen trein:

- de kabel voor de elektrische voeding van de spoorlijn (3000V) niet verbonden;
- de kabel van de elektropneumatische rem (EP) (110 V) niet verbonden.

De automatische rem is operationeel ingeval van vastzetten en lossen vanuit locomotief 18.
De kabel van de EP rem, die toelaat de bevelen voor het vastzetten en het lossen van de rem te bespoedigen over de volledige trein, is niet verbonden tussen locomotief 18 en de weg te slepen trein: dit staat de werking van de pneumatische rem niet in de weg, zowel bij het vastzetten als bij het lossen.
Ingeval van een noodremming of een ontijdige ontkoppeling treedt de rem automatisch in werking op de gehele trein.

Kort na 9:45 uur nadert de trein de wisselzone aan de inrit van het station Liège-Guillemins op spoor I, met een snelheid van tussen 29 en 32 km/u. Het voorziene traject brengt de trein op spoor VII.
Tijdens de afdaling bij de inrit van het station Liège-Guillemins gebruikte de treinbestuurder enkel de dynamische (rheostatische) rem op zijn locomotief, in strijd met de interne reglementering van de spoorwegonderneming.

Omstreeks 9:48 uur nemen sleeplocomotief 18 en locomotief 27 aan de kop wissel 06BE en vervolgens wissel 14AE. Het eerste M4-rijtuig ontspoort ter hoogte van deze wissels, gevolgd door het tweede en derde rijtuig. De twee locomotieven aan de kop zetten de voorziene reisweg voort, terwijl de eerste drie rijtuigen verder ontsporen.
Tussen locomotief 27 aan de kop van de trein en het eerste rijtuig doet zich een koppelingsbreuk voor, waardoor de leiding automatische rem wordt onderbroken en een noodremming wordt ingezet.
De 2 locomotieven aan de kop enerzijds en de M4-rijtuigen en de locomotief aan de staart anderzijds komen tot stilstand.

Vanaf de perrons in het station ziet een bestuurder van een stilstaande trein de ontsporing en hij stuurt een GSM-R-alarm uit.

4.2. BESLUIT

Het Onderzoeksorgaan (OO) was niet van plan een onderzoek op te starten naar deze ontsporing, die niet voldoet aan de definitie van een ernstig of significant ongeval.

Tijdens een vergadering waarbij de eerste elementen werden voorgesteld die NMBS en Infrabel hadden verzameld, besefte het OO echter:

- dat de analyse van deze ontsporing aan lage snelheid aan de ingang van het station van Liège-Guillemins complexer bleek dan het leek,
- dat er geen consensus was tussen de twee partijen.

Na de kwalificatie van het ongeval waren de gedane metingen op de plaats van het ongeval beperkt en betroffen zij:

- de staat van het spoor,
- het rollend materieel,
- de opnamebanden van de trein.

Daarnaast werden, nadat de onderzoekers van het OO aangekomen waren op de plaats van het ongeval, bepaalde elementen van het rollend materieel (koppelingshaak, pneumatische slangen) aangepast zonder dat er opnames of foto's van werden gemaakt, wat in strijd is met artikel 8 van het koninklijk besluit van 16 januari 2007 tot vaststelling van sommige regels betreffende de onderzoeken naar ongevallen en incidenten bij de spoorwegen.

Het OO heeft verschillende gegevens geanalyseerd: ze bleken binnen de normen en toleranties te vallen en de analyse van de verschillende factoren afzonderlijk kon de ontsporing niet verklaren.

In het kader van een overheidsopdracht heeft het OO het externe adviesbureau Mastéris aangesteld om een analyse te maken van de factoren en de krachten waaraan de trein werd blootgesteld bij het binnenrijden van het station van Liège-Guillemins, en om een computersimulatie te maken van de treindynamica, om zo de combinatie van factoren die potentieel bijgedragen hebben aan de ontsporing in kaart te brengen.

In een eerste deliverable heeft Mastéris:

- een scenario samengesteld dat alle bijdragende factoren omvat;
- de opgewekte krachten berekend.

Alle benodigde gegevens voor het onderzoek van Mastéris, en specifieker voor de simulatie met de spoorwegdynamicasoftware, waren niet beschikbaar. Daarom heeft het bedrijf Mastéris, op vraag van het OO en om de invloedsfactoren te identificeren, tijdens de analyses en simulaties verschillende parameters laten variëren op basis van de ter beschikking gestelde elementen.

Ongeacht de ernst van de gevolgen van een ongeval moeten de betrokken partijen, in het kader van een ontsporing van een reizigerstrein in hoofdspoor, bij een ontsporing alle relevante informatie verzamelen over de infrastructuur, het rollend materieel en de handelingen van de operatoren om te achterhalen welke factoren ertoe hebben bijgedragen dat het ongeval kon gebeuren. Indien alle gegevens op de plaats van het ongeval waren verzameld, zou de simulatie de werkelijke situatie dichter benaderen.

De resultaten van deze simulaties zijn opgenomen in de tweede deliverable van Mastéris.

Een eerste simulatie met de nominale parameters (nieuwe rail, perfect spoor zonder gebreken, nominale kenmerken van de trein) heeft aangetoond dat de ontsporingszone een gevoelige zone is voor twee ontsporingscriteria:

- de optilling van het wiel (dz)
- de verhouding van de wiel-railcontactkrachten (Y/Q).

Er werden conclusies getrokken uit de uitgevoerde parametrische studies, waaronder:

- De ingang van zone 14AE, die geïdentificeerd werd als de zone waar de ontsporing plaatsvond, is veruit de meest kritieke zone van het traject, en dat is ook zo bij een spoor zonder gebreken, een nominale trein en een zwakke rheostatische remkracht door de locomotief aan de kop.
- Een droge rail verhoogt het risico op ontsporing.
- Het railprofiel heeft ook een invloed op het ontsporingsrisico, ongeacht of dit gecombineerd wordt met een remkracht of niet.
- De toename in spoorbreedte heeft een significante invloed op het ontsporingsrisico wanneer deze wordt gecombineerd met een hogere rheostatische remkracht door de locomotief aan de kop.
- De scheluwtegebreken die verband houden met de vervorming van het draaistel en/of het spoor kunnen samen met de slijtage van de rail en een verhoogde rheostatische remkracht door de locomotief aan de kop van de trein laten ontsporen in de onderzochte zone.

De studie van Mastéris toont aan dat de zone waar de trein ontspoord is, bijzonder gevoelig is in vergelijking met de voorgaande wisselzone en dat het geheel van de invloedsfactoren (dynamische remkracht, spoorbreedte groter dan de nominale waarde, scheluwtegebrek, versleten railprofiel, wrijvingscoëfficiënt) van dien aard is dat de ontsporingscriteria bereikt of overschreden worden.

5. GENOMEN MAATREGELEN

5.1. GENOMEN MAATREGELEN DOOR DE NMBS

Er is besloten om te herinneren aan de instructies met betrekking tot het gebruik van de rem door de treinbestuurder (publicatie in het Orderboek nr. 4, bericht 19030 van 01/08/2019).

6. AANBEVELINGEN

Na afloop van het onderzoek brengt het Onderzoeksorgaan geen enkele aanbeveling uit naar aanleiding van de ontsporing die op 11 juli 2019 aan de inrit van het station Liège-Guillemins plaatsvond.

7. BIJLAGEN

7.1. DELIVERABLE 1 VAN MASTÉRIS: "ANALYSE VAN DE BIJDRAGENDE FACTOREN EN BEREKENING VAN DE GEGENEREERDE KRACHTEN" (GEEN VERTALING BESCHIKBAAR IN HET NEDERLANDS)

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 entrainé 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.

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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.

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 consite 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

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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).

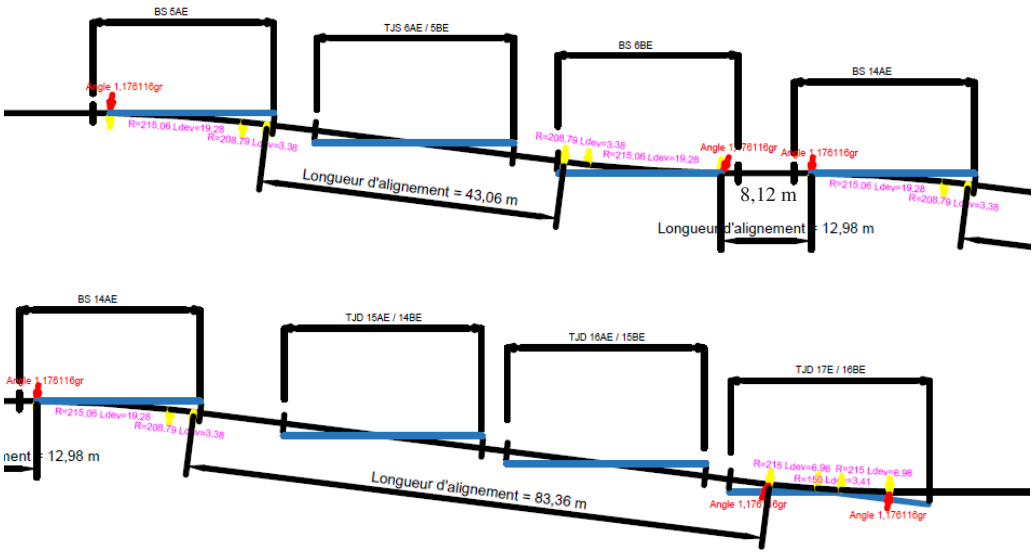


Figure 3 : tracé de l'itinéraire emprunté par les locomotives

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 commision 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.

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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 4) OK/NOK
branche 1		1K	1L	1S
	mesuré	8	OK	OK
	corrigé			
branche 2		2K	2L	2S
	mesuré	8	OK	OK
	corrigé			

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.

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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 :

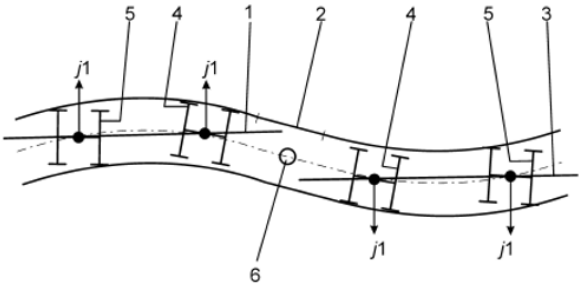


Figure 4 : Hypothèses concernant les jeux latéraux

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) :

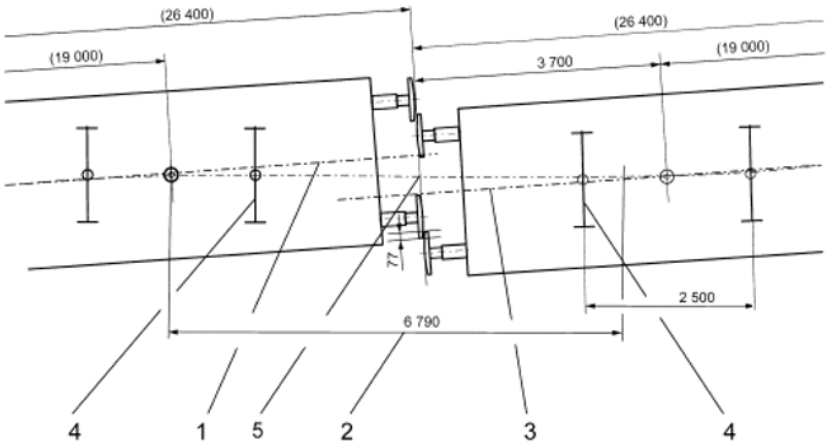


Figure 5 : Recouvrement des plateaux

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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 entrainé 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.

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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 recaler les profils des voies entre eux. La figure 6 ci-dessous illustre le profil reconstitué à partir de ces données.

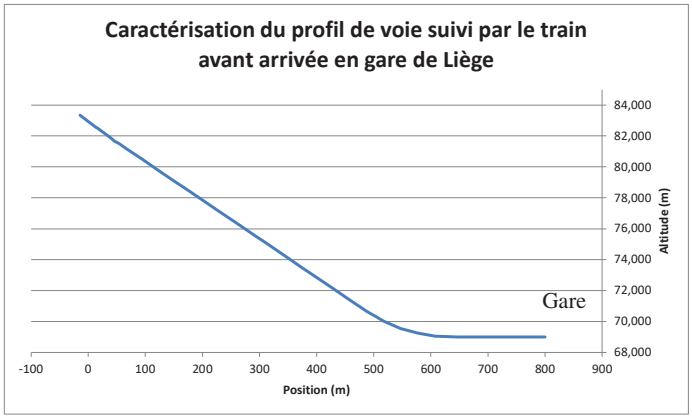


Figure 6 : profil du parcours emprunté (800 m en amont de la gare de Liège)

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) :

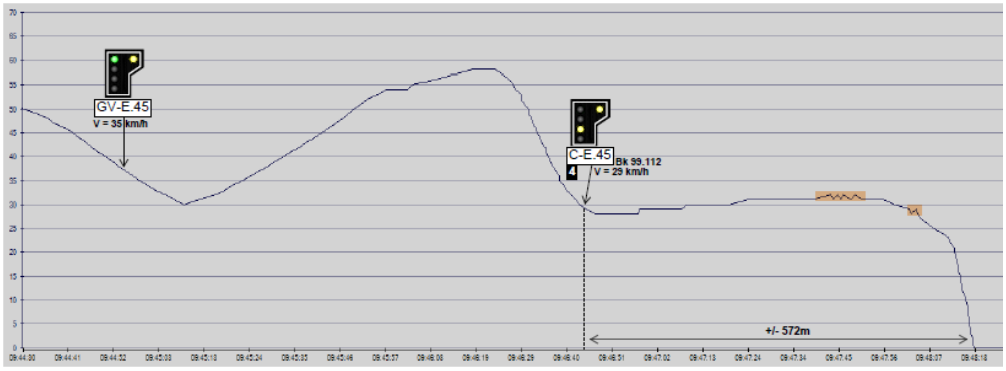


Figure 7 : Enregistrement ATESS (vitesse en ordonnée / temps en abscisse).

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.

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

La corrélation obtenue est alors la suivante :

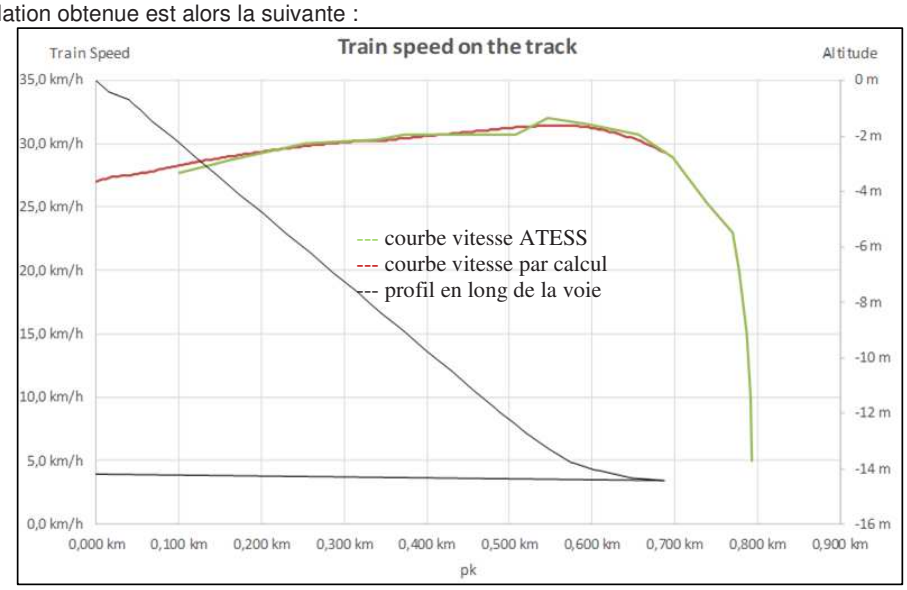


Figure 8 : Corrélation de vitesse

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.

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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.

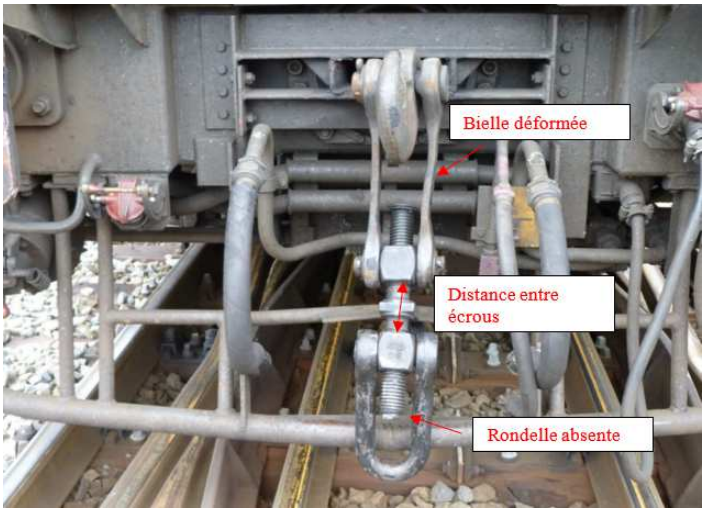


Figure 9 : Tendeur de la locomotive HLE27

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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 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.

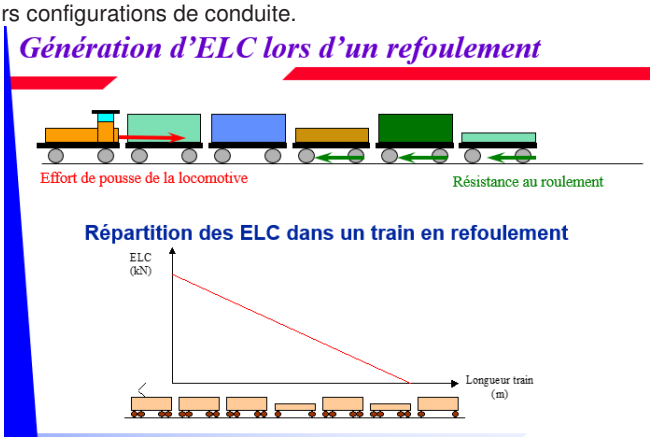


Figure 10 : Génération d'ELC lors d'un refoulement

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

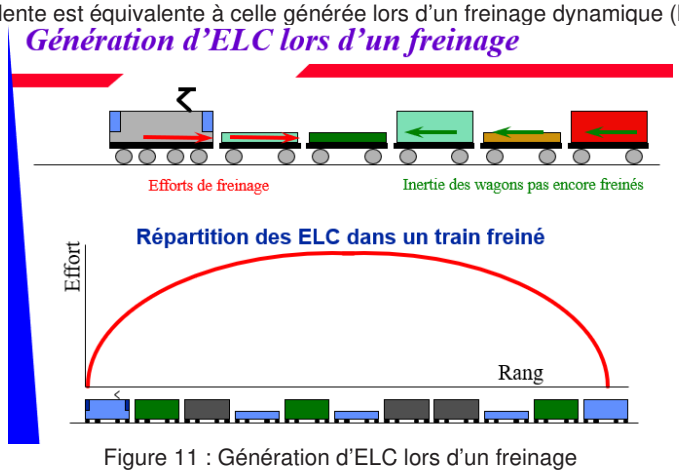


Figure 11 : Génération d'ELC lors d'un freinage

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…

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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) : $F_{aero} = 1384.39 + 8.24 \cdot \mathrm{v} + 0.28 \cdot v^2$ [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.

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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).

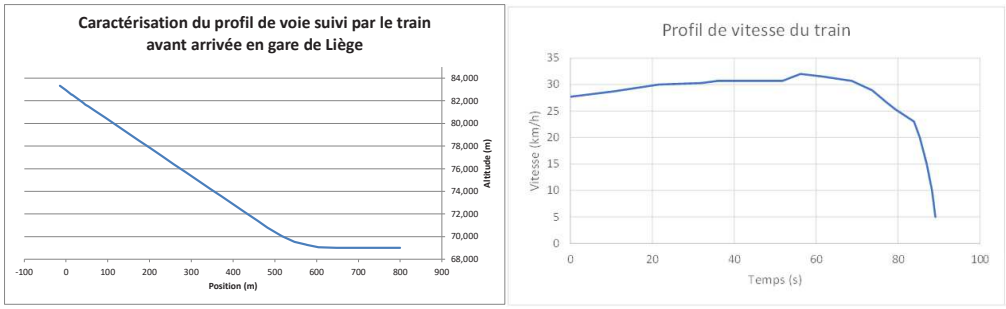


Figure 12 : Profil de voie et de vitesse

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.

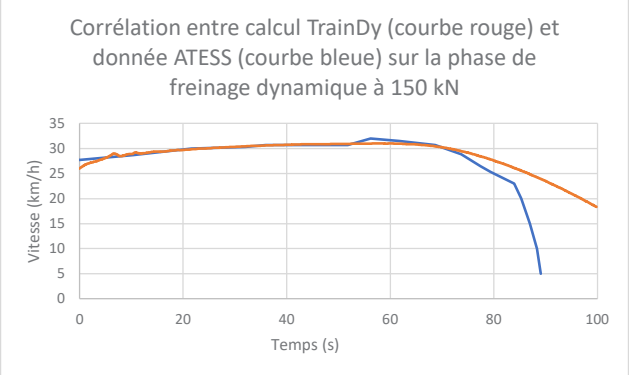


Figure 13 : Corrélation de vitesse en utilisant TrainDy

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 laisant 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 corréler 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 :

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

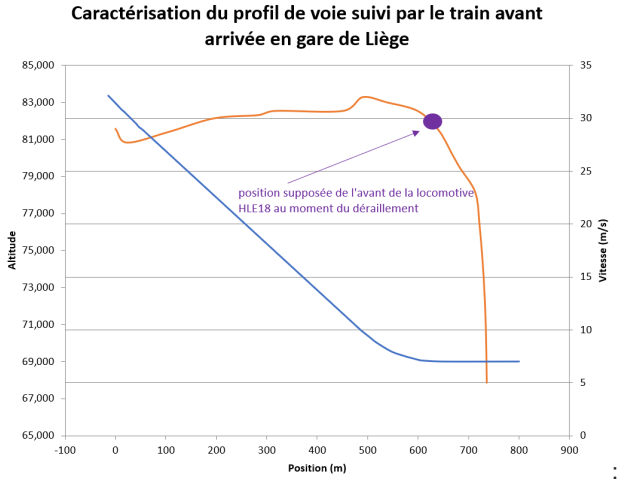


Figure 14 : Position supposée au moment du déraillement

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 corréler 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 Atess. 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.

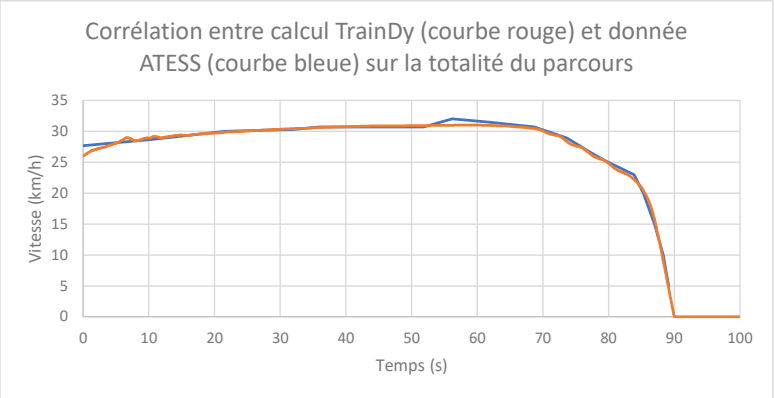


Figure 15 : Corrélation de vitesse en utilisant TrainDy avec des hypothèses complémentaires

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 :

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

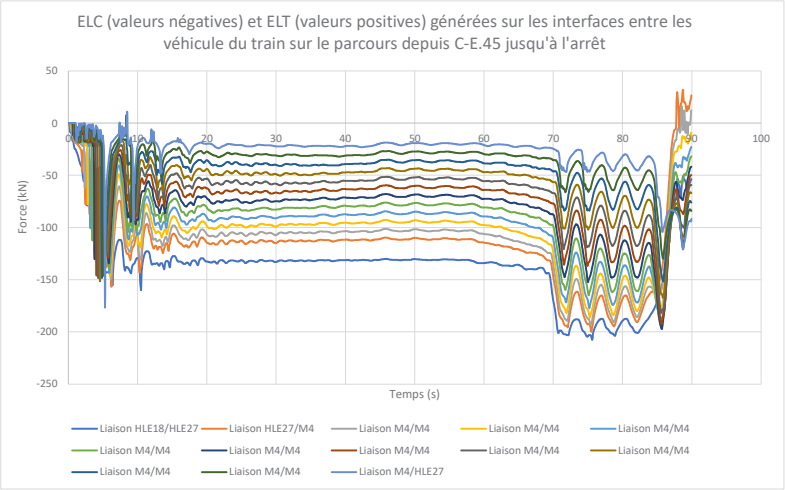


Figure 16 : Les ELC et ELT calculés

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

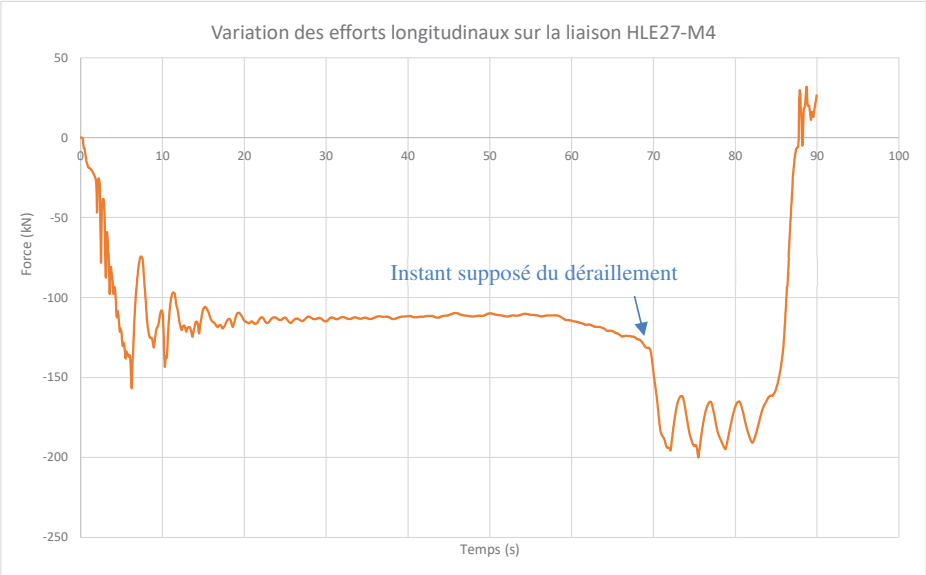


Figure 17 : Les ELC et ELT calculés pour la liaison HLE/M4

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.

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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.

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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 apparait 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 entrainé 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.

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

7.2. DELIVERABLE 2 VAN MASTÉRIS: "COMPUTERSIMULATIE VAN HET DYNAMISCHE GEDRAG VAN HET ONTSPOORDE RIJTUIG IN DE ONTSPORINGSZONE" (GEEN VERTALING BESCHIKBAAR IN HET NEDERLANDS)

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 :
    - Profils de rail,
    - Défauts de nivellement par file de rail,
    - Défauts de dressage par file de rail,
    - Ecartement de la voie,
    - 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 pontuels 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.

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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

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 consite 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

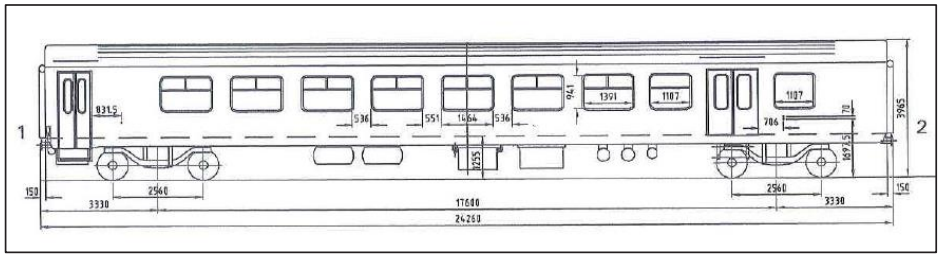
Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

2 Modélisation

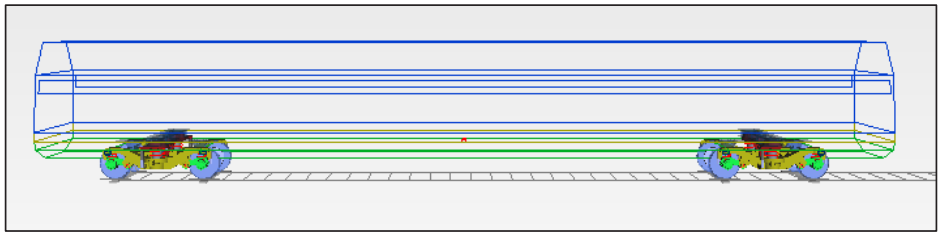
Dans le cadre de cette étude, le logiciel SIMPACK version 2021x.4 de la société Dassault Systèmes, est utilisé.
Le modèle est décrit à l'aide de corps solides indéformables reliés entre eux par des liaisons cinématiques et des éléments d'efforts.
Chaque solide indéformable est défini par son centre de 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 boite 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.

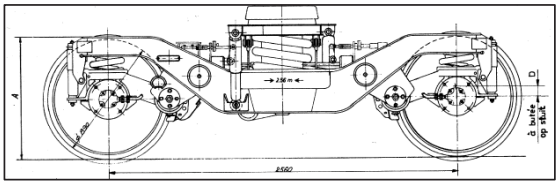


a. Plan 662-0-001M de la voiture M4

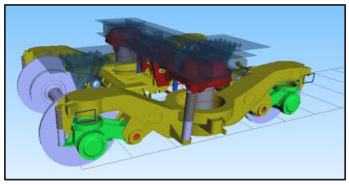


b. Modélisation avec le logiciel SIMPACK de la voiture M4
Figure 3: Plan (a) et modélisation (b) de la voiture M4

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



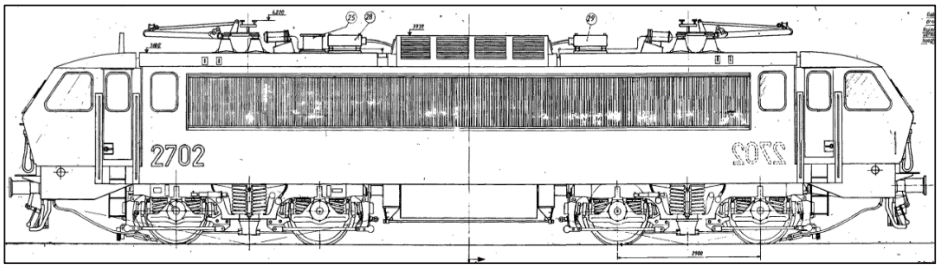
b. Modélisation SIMPACK
Figure 4: Plan (a) du bogie Y32 et modélisation (b) SIMPACK

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

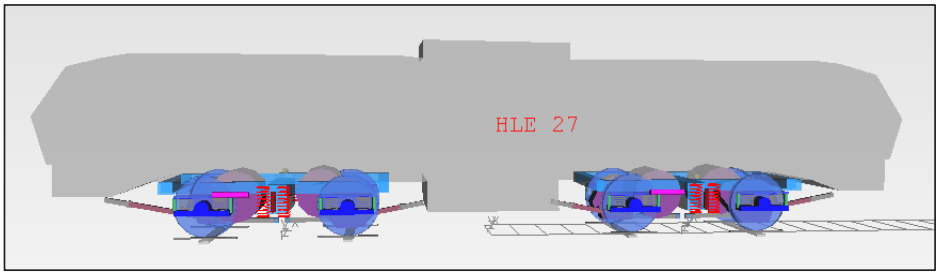
Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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.



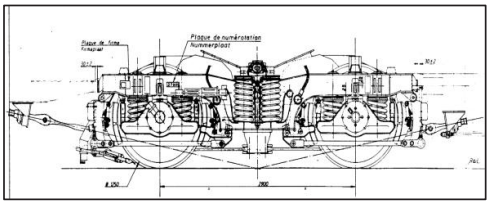
a. Plan 313-0-007M de la locomotive HLE27



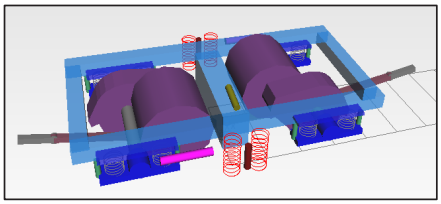
b. Modélisation avec le logiciel SIMPACK de la locomotive HLE27

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.

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

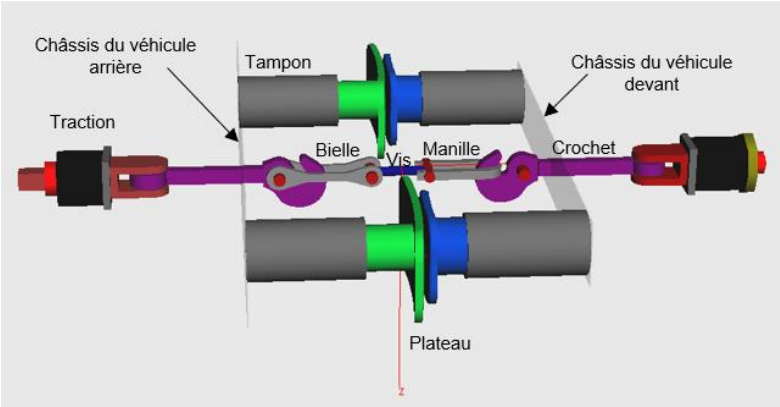
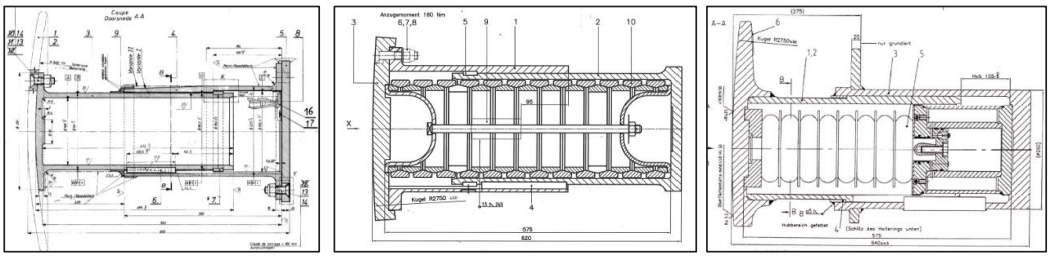


Figure 7 : Modélisation SIMPACK de l'ensemble choc-traction

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**.



a. Tampon M4 *b. Tampon HLE27* *c. Tampon HLE18*

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.

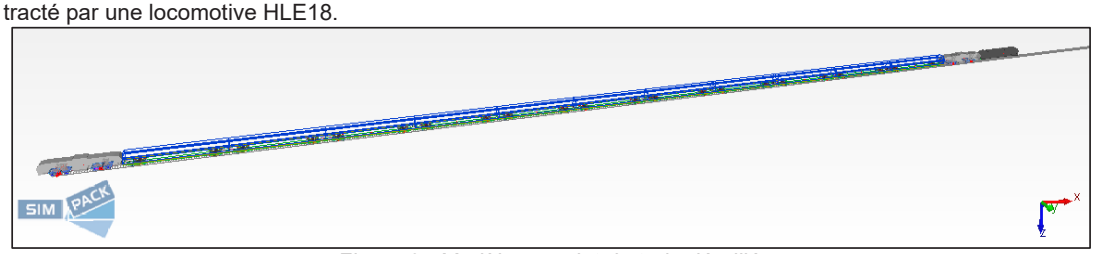


Figure 9 : Modèle complet du train déraillé

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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.

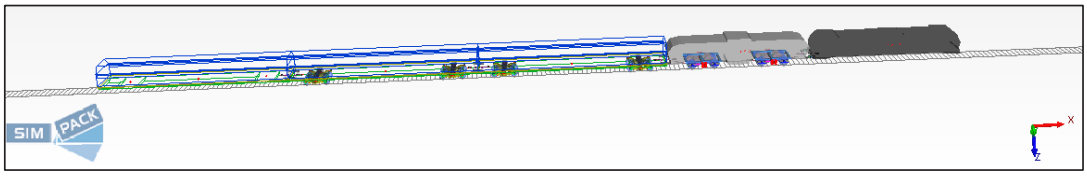


Figure 10 : Modèle réduit utilisé dans le cadre de cette étude

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.

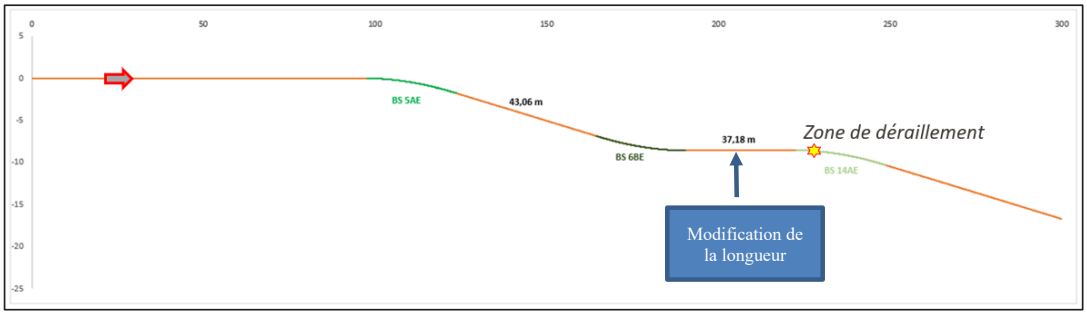


Figure 11 : Tracé de la voie de la zone de déraillement

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 initailement 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.

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

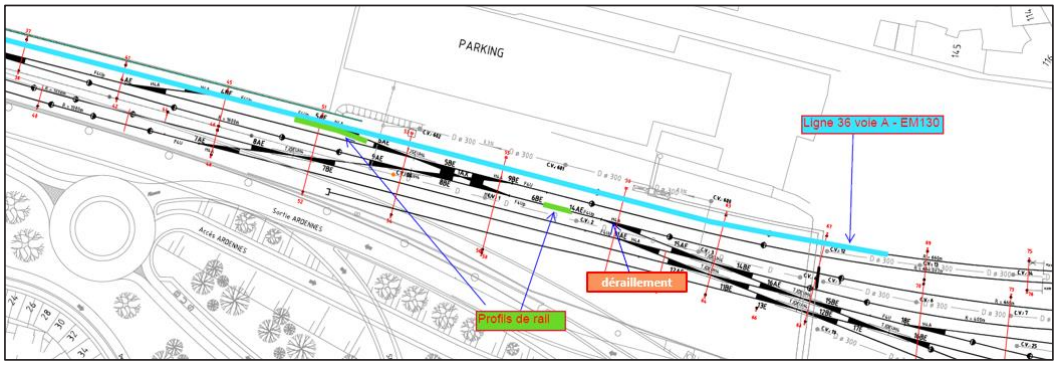


Figure 12 : zones avec les mesures disponibles de défauts de voie et de profil de rail

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 donnes sont ensuite transformées en un format compatible avec SIMPACK.

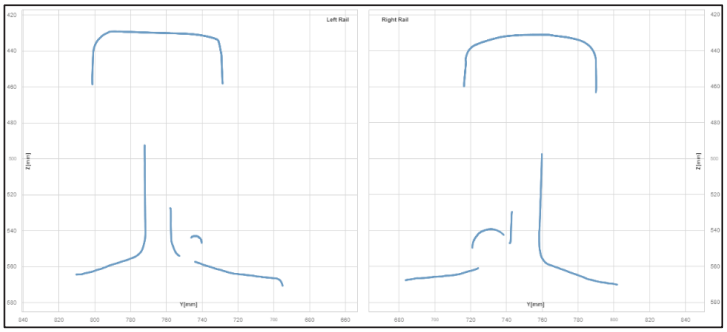
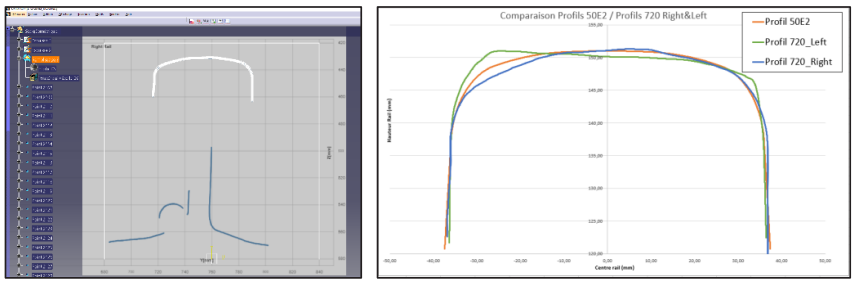


Figure 13 : Une image de profils mesurés de rail avant la zone de déraillement



a) import d'image dans CATIA b) profils reconstruits pour une section

Figure 14 : Reconstruction des profils de rail

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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.

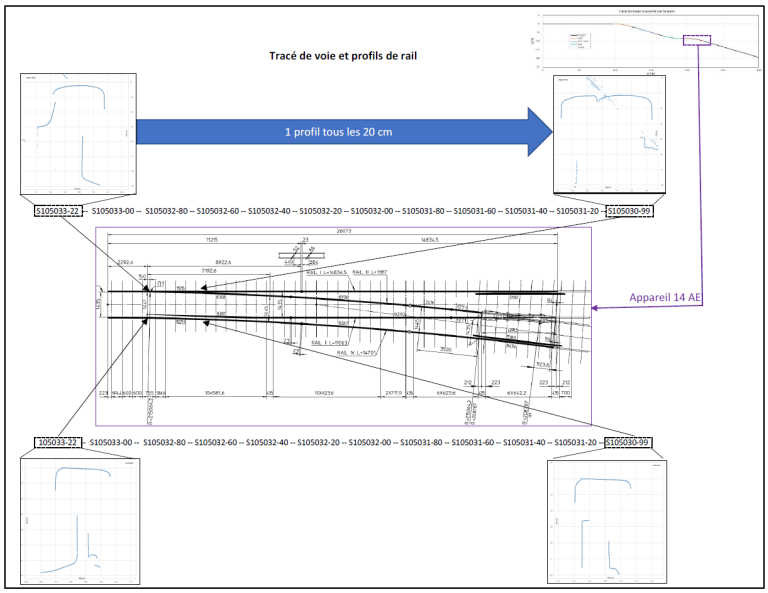


Figure 15 : Tracé de voie et N° des profils de rails sur la zone 14AE

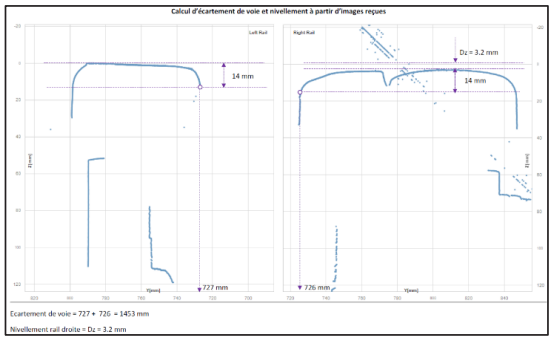


Figure 16 : Une image de profils mesurés de rail sur la zone 14AE

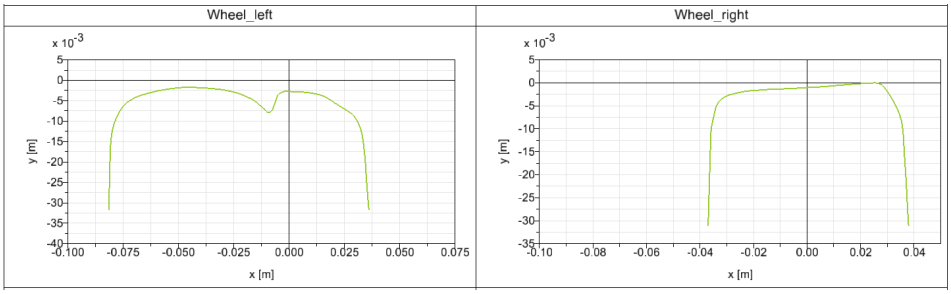


Figure 17 : Reconstruction des profils de rail – Zone 14AE

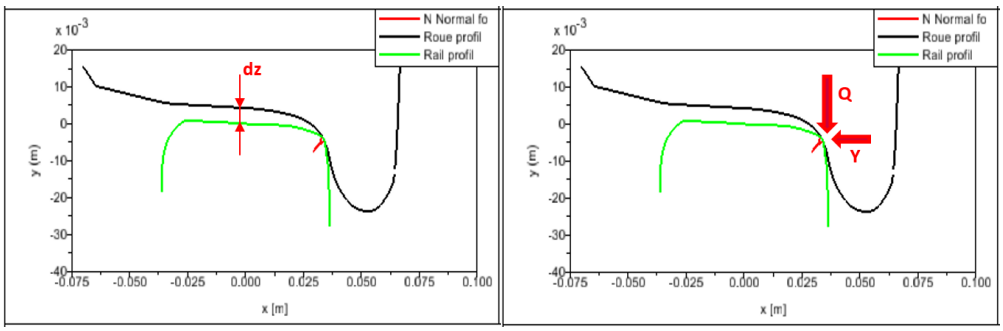
Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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 exterieure à la courbe considérée).
- Le ratio des efforts de contact Y/Q. Y est l'effort transversal. Q est l'effort vertical.



a) Le soulèvement de la roue dz b) Le ratio des efforts de contact Y/Q

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 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 coefficicent 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

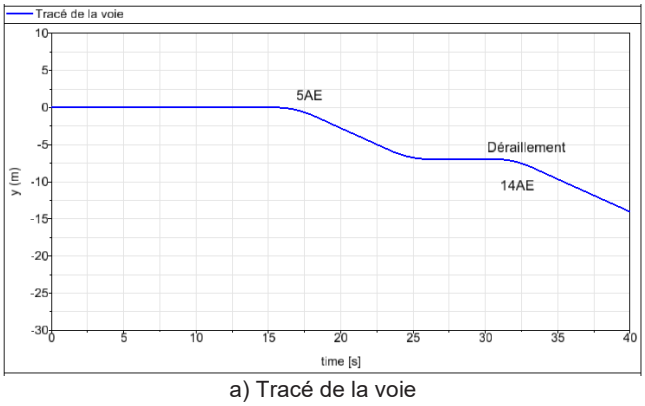
Le premier calcul de référence est réalisé en utilisant les paramètres ci-dessous :

- 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 kN
- Ecartement de voie: e = 1448 mm
- Voie parfaite sans défauts
- Train avec les caractéristiques nominales

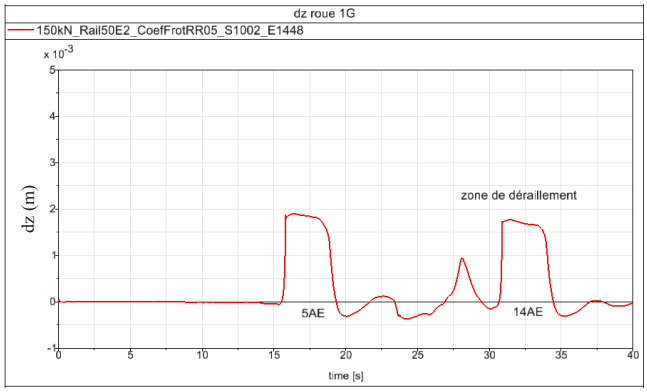
Le soulèvement et le ratio Y/Q de la roue gauche du premier essieu de la première voiture (la roue la plus critique) sont tracés ci-dessous (figures 19b et 19c).

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).

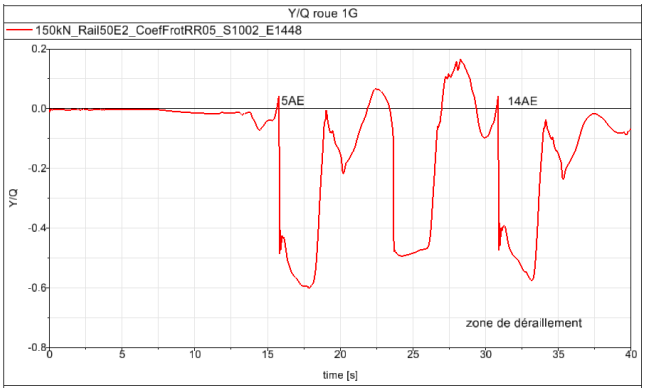
Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite



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 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.

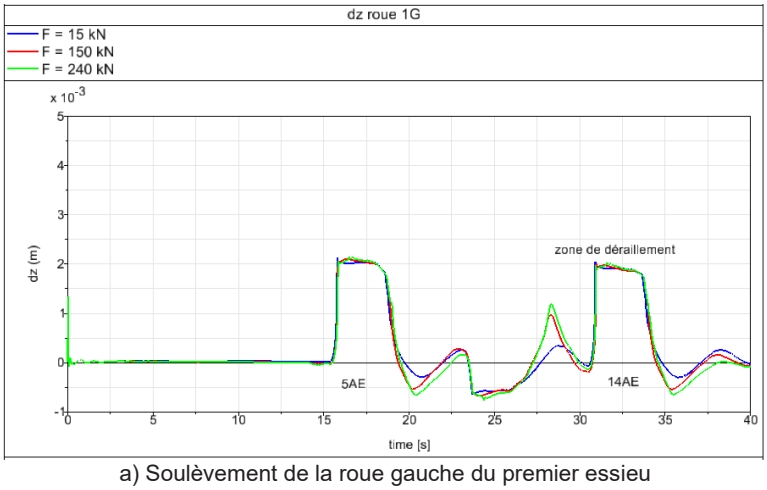
Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

3.3 Cas 1 : Influence de l'effort de freinage

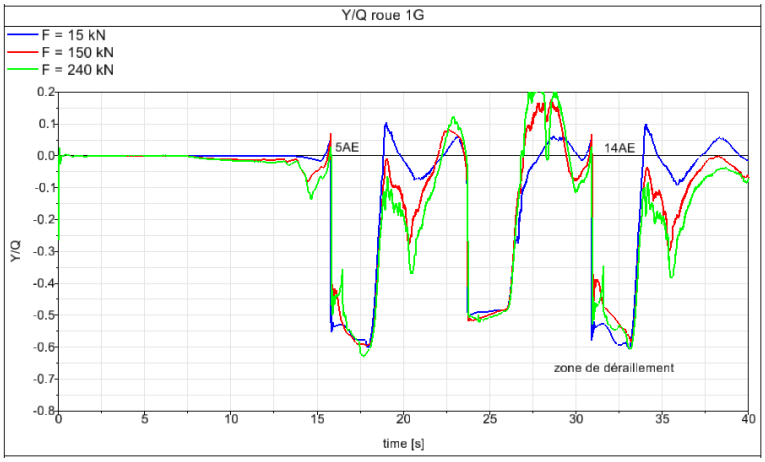
Selon l'analyse du lot 1 (document de référence P/CIM CAB3/2021-2446), l'effort de freinage est de l'ordre de 150 kN. Cependant, à la demande du client, une étude de l'influence de ce paramètre a été réalisée dans le cadre de ce lot 2. Pour cette étude, les paramètres du modèle sont :

- 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.

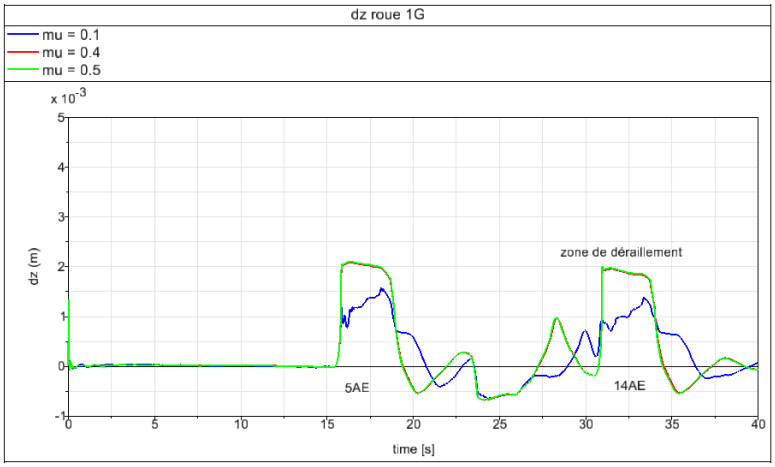
Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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

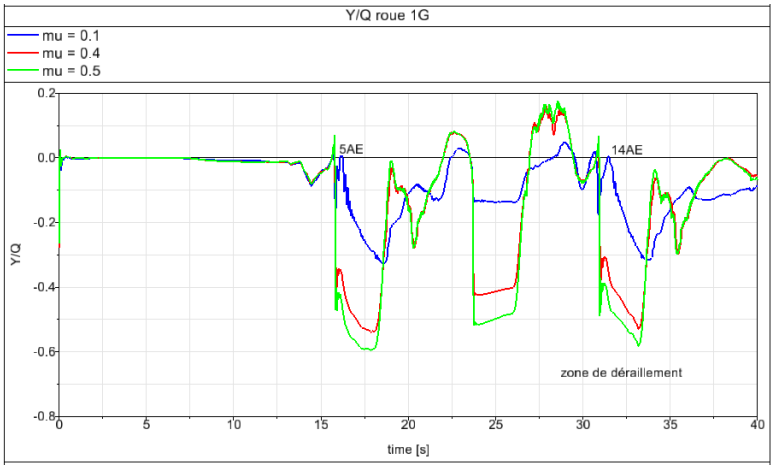
Dans cette section, l'influence du coefficient de frottement de contact roue-rail (différent selon les conditions locales et météorologiques) sur le risque de déraillement est étudiée. Pour cette étude, les paramètres du modèle sont :

- profil de rail neuf 50E2;
- profil de roue neuve S1002;
- effort de freinage: F = 150 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.

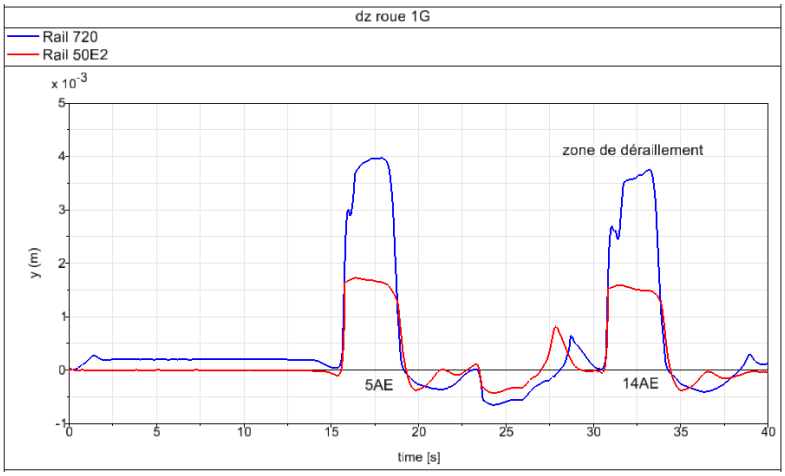
Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

3.5 Cas 3 : Influence du profil de rail

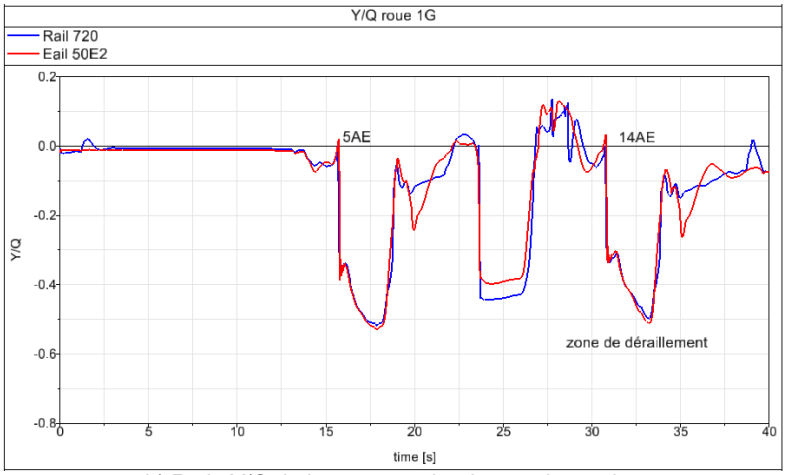
Pour cette étude, les paramètres du modèle sont :

- profil de roue neuve S1002;
- effort de freinage: F = 150 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

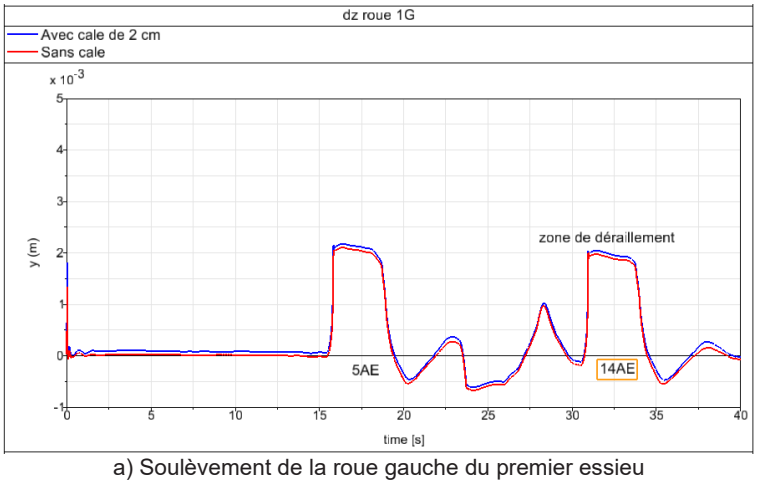
Ces résultats montrent que l'influence du profil de rail usé sur le risque de déraillement est **notable**. Il est par ailleurs important de préciser qu'au voisinage de l'aiguille 14AE (comme pour tout aiguillage), la conception de base impose un changement progressif du profil de rail, ce qui influe 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

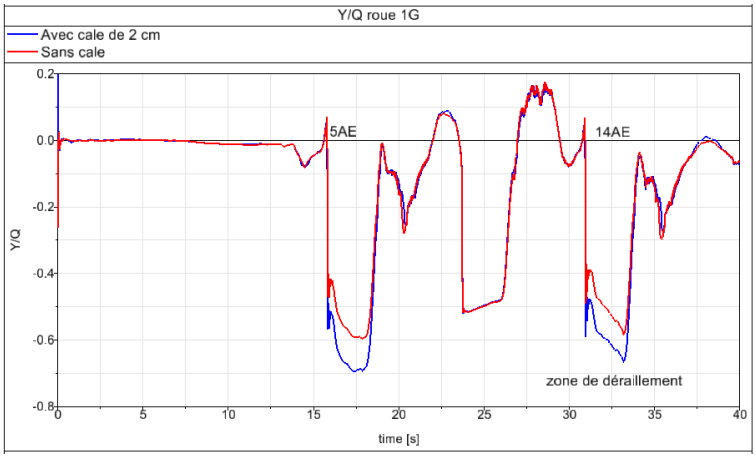
3.6 Cas 4 : Influence d'un défaut de gauche de bogie et/ou de voie

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.

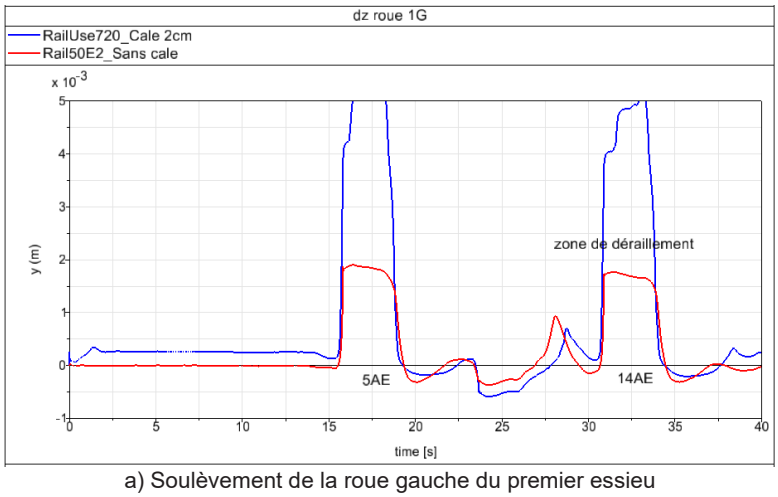
Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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

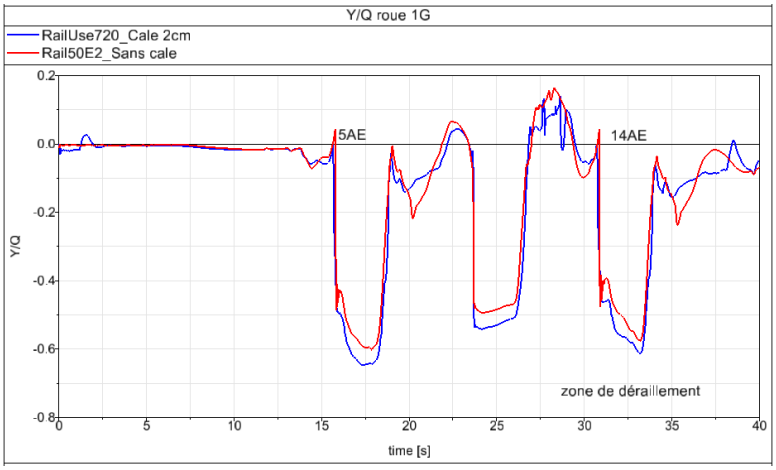
Dans cette section, nous considérons une combinaison d'un défaut de gauche (cale de 20 mm) avec un rail usé (rail 720). Les autres paramètres du modèle sont :

- 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 rai 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.

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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 kN et 150 kN => §4.4**
- **Ecartement de voie : e = 1448 mm, 1452mm, 1455mm et 1458mm => §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 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 coefficicent 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.

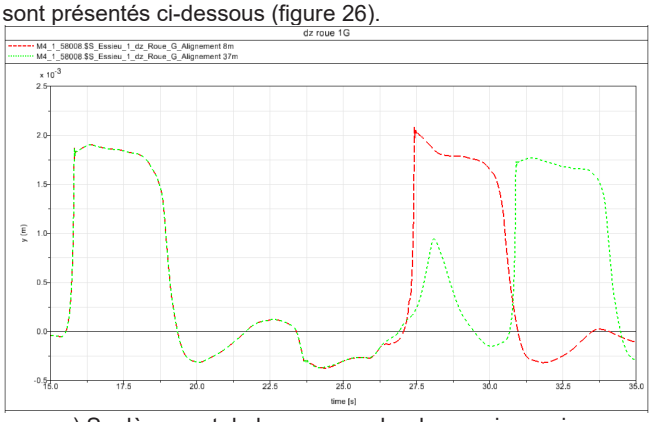
Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

4.3 Influence du tracé

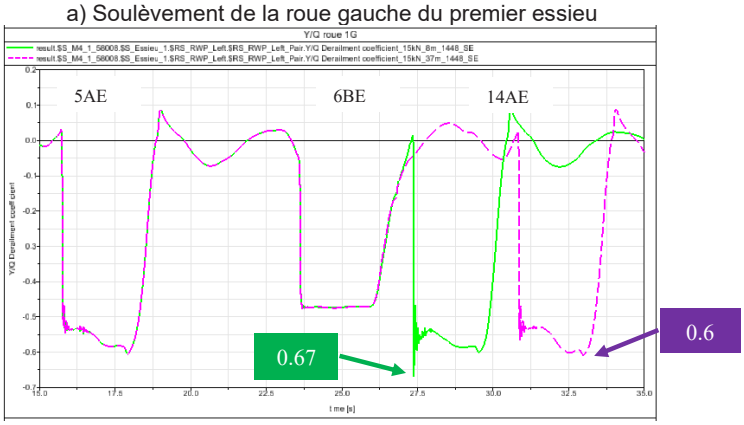
Ce calcul est réalisé en utilisant les paramètres ci-dessous :

- **Alignement 6BE - 14AE : Passage de 37m à 8.1m**
- Effort de freinage : F = 15 kN
- Ecartement de voie : e = 1448 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.

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

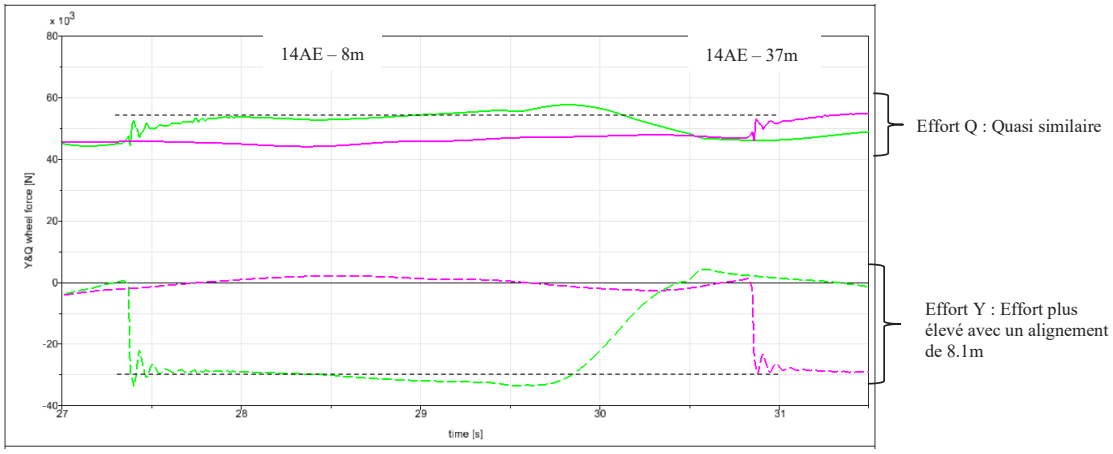


Figure 27 : Influence de l'alignement – Distribution des efforts Y&Q

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.

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

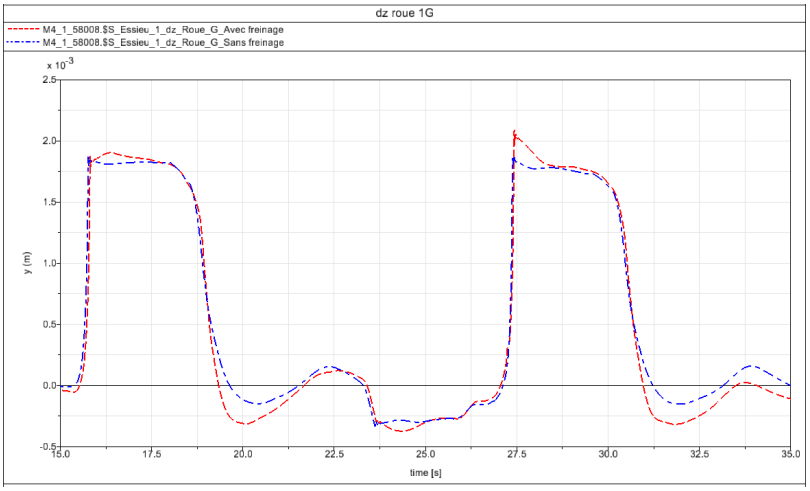
4.4 Influence de l'effort de freinage

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 :

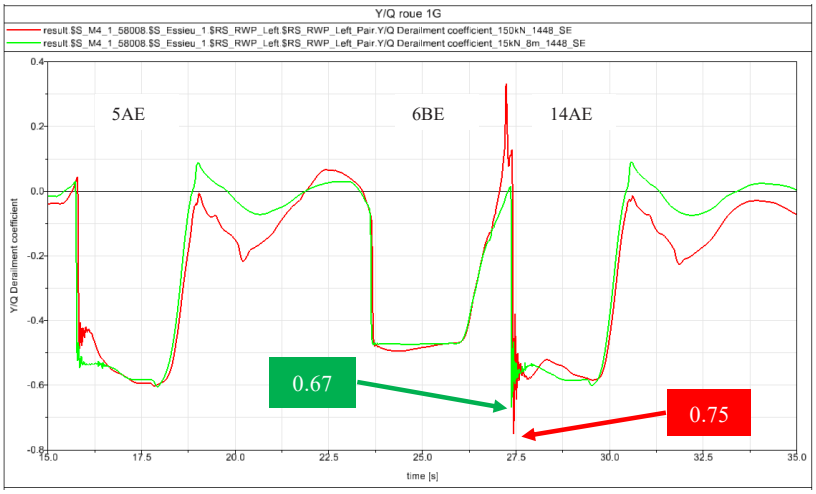
Ce calcul est réalisé en utilisant les paramètres ci-dessous :

- Alignement 6BE - 14AE : 8.1m
- **Effort de freinage : F = 15 kN et 150kN**
- Ecartement de voie : e = 1448 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

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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%.

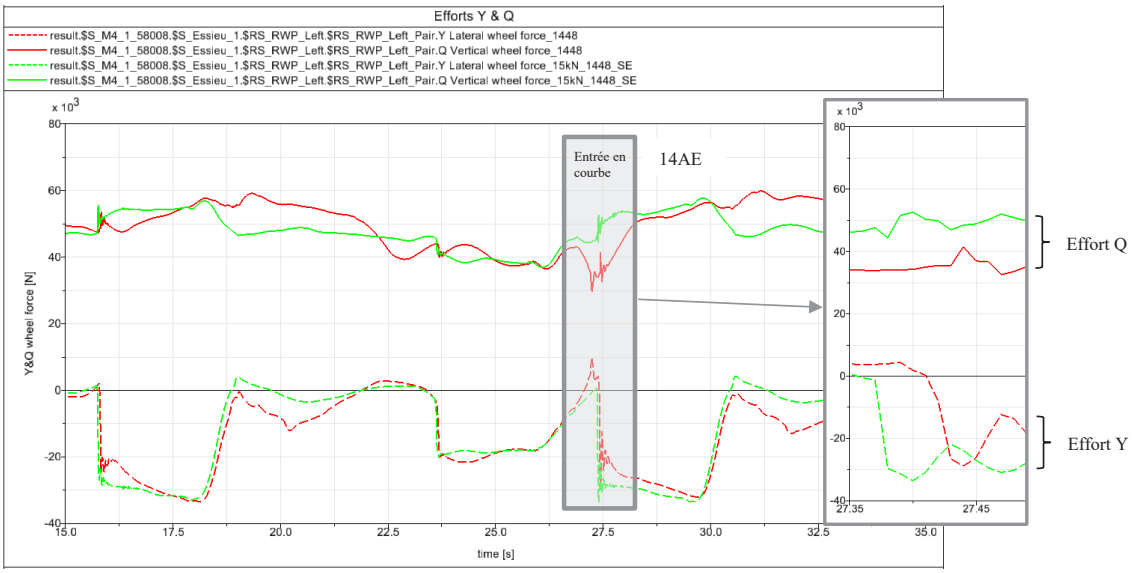


Figure 29 : Distribution des efforts Y&Q

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 déséquilibrage 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.

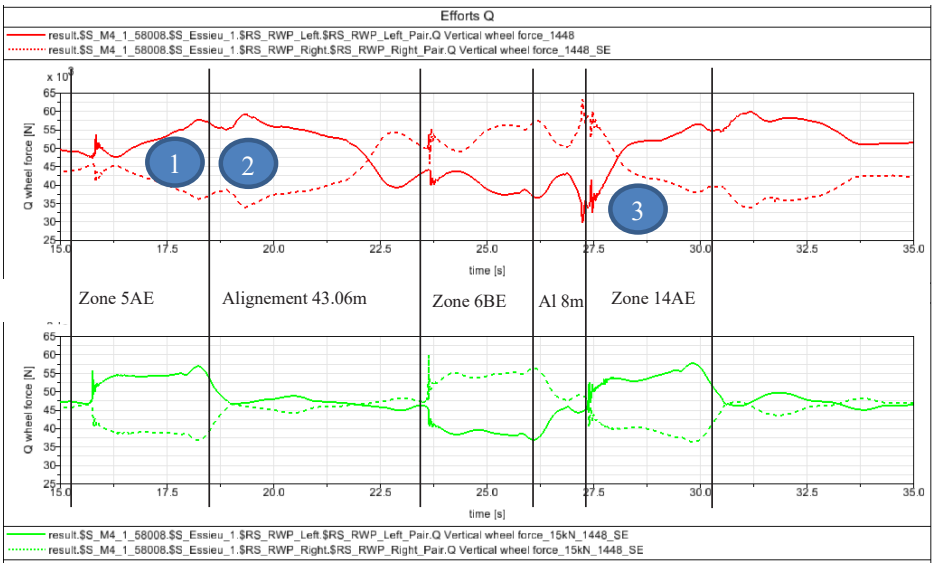


Figure 30 : Distribution des efforts Q – Roue droite et gauche

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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 kN et 150kN**
- **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.

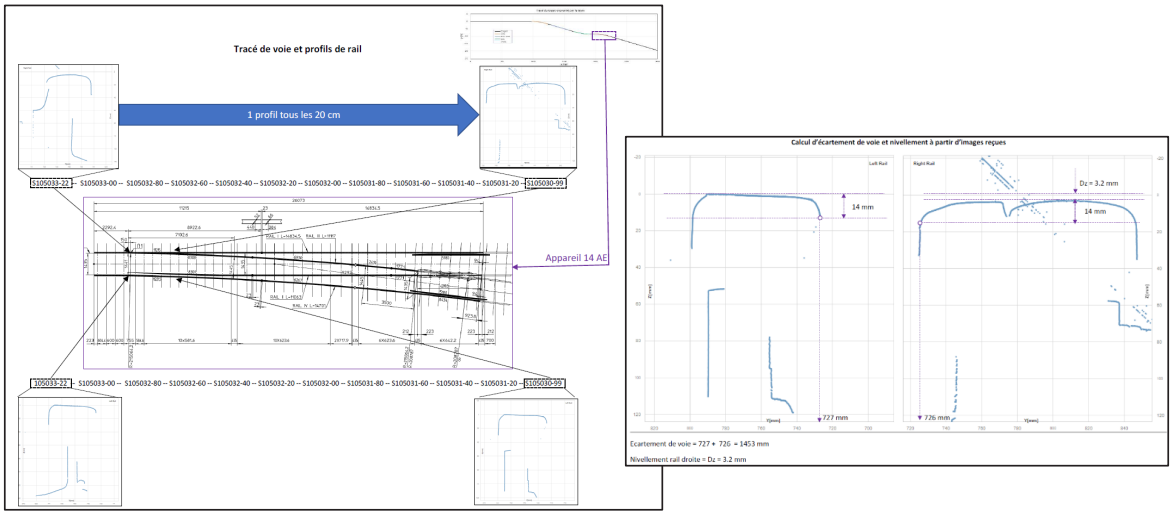


Figure 31 : Tracé de voie et N° des profils de rails sur la zone 14AE

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.

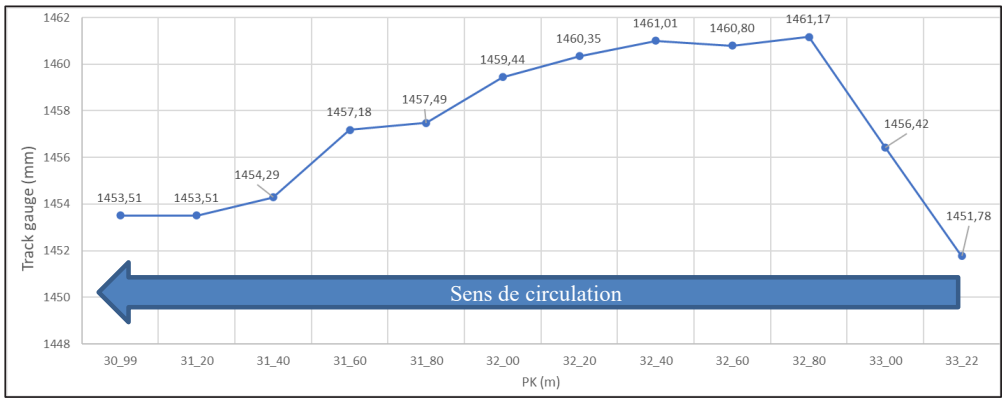


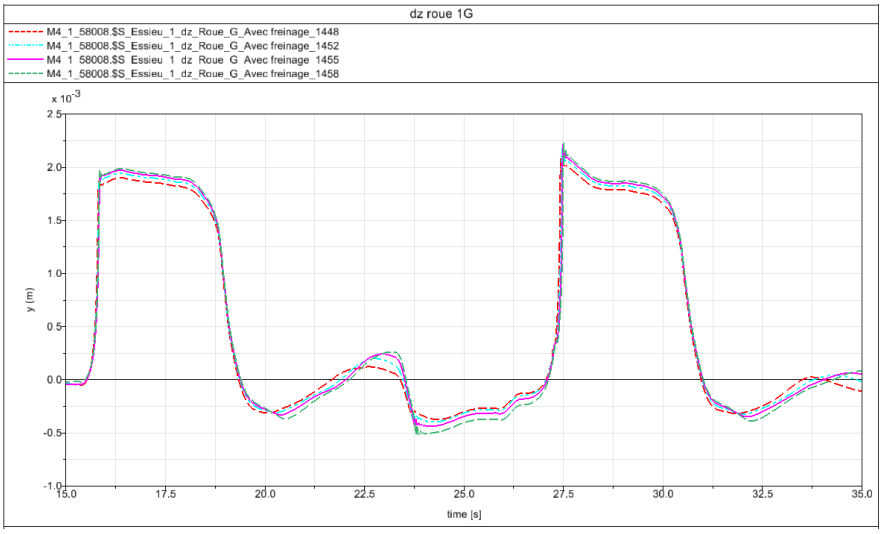
Figure 32 : Ecartement de la voie – Zone 14AE

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

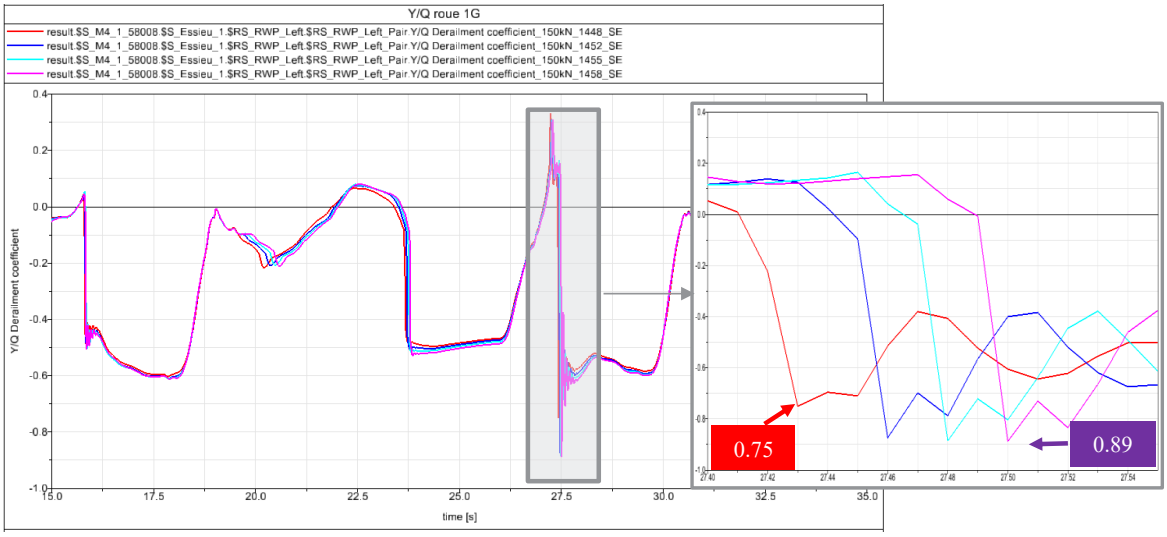
Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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.

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

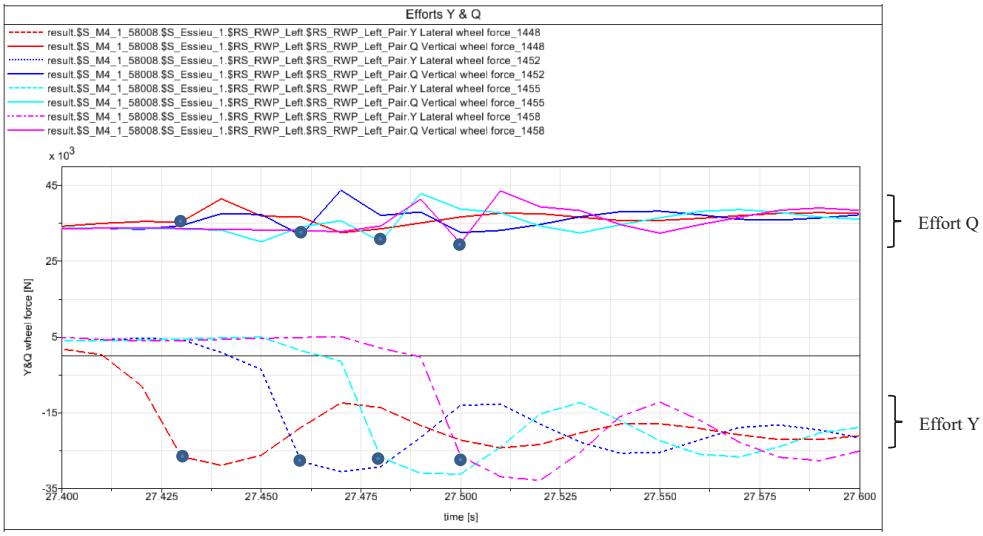


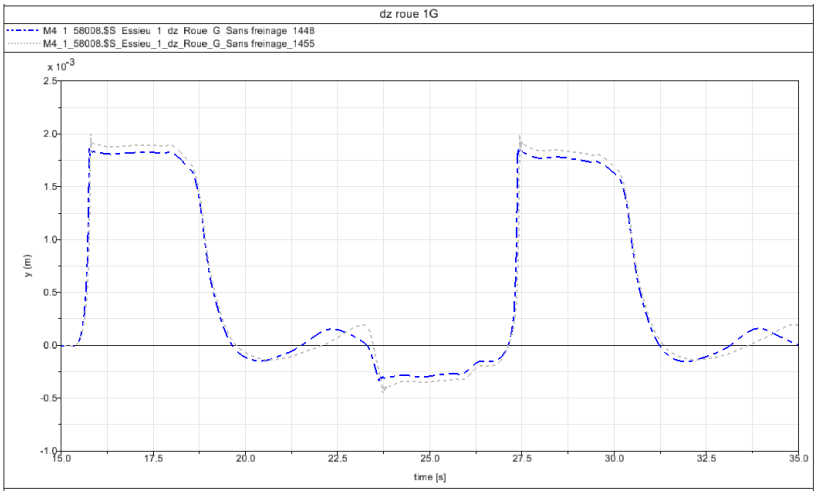
Figure 34 : Distribution des efforts Y&Q

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

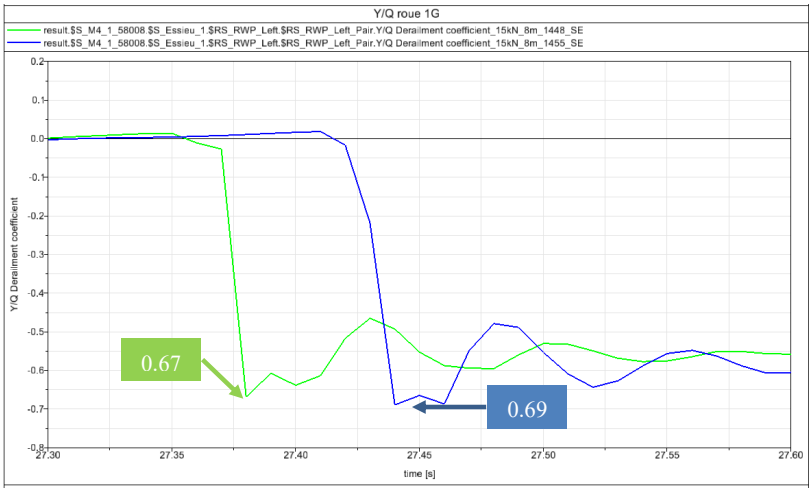
Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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.

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

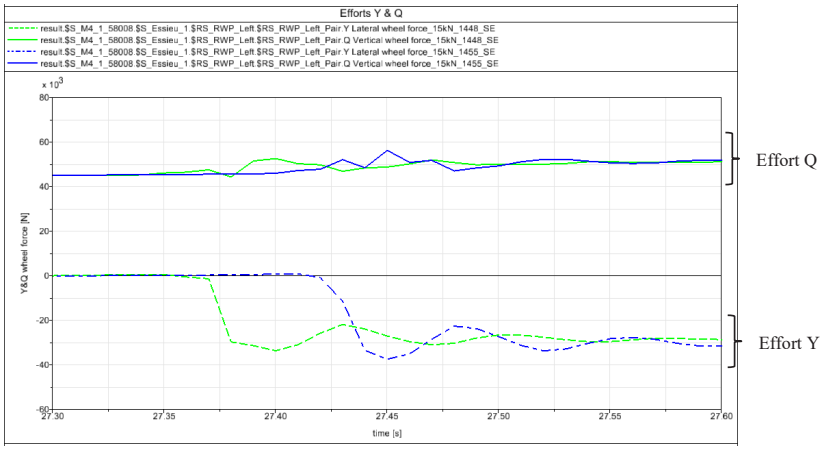


Figure 36 : Distribution des efforts Y&Q

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.

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 kN et 150kN**
- **Ecartement de voie : e = 1452 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.

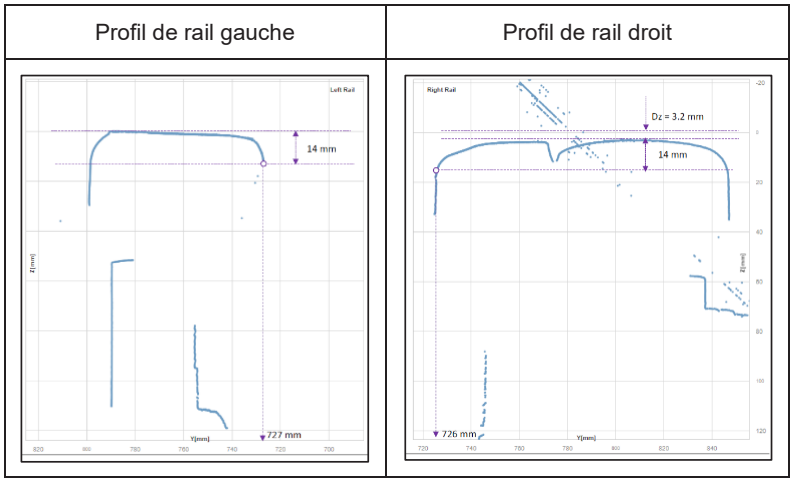


Figure 37 : Image des profils – Position Z

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.

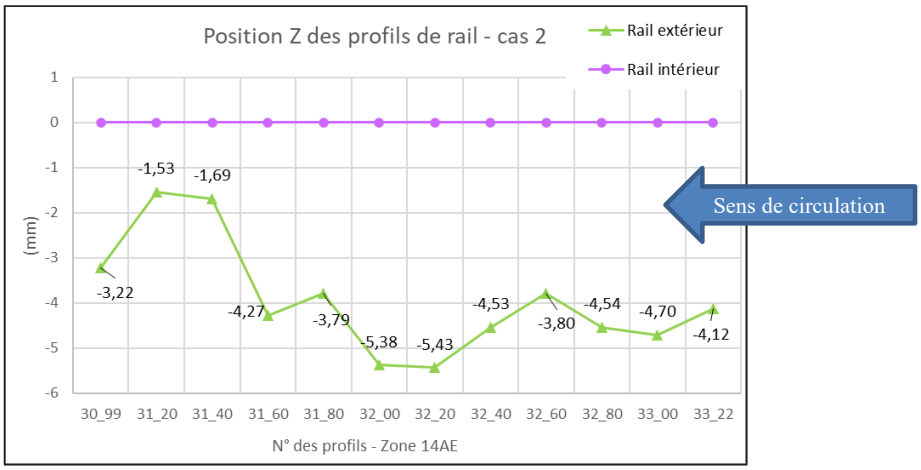


Figure 38 : Position Z de chaque profil

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

**** L'Organisme d'Enquête confirme que les valeurs de nivellement ont été communiquées par Infrabel.***

- 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.

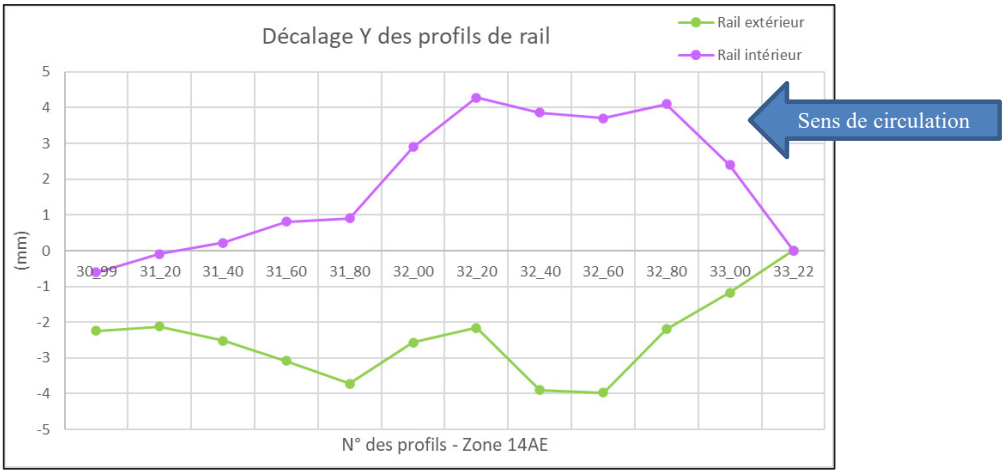


Figure 39 : Position Y de chaque profil

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.

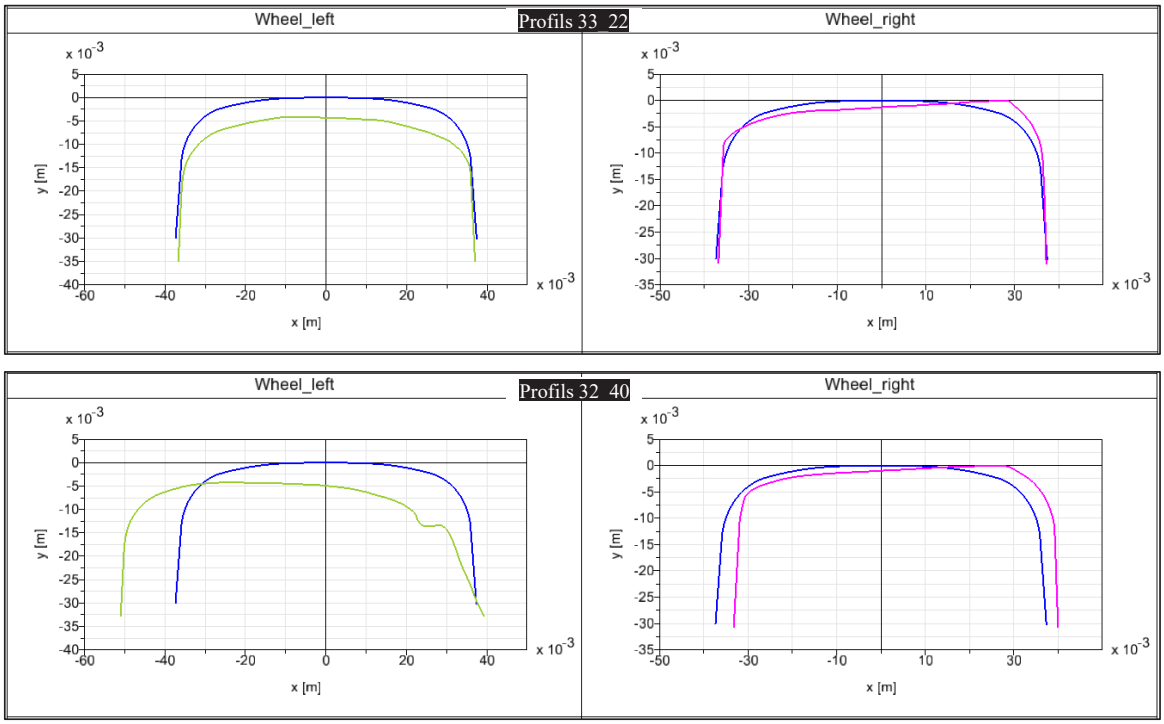


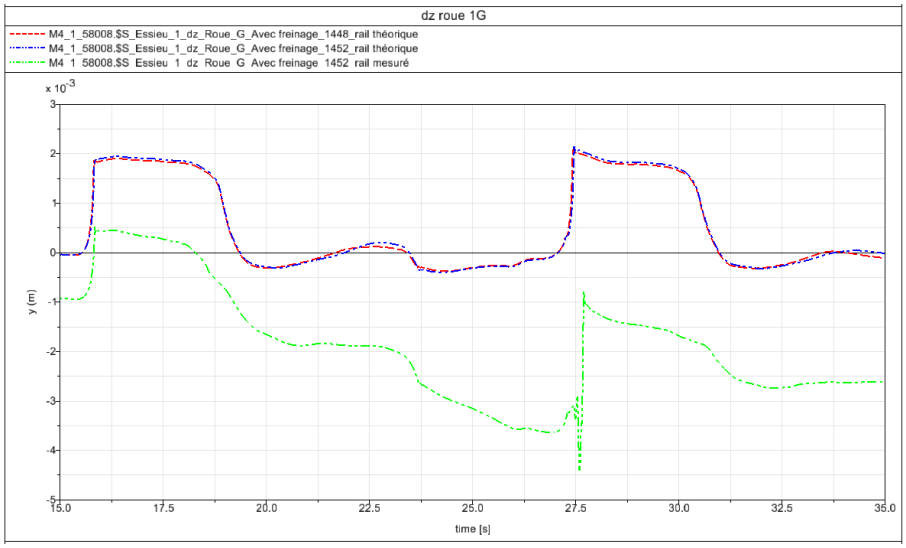
Figure 40 : Position des profils lors de la simulation

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

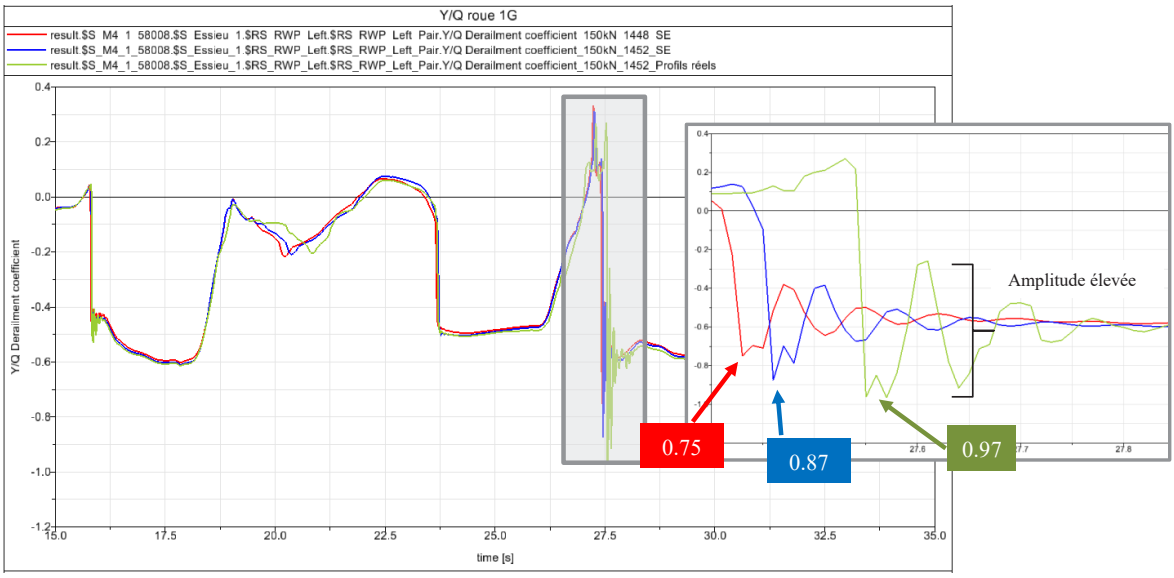
4.6.1 Avec freinage

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

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

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.

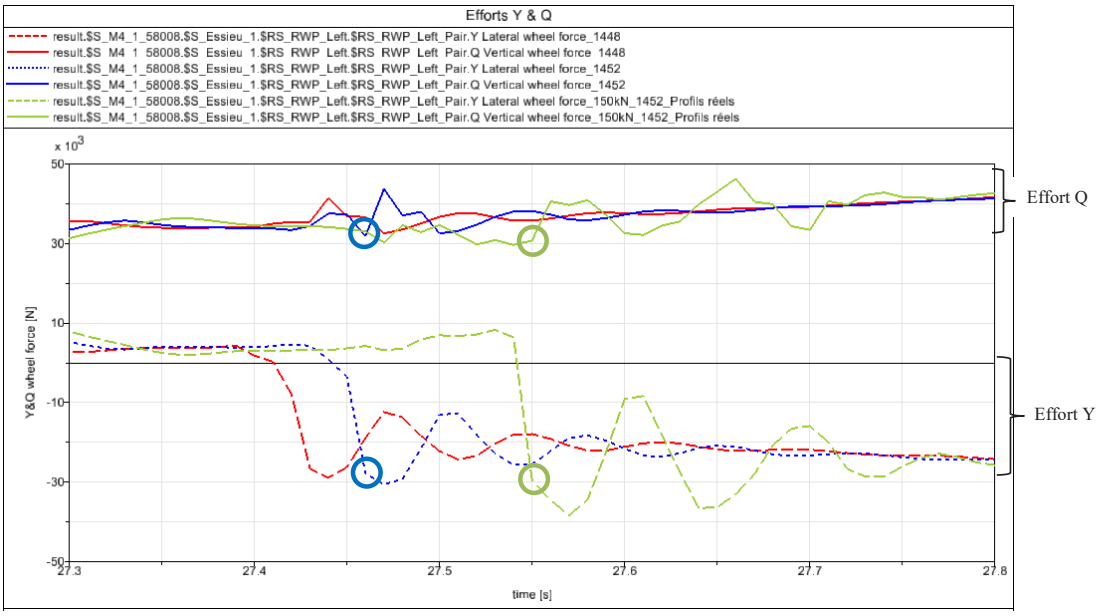


Figure 42 : Distribution des efforts Y&Q

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%.

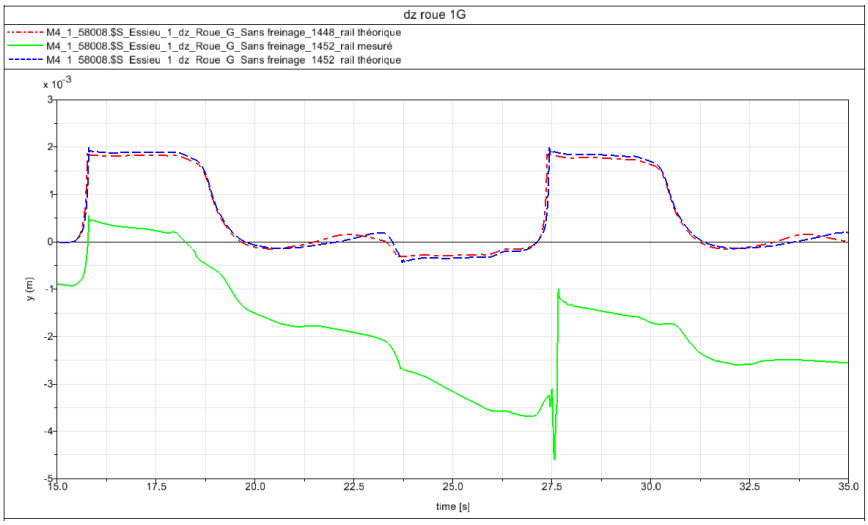
NOTA : Les variations des profils selon Y et Z sont sans impact sur le résultat du ratio des effort Y/Q. Seule la mise en place du profil réel est impactant.

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

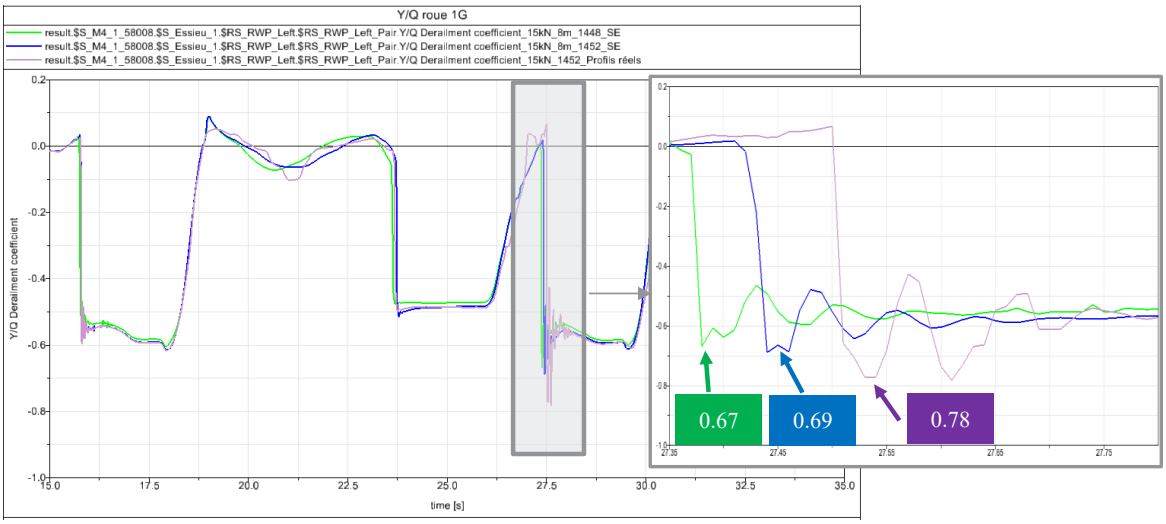
4.6.2 Sans freinage

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%

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

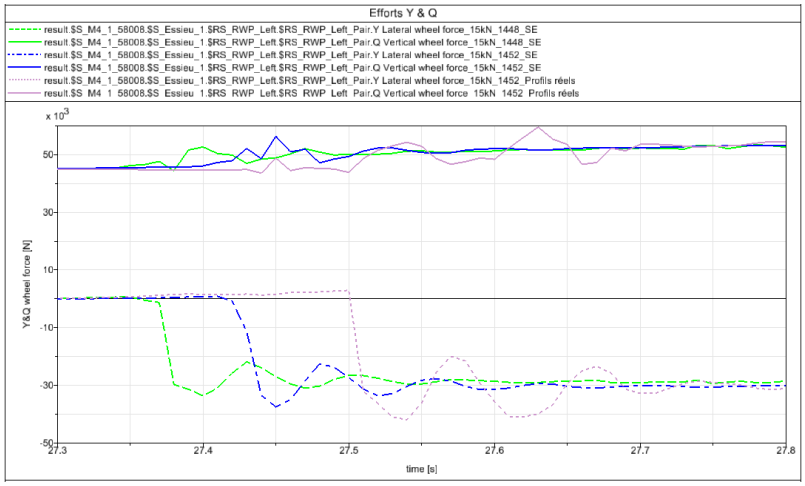


Figure 44 : Distribution des efforts Y&Q

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.

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 :
    - Profils de rail,
    - Défauts de nivellement par file de rail,
    - Défauts de dressage par file de rail,
    - Ecartement de la voie,
    - 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 pontuels 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.

Document propriété de la SNCF - Reproduction interdite

7.3. OPMERKINGEN VAN DE BETROKKEN PARTIJEN

7.3.1. OPMERKINGEN VAN DE NMBS

Opmerkingen over de analyse van Mastéris.

- 1. Punten 3.1 en 4.2: voor de ontsporingscriteria wordt verwezen naar de norm EN14363. Voor een goed begrip van wat volgt, moet worden verduidelijkt dat deze criteria en de grenswaarden daarvan zijn vastgelegd voor welbepaalde situaties (spoorconfiguratie, test, simulatie of berekening, nominale spoorstaaf- en wielprofielen, (merk op dat Figuur 18 van het verslag een versleten spoorstaafprofiel toont), filtratie van de afmetingen en berekening van een gemiddelde, enz.).

  In dit verband vestigen we in het bijzonder de aandacht op de in het verslag van Mastéris vermelde grenswaarde van 0,8 (Y/Q-verhouding), die ons erg restrictief lijkt (de norm staat 1,2 toe) en die momenteel wordt toegepast (de norm past deze op een gemiddelde afstandswaarde van 2 meter toe) (zie ook onze opmerking over Punt 4). Zie bijvoorbeeld norm EN14363, de beoordelingsparagrafen in §6, Tabel 4 en het bijschrift "a" (kleine "a" in superscript) daarvan, Figuur 10, Tabel 5 en de bijlage B.

- 2. Punt 4.2: het optillingscriterium dz wordt helemaal niet meer geëvalueerd in de analyse met het gewijzigde tracé, ofschoon de invloed ervan, los van het Y/Q-criterium, duidelijk in bijvoorbeeld §3.5 en §3.7 van de studie wordt aangetoond.

  Bovendien beschouwt de norm EN14363 de optilling van het wiel (dz) als een prioritair criterium bij de beoordeling van een test op een spoor dat scheluwte vertoont (§6.1.5.1.6 van de norm EN14363).

- 3. Punt 3.5: de wrijvingscoëfficiënt (0,4) die voor deze analyse is gebruikt, is niet die van het referentiegeval (0,5), wat de vergelijking met de andere gevoeligheidsanalyses bemoeilijkt.

- 4. Punt 4: de maximale waarden van Y/Q (van 0,67 en meer) die in de verschillende analyses met gewijzigd tracé worden genoemd, zijn slechts gedurende zeer korte perioden aanwezig (in de orde van een tiende van een seconde). Hoewel ze een "agressiever" dynamisch gedrag suggereren, gaat het om kortstondige dynamische effecten die niets te maken hebben met het Y/Q-criterium gedefinieerd door de norm EN14363. Als wij het goed begrijpen, berust de analyse op de basishypothese volgens dewelke de spoorbreedte over het hele traject 1448 mm bedraagt, een waarde die ontleend is aan de metingen opgetekend na het ongeval bij wissel 14AE.

  Volgens de fiche UIC527 zou de spoorbreedte in een rechte lijn echter 1435 mm moeten bedragen. Een toegenomen spoorbreedte in de zone in een rechte lijn kan een negatieve impact hebben op het zich zijdelings zetten van het draaistel bij het ingaan van een bocht.

- 5. Punt 4.5: De analyse in punt 4.5 bevestigt de negatieve invloed en het belang van een gevoeligheidsanalyse naar aanleiding van de toename van de spoorbreedte in een rechte lijn van 1435 mm naar 1448 mm. Met andere woorden: de echte nominale situatie is niet geanalyseerd.

- 6. Punt 5: houdt de keuze voor een andere formulering ("opmerkelijk", "toename", "belangrijk", "duidelijk", enz..) om de mate van bijdrage van elke parameter aan het ontsporingsrisico te kwalificeren een volgorde van belangrijkheid van elke bijdrage aan dit risico in? Zo ja, wat is deze volgorde? Zo niet, gelieve dit toe te lichten.

7.3.2. OPMERKINGEN VAN INFRABEL

- 1. De wijziging aangebracht in sectie 3.5 van het dossier geeft gevolg aan onze opmerking over sectie 2.4 van perceel 2 V4 30.01.2023.
  We merken op dat deze aanpassing niet bewijst dat de met het verkorte model verkregen resultaten gelijk zijn aan die welke met het volledige model werden verkregen.
- 2. Wat betreft de parameters die van invloed zijn en verband houden met het rollend materieel, merken we op dat de simulaties van Mastéris geen rekening houden met de variatie van specifieke parameters: draaikoppel van het draaistel, stijfheid van de vering in verticale en lengterichting.

Onderzoeksorgaan voor Ongevallen en Incidenten op het Spoor
http://www.oois.be