

Three large, concentric, semi-transparent purple arcs are positioned on the right side of the page, partially overlapping the text area. They are centered around the middle of the page.

**RAPPORT
D'ENQUÊTE TECHNIQUE**
sur le déraillement d'une rame TGV
lors d'une marche d'essai
sur la LGV Est-Européenne
le 14 novembre 2015
à Eckwersheim (67)

Mars 2017

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

Affaire n° BEATT-2015-016

**Rapport d'enquête technique
sur le déraillement d'une rame TGV
lors d'une marche d'essai
sur la LGV Est-Européenne
le 14 novembre 2015 à Eckwersheim (67)**

Bordereau documentaire

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

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

Titre du document : Rapport d'enquête technique sur le déraillement d'une rame TGV lors d'une marche d'essai sur la LGV Est-Européenne le 14 novembre 2015 à Eckwersheim (67)

N° ISRN : EQ-BEAT--17-2--FR

Proposition de mots-clés : déraillement, ligne à grande vitesse, essai, survitesse, homologation

Avertissement

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

Cette enquête a pour seul objet de prévenir de futurs accidents, en déterminant les circonstances et les causes de l'événement analysé et en établissant les recommandations de sécurité utiles. Elle ne vise pas à déterminer des responsabilités.

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

SOMMAIRE

GLOSSAIRE.....	11
RÉSUMÉ.....	13
1 - LES CONSTATS IMMÉDIATS ET L'ENGAGEMENT DE L'ENQUÊTE.....	15
1.1 - L'accident.....	15
1.2 - Les secours et le bilan de l'accident.....	15
1.3 - Les mesures prises après l'accident.....	16
1.3.1 -Les mesures immédiates de protection.....	16
1.3.2 -Les mesures conservatoires.....	17
1.4 - L'engagement et l'organisation de l'enquête.....	17
2 - CONTEXTE DE L'ACCIDENT.....	19
2.1 - La ligne à grande vitesse Est-européenne phase 2.....	19
2.2 - Les caractéristiques de la zone du déraillement.....	20
2.2.1 -La géographie du site ferroviaire.....	20
2.2.2 -Les caractéristiques de l'infrastructure.....	21
2.2.3 -Le polygone de vitesses et les PK des points remarquables.....	21
2.3 - Les circulations d'essais sur le réseau ferré national.....	22
2.3.1 -Les référentiels.....	22
2.3.2 -L'agence d'essai ferroviaire (AEF).....	22
2.3.3 -L'entité d'appui du service traction (EAST).....	23
2.4 - Les essais d'une ligne nouvelle à grande vitesse.....	23
2.4.1 -Les circulations d'essai sur ligne nouvelle.....	23
2.4.2 -Les différentes phases d'essais.....	23
2.4.3 -Les essais dynamiques (montée en vitesse) sur ligne nouvelle.....	24
2.4.4 -L'organisation contractuelle des essais dynamiques de la LGVEE2.....	24
2.4.5 -L'organisation opérationnelle des essais dynamiques de la LGVEE2.....	25
2.5 - Le train d'essai.....	29
2.5.1 -La rame TGV.....	29
2.5.2 -Les systèmes de freinage de la rame.....	29
2.5.3 -Les équipements spéciaux.....	30
2.5.4 -Le programme d'essais du 14 novembre 2015.....	32
2.5.5 -Le train d'essai n° 814521.....	32
3 - LA RECHERCHE DES CAUSES IMMÉDIATES DE L'ACCIDENT.....	33
3.1 - L'examen des données de l'enregistreur de bord.....	33
3.2 - Les enregistrements de la caméra embarquée.....	34
3.3 - Les investigations sur la rame TGV accidentée.....	35
3.3.1 -Les constats sur la rame.....	35

3.3.2 -L'examen des données de maintenance.....	36
3.4 - Les investigations sur l'infrastructure.....	36
3.4.1 -Les constatations sur la voie 2.....	36
3.4.2 -Les constatations sur le pont-rail.....	37
3.4.3 -La vérification des paramètres géométriques de la voie 2.....	37
3.5 - La cause immédiate du déraillement.....	38
3.6 - La cause de l'excès de vitesse.....	39
4 - LA RECHERCHE DES CAUSES DU FREINAGE TARDIF.....	41
4.1 - Les résumés des déclarations et des témoignages.....	41
4.1.1 -Les entretiens avec les personnes présentes dans la cabine de conduite.....	41
4.1.2 -Les résumés des déclarations écrites de l'équipe de conduite.....	46
4.1.3 -Le résumé des déclarations du pilote à l'équipe d'enquête Systra.....	48
4.2 - L'examen complémentaire des enregistrements et des documents de cabine.....	48
4.2.1 -La marche 318-004.....	48
4.2.2 -La marche 318-006.....	50
4.3 - Conclusions concernant la marche 318-006.....	52
5 - LES INVESTIGATIONS SUR LES FACTEURS EXPLICATIFS EN LIEN AVEC LA CONDUITE.....	55
5.1 - Les personnes présentes en cabine de conduite.....	55
5.2 - Les référentiels de conduite d'un train d'essais.....	56
5.2.1 -Les référentiels nationaux.....	56
5.2.2 -Les référentiels propres à la campagne d'essais LGVEE2.....	56
5.2.3 -Les missions de l'équipe de conduite et du pilote.....	57
5.2.4 -La répartition des tâches en cabine.....	57
5.3 - Retour sur la marche 315-006 du 11 novembre 2015.....	58
5.3.1 -Les vitesses cibles.....	59
5.3.2 -Les vitesses enregistrées.....	59
5.3.3 -L'enregistrement des conversations en cabine.....	60
5.3.4 -Les enseignements.....	60
6 - LES INVESTIGATIONS SUR LES CAUSES ORIGINES DE L'ÉVÉNEMENT.....	63
6.1 - Le processus d'autorisation de mise en exploitation commerciale de la LGVEE2.....	63
6.1.1 -Les principes régissant les évolutions du système ferroviaire.....	63
6.1.2 -Le processus d'autorisation.....	63
6.1.3 -Les spécifications pour les essais dynamiques d'une LGV.....	64
6.1.4 -Les ambiguïtés des référentiels d'essais.....	65
6.1.5 -L'application du « principe GAME » aux essais dynamiques.....	66
6.2 - L'externalisation des essais dynamiques.....	67
6.2.1 -L'organisation opérationnelle :.....	67
6.2.2 -La maîtrise dans la conception des marches et leur réalisation.....	68
6.2.3 -Le relationnel entre l'intégrateur Systra et l'EAST.....	68

6.3 - Le planning de la campagne d'essais dynamiques.....	69
6.4 - Les personnes présentes à bord.....	69
7 - LES MESURES DE SÉCURITÉ POUR LA REPRISE DES ESSAIS.....	71
7.1 - Les mesures prises pour la reprise des essais sur LGVEE2.....	71
7.2 - Les mesures annoncées pour les campagnes ultérieures.....	71
8 - LE DÉROULEMENT DE L'ÉVÉNEMENT.....	73
8.1 - Remarque préalable.....	73
8.2 - Déroulement de l'événement.....	73
9 - ANALYSE DES CAUSES ET ORIENTATIONS PRÉVENTIVES.....	77
9.1 - Les causes de l'événement.....	77
9.1.1 -Les causes directes.....	77
9.1.2 -Les causes origines.....	78
9.2 - Les orientations préventives.....	78
9.2.1 -Le référentiel d'homologation des LGV.....	78
9.2.2 -Les analyses préliminaires de risque.....	80
9.2.3 -La qualification des membres des équipes de conduite d'essais.....	80
9.2.4 -Les outils et les méthodes des équipes de conduite d'essais.....	81
9.2.5 -L'organisation des campagnes d'essais.....	81
9.2.6 -Les enregistrements des conversations des opérateurs de sécurité.....	82
9.2.7 -La mise en œuvre de « boucles de rattrapage ».....	83
10 - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	85
10.1 - Les conclusions.....	85
10.2 - Les recommandations.....	85
ANNEXES.....	87
Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête.....	89
Annexe 2 : Fiches de poste.....	91
Annexe 3 : Listing de l'enregistrement ATESS.....	99
Annexe 4 : Historique de maintenance de la rame.....	101
Annexe 5 : Enregistrement Mauzin.....	103
Annexe 6 : Évaluation de la vitesse de renversement.....	105
Annexe 7 : Simulation du comportement dynamique.....	107
Annexe 8 : Mesures prises par la SNCF.....	125
Annexe 9 : Recommandation du rapport « Réflexions sur la sécurité de l'organisation des essais ferroviaires à grande vitesse ».....	129

Glossaire

- **AEF** : Agence d'Essai Ferroviaire
- **AJE** : Avis Journalier d'Essais
- **AHE** : Avis Hebdomadaire d'Essais
- **AMEC** : Autorisation de Mise en Exploitation Commerciale
- **CIM** : Centre d'Ingénierie du Matériel
- **COVIT** : COntôle de VITesse
- **CTT** : Cadre (Transport) Traction
- **DBC** : Détecteur de Boîtes Chaudes
- **EAST** : Entité d'Appui du Service Traction
- **EPSF** : Etablissement Public de Sécurité Ferroviaire
- **EOQA** : Expert ou Organisme Qualifié Agréé
- **ERTMS** : European Railway Traffic Management System
- **GAME** : Globalement Au Moins Equivalent
- **GSM-R** : Global System for Mobile communications - Railways
- **LGV** : Ligne à Grande Vitesse
- **LGVEE** : Ligne à Grande Vitesse Est-Européenne
- **LGVEE2** : Ligne à Grande Vitesse Est-Européenne 2^e phase
- **MSC** : Méthode de Sécurité Commune
- **MPF** : Manipulateur de Freinage
- **MPTF** : Manipulateur Traction-Freinage
- **PACE** : Procédures Autorisant les Circulations d'Essai
- **PK** : Point Kilométrique
- **RFF** : Réseau Ferré de France
- **RFN** : Réseau Ferré National
- **SNCF Mobilités** : Entreprise ferroviaire du groupe SNCF
- **SNCF Réseau** : Gestionnaire d'Infrastructure du réseau ferré national
- **Systra** : société d'ingénierie ferroviaire
- **TVM** : Transmission Voie-Machine

Résumé

Le samedi 14 novembre 2015 à 15h04, lors d'un essai à grande vitesse s'effectuant dans le cadre de la procédure d'homologation de la deuxième partie de la Ligne Est-Européenne, la rame d'essai, circulant sur la voie 2 en direction de Strasbourg, déraile peu avant le pont sur le canal de la Marne au Rhin, à l'entrée de la courbe de raccordement de la ligne nouvelle avec la ligne classique Paris-Strasbourg sur la commune d'Eckwersheim.

La rame se disloque ; la motrice de tête et les huit remorques se répandent sur le terrain situé en contrebas de la voie et s'immobilisent après avoir franchi le canal sur leur élan ; la motrice de queue tombe dans le canal.

Sur les 53 personnes qui se trouvaient à bord de la rame, le bilan des victimes est de 11 morts et de 21 blessés graves.

La rame TGV est entièrement détruite et le pont-rail fortement endommagé.

La cause directe de l'accident est la vitesse de 255 km/h dans une courbe serrée de 945 m de rayon.

Cet excès de vitesse est dû à un freinage inapproprié par rapport à la vitesse initiale du train pour aborder la zone où la vitesse maximale prescrite n'est plus que de 176 km/h, et qui commence juste avant la courbe en question.

Ce freinage inapproprié est lui-même le produit de trois chaînes causales :

- une stratégie de freinage inadaptée, résultant d'un raisonnement erroné et prévoyant un freinage pneumatique au PK 402 pour respecter le seuil de 176 km/h au PK 403,809 ;
- une incompréhension entre le cadre transport traction (CTT) et le reste de l'équipage sur les modalités du freinage se traduisant par le relâchement du frein électrique par le conducteur et le maintien de la vitesse de 330 km/h jusqu'au déclenchement du freinage pneumatique ;
- un appel interphonique pendant le freinage qui a perturbé le CTT et l'a empêché de voir que le frein électrique avait été relâché contrairement à la stratégie qu'il avait prévue.

L'analyse des causes a conduit le BEA-TT à formuler six recommandations portant sur :

- le référentiel d'homologation des lignes à grande vitesse ;
- les analyses préliminaires de risques ;
- la qualification des équipes de conduite d'essai ;
- les outils et les méthodes des équipes de conduite d'essai ;
- l'organisation des campagnes d'essais ;
- les enregistrements en cabine de conduite.

Il formule également une invitation spécifique portant sur la mise en œuvre de « boucles de rattrapage ».

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

1.1 - L'accident

Le samedi 14 novembre 2015 à 15h04, lors d'un essai à grande vitesse s'effectuant dans le cadre de la procédure d'homologation de la deuxième partie de la Ligne Est-Européenne, la rame d'essai, circulant sur la voie 2 en direction de Strasbourg, déraile peu avant le pont sur le canal de la Marne au Rhin, à l'entrée de la courbe de raccordement de la ligne nouvelle avec la ligne classique Paris-Strasbourg sur la commune d'Eckwersheim.

La rame se disloque ; la motrice de tête et les huit remorques se répandent sur le terrain situé en contrebas de la voie et s'immobilisent après avoir franchi le canal sur leur élan ; la motrice de queue tombe dans le canal.



Figure 1 : Vue générale du site de l'accident

1.2 - Les secours et le bilan de l'accident

Les secours sont appelés dès 15 h 05 par différentes personnes se trouvant sur la rame avec leur téléphone portable puis par le centre opérationnel de gestion des circulations de Strasbourg.

Les premiers véhicules partent à 15 h 09 et 15 h 10 respectivement des centres de secours de Vendenheim et de Brumath et sont sur place à 15 h 17.

Le plan NOVI (Nombreuses Victimes) est déclenché à 15 h 26.

La motrice arrière étant immergée dans le canal et deux remorques étant sur la berge, des plongeurs et des équipes cynophiles sont intervenus pour compléter les moyens de recherche des victimes.

Des barrages anti-pollution sont mis en place pour contenir les fluides déversés par la motrice immergée.

Au total, près de 300 sapeurs pompiers provenant de 35 centres de secours interviennent et les opérations prennent fin officiellement le lundi 16 novembre à 18h00.



Figure 2 : Vues de la motrice arrière dans le canal et du bogie arrière de la motrice de tête encastré dans la poutre latérale du pont-rail

Sur les 53 personnes qui se trouvaient à bord de la rame, le bilan des victimes est de 11 morts et de 21 blessés graves.

La rame TGV est entièrement détruite et le pont-rail fortement endommagé.

1.3 - Les mesures prises après l'accident

1.3.1 - Les mesures immédiates de protection

Sur la ligne en essais

Le deuxième tronçon de la LGV Est-Européenne n'étant pas encore en exploitation, la circulation des trains d'essai et des trains de travaux y est gérée par un agent de la société Systra appelé « Opérateur LGVEE2* » et situé au poste de Pagny-sur-Moselle. Alerté du déraillement par le chef de projet Systra qui se trouvait à bord, il appelle les secours et contacte les postes SNCF de Vendenheim et de Pagny.

Sur le réseau ferré national

L'agent circulation de Vendenheim qui commande le raccordement entre la ligne nouvelle et la ligne classique Paris-Strasbourg prend les mesures pour arrêter les trains sur son secteur et demande la coupure d'urgence au régulateur sous-station. Il avise les gares encadrantes afin que les mesures soient prises pour retenir les trains se dirigeant vers son secteur.

* Terme figurant dans le glossaire.

1.3.2 - Les mesures conservatoires

Dès réception des premiers éléments de son enquête interne, la SNCF décide :

- de geler les marches d'essai à grande vitesse jusqu'à ce que les premiers enseignements des enquêtes aient pu être pris en compte dans les processus d'essais ;
- d'interdire la présence à bord des rames d'essais de personnes n'appartenant pas aux équipes concernées ;
- de renforcer le processus d'autorisation d'accès à bord, en cabine et en rame.

Ces décisions sont publiées le 19 novembre 2015.

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

Au vu des circonstances et du contexte de cet accident et bien que la ligne concernée ne soit pas en exploitation commerciale, le directeur du bureau d'enquêtes sur les accidents de transport terrestre (BEA-TT) a ouvert le 16 novembre 2015 une enquête technique en application des articles L 1621-1 à L 1622-2 du code des transports (voir annexe n° 1).

Les enquêteurs ont eu accès aux enquêtes internes diligentées par les entreprises concernées ainsi qu'à l'enquête initiale effectuée par la section de recherches de la gendarmerie de Strasbourg.

Ils se sont rendus sur place, en lien avec les experts désignés par les juges du pôle accidents collectifs du TGI de Paris.

Dès la reprise des essais sur la ligne nouvelle, ils ont assisté dans la voiture d'expériences puis dans la cabine de conduite à deux marches à grande vitesse.

Ils ont auditionné les personnes en charge de la maîtrise d'ouvrage du projet LGVEE2, de l'organisation et de la réalisation des essais ainsi que toutes les personnes présentes en cabine de conduite lors de l'accident.

Le BEA-TT a publié une note d'étape le 5 février 2016 en vue d'informer le public de l'avancement de l'enquête technique et pour annoncer au plus tôt aux entités concernées les premières orientations préventives.

2 - Contexte de l'accident

2.1 - La ligne à grande vitesse Est-européenne phase 2

La ligne à grande vitesse Est-européenne (LGVEE) s'étend sur 406 km de Vaires-sur-Marne (77) situé à 20 km à l'est de Paris jusqu'à Vendenheim (67) où elle se raccorde sur la ligne classique à 12 km au nord de Strasbourg.

La LGVEE est la première ligne française permettant la vitesse commerciale de 320 km/h sur la totalité de son parcours.

La ligne est équipée du système de signalisation en cabine TVM* 430 comme toutes les LGV françaises depuis 1995 et, en outre, du système européen ERTMS* de niveau 2.

Avec son équipement radio de type GSM-R*, la LGVEE est ainsi la première ligne à grande vitesse interoperable.

Elle est entièrement gérée depuis le poste de commande à distance (PCD) de Pagny-sur-Moselle.



Elle a été réalisée en deux phases :

- la première phase (LGVEE1) de 300 km, de Vaires-sur-Marne à Baudrecourt (57), qui a été mise en service le 10 juin 2007 ;
- la deuxième phase (LGVEE2) de 106 km, de Baudrecourt à Vendenheim, qui devait être mise en service le 3 avril 2016.

Depuis octobre 2015, la LGVEE2 était dans sa phase finale de tests, appelée « essais de montée en vitesse ».

L'accident du 14 novembre 2015 a conduit au report de sa mise en service au 3 juillet 2016.

À la date de l'accident, le tronçon correspondant à la deuxième phase n'appartenait donc pas encore au réseau ferré national et était soumis à des règles de sécurité et de circulation spécifiques relevant du plan général de coordination sécurité du projet (voir 2.4.1).

* Terme figurant dans le glossaire.



Figure 4 : Tracé de la LGVEE2

2.2 - Les caractéristiques de la zone du déraillement

2.2.1 - La géographie du site ferroviaire

L'accident a eu lieu à la sortie de la LGV. À cet endroit, la voie 1 et la voie 2 se séparent et la vitesse maximale autorisée passe du niveau « grande vitesse » au niveau « conventionnel » de 160 km/h pour aborder la courbe de raccordement avec la ligne classique et pour permettre ensuite aux TGV de s'inscrire dans le trafic de cette ligne.

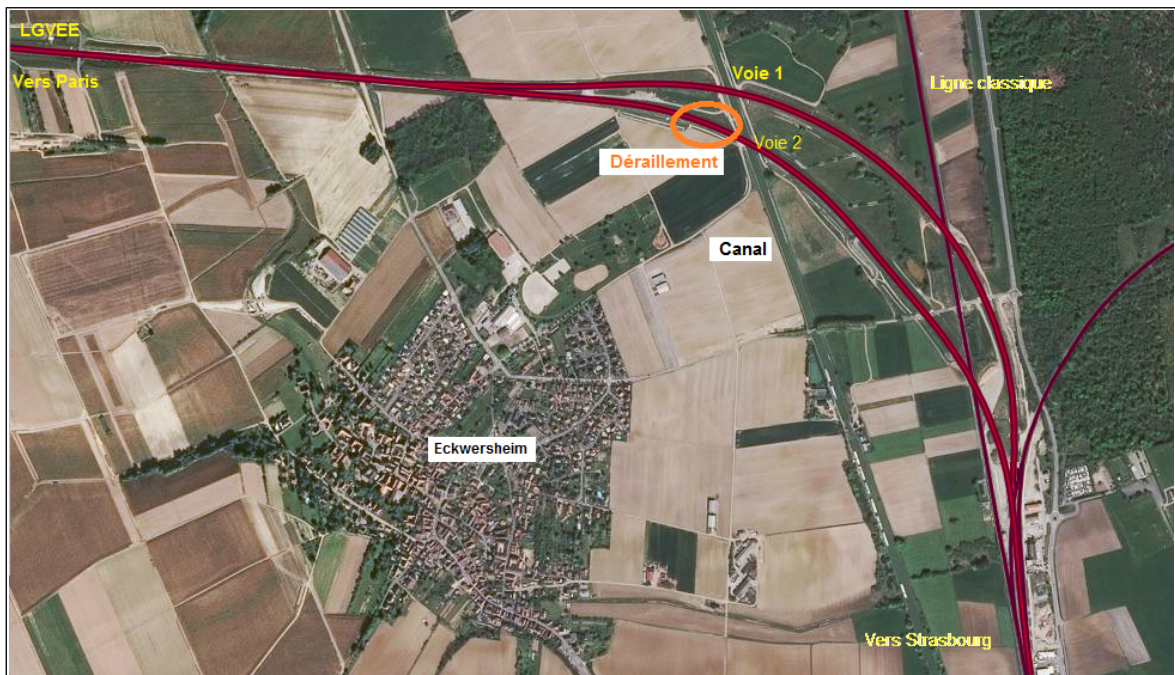


Figure 5 : Configuration géographique du site

2.2.2 - Les caractéristiques de l'infrastructure

La voie est de type classique similaire à celle des autres LGV récentes du réseau ferré national avec des longs rails soudés de 60 kg/m sur des traverses en béton monobloc posées sur du ballast et une sous-couche de grave-bitume.

Elle repose sur un remblai dont la hauteur atteint environ 6 m au niveau du pont sur le canal.

Elle est équipée de rails de sécurité qui s'étendent sur 50 m environ de part et d'autre du pont.



Figure 6 : La voie 2 avec ses rails de sécurité aux abords du pont sur le canal

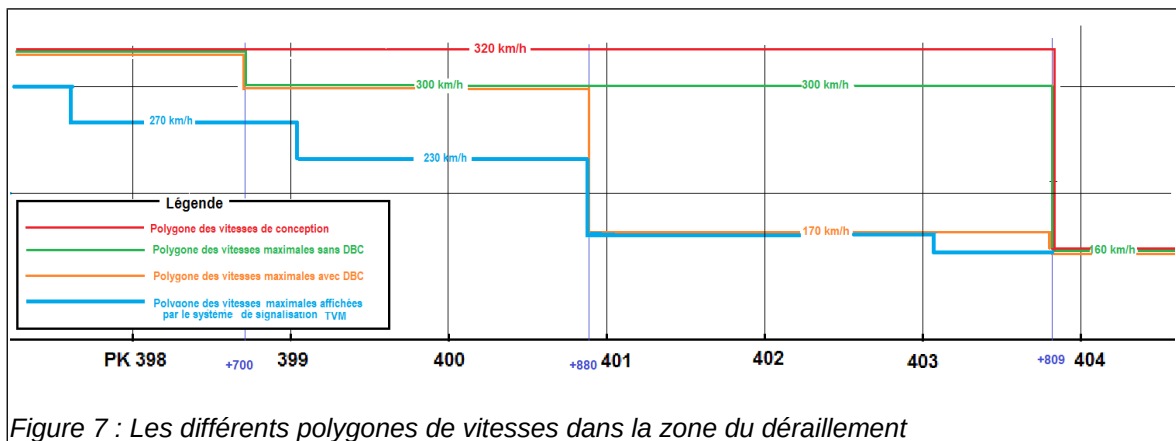
2.2.3 - Le polygone de vitesses et les PK des points remarquables

Sur la voie 2, dans le sens vers Strasbourg (sens impair), dans la zone concernée par l'accident, on peut distinguer 4 polygones de vitesses :

- le polygone de vitesses de conception de l'infrastructure qui correspond aux caractéristiques techniques de celle-ci (en rouge sur la figure ci-après) ;
- un premier polygone de vitesses maximales d'exploitation qui comporte une zone VL 300 liée à la présence d'une forte pente (en vert) ;
- un deuxième polygone de vitesses maximales d'exploitation qui comporte en plus une zone à VL 170 liée à la présence d'un détecteur de boîtes chaudes (DBC) en amont (en orange) ;
- le polygone des vitesses maximales du système de signalisation TVM (en bleu).

Les PK des points de transition de vitesse sont les suivants :

- la transition de V320 à V300 PK 398,770
- la transition de V300 à V170 PK 400,880
- la transition à V160 PK 403,809



En outre, les points remarquables sont les suivants :

- le début du raccordement parabolique de la courbe PK 403,809
- le début de la pleine courbe PK 403,954
- l'entrée du pont PK 404,226

2.3 - Les circulations d'essais sur le réseau ferré national

2.3.1 - Les référentiels

La circulation des trains d'essais sur le RFN est régie par le document RFN-CG-MR03H-01-n°001¹ établi par SNCF Réseau* qui s'impose à tout exploitant ferroviaire en application de l'article 10 du décret 2006-1279 « relatif à la sécurité des circulations ferroviaires ».

Ce document explicite en particulier les exigences concernant l'organisme demandeur des essais afin que les circulations puissent s'effectuer en sécurité et que les résultats des essais puissent être utilisés dans le cadre d'un processus d'autorisation de mise en exploitation.

Il définit les missions respectives du chef d'essai et de l'équipe de conduite et énonce les dispositions de principe concernant le matériel roulant et les installations.

Il décrit le processus aboutissant à l'autorisation de circulation du train d'essai délivrée par l'EPSF* et l'attribution des sillons par le gestionnaire d'infrastructure.

Enfin, il donne les règles concernant la réalisation des circulations concernées et l'établissement du retour d'expérience.

2.3.2 - L'agence d'essai ferroviaire (AEF)

L'AEF est l'organisme d'essais ferroviaires de SNCF Mobilités*.

Elle conçoit prépare et réalise notamment les essais en ligne pour le compte de la SNCF mais aussi pour des demandeurs extérieurs par l'intermédiaire du GIE Eurailtest².

Dans ce cadre, elle a mis en place un système d'habilitation pour les chefs d'essais, au sens de l'OP 0518, mais aussi pour les ingénieurs d'essais et spécialistes chargés de la

¹ Ce document est également connu sous la référence OP 0518 interne à SNCF Mobilités.

² Eurailtest est un groupement d'intérêt économique (GIE) créé en 1999 par la SNCF et la RATP pour commercialiser des prestations d'essais ferroviaires.

* Terme figurant dans le glossaire

mise en œuvre des chaînes de mesure et de l'exploitation des résultats.

Dans le cadre des campagnes d'essais dont elle assure la maîtrise d'œuvre, l'AEF fait appel, pour la conduite des trains d'essais, à l'EAST avec laquelle elle a mis en place une convention et une consigne opérationnelle commune (EAST TT 01500) incluant un dispositif de veille, de retour d'expérience et d'amélioration.

2.3.3 - L'entité d'appui du service traction (EAST)

L'EAST est une entité opérationnelle rattachée à la direction de la Traction de SNCF Mobilités. Elle assure, entre autres tâches, la conduite de trains spéciaux et des trains d'essais pour l'AEF mais aussi, le cas échéant, pour d'autres opérateurs d'essais.

L'organisation de l'entité est régie par le document d'application EAST RA 0001 « Organisation de l'entité d'appui du service Traction ».

Elle compte environ 60 conducteurs dont 30 conducteurs de TGV et 12 cadres Traction (CTT) qui assurent la formation et le suivi des conducteurs ainsi que les fonctions de CTT d'essais sur les circulations où cette fonction est requise.

Les conducteurs et les cadres sont volontaires ; ils sont sélectionnés dans les établissements Traction de la SNCF pour leur qualité professionnelle et leur motivation.

Bien que rattachés administrativement à leur établissement d'origine, leur management effectif (formation continue, certification, contrôle, suivi, gestion...) est assurée par l'EAST suivant les mêmes règles qu'en établissement.

Les missions du CTT en tant que dirigeant de proximité (DPX) mais aussi en tant que CTT d'essais sont régies par la préconisation EAST RA 0005 « Missions du CTT DPX au sein de l'EAST ».

Certains postes de l'EAST font l'objet d'une autorisation de fonction spécifique mais cela n'est pas le cas pour le poste de conducteur d'essais, la formation et l'évaluation de l'aptitude à cette fonction étant du ressort du CTT DPX de l'agent.

2.4 - Les essais d'une ligne nouvelle à grande vitesse

2.4.1 - Les circulations d'essai sur ligne nouvelle

Contrairement aux circulations d'essai sur les lignes en service du RFN, les circulations sur une ligne nouvelle ne sont pas régies par le document OP 0518 et ne sont pas soumises à une autorisation extérieure.

La sécurité de ces circulations relève du plan général de coordination sécurité du projet et repose sur les plans de management de la qualité et de la sécurité du maître de l'ouvrage et du maître d'œuvre des essais. Elle s'appuie sur un ensemble de procédures internes issues de l'expérience des projets précédents et d'une analyse préliminaire des risques.

2.4.2 - Les différentes phases d'essais

Le processus d'essais de la LGV-E2 défini dans le plan de management du projet comporte quatre phases :

- phase 1 : réception en usine des matériels et constituants ;
- phase 2 : essais statiques des différents sous-systèmes techniques ;

- phase 3 : essais d'intégration des sous-systèmes entre eux ;
- phase 4 : essais dynamiques (montée en vitesse).

Les circulations d'essais commencent à partir de la phase 3 et c'est dans la phase 4 qu'a eu lieu l'accident.

2.4.3 - Les essais dynamiques (montée en vitesse) sur ligne nouvelle

Ces essais visent à démontrer que la ligne permettra une circulation en sécurité des trains.

Pour ce faire, on fait circuler, sur l'ensemble de la ligne, une rame d'un type homologué, à des vitesses croissantes d'abord jusqu'à la vitesse maximale de la ligne, puis « en survitesse » à la vitesse maximale +10 %.

Au cours de toutes ces marches, on vérifie à l'aide d'instruments de mesures installés sur la rame et au sol que les accélérations verticales et horizontales subies par le matériel roulant, que le comportement de la voie et que la qualité du captage sont conformes aux spécifications du projet et aux normes nationales et internationales.

Ainsi, pour la voie courante où la vitesse maximale d'exploitation sera de 320 km/h, les paliers de vitesse en pleine voie sont : 160, 200, 240, 270, 300, 320, 340, 352³km/h.

Dans les raccordements où cette vitesse sera de 160 km/h, les paliers sont de 160 et 176 km/h.

2.4.4 - L'organisation contractuelle des essais dynamiques de la LGV E2

Pour la première phase de la LGV E2, et pour la LGV Rhin-Rhône, les essais dynamiques avaient été externalisés par le maître d'ouvrage RFF*, puis SNCF Réseau, à la société d'ingénierie Inexia⁴.

Pour la seconde phase, c'est la société Systra⁵, qui a fusionné avec Inexia en 2012, qui a obtenu ce contrat.

Systra a pris à son compte l'organisation et le pilotage des essais ainsi que l'exploitation ferroviaire sur la ligne nouvelle. Dans les documents du marché, la fonction de Systra est désignée par le terme d'*intégrateur*.

Systra a sous-traité certaines prestations et notamment les mesures et la conduite de la rame à Eurailtest.

Eurailtest a elle-même contracté avec SNCF Mobilités pour la réalisation des prestations de mesures et de conduite.

Ce montage contractuel aboutit à une organisation où l'agence d'essai ferroviaire (AEF) et l'entité d'appui du service traction (EAST) sont en situation de prestataires pour, respectivement, la réalisation des mesures et la conduite des trains dans le cadre d'une campagne d'essais organisée et dirigée par Systra.

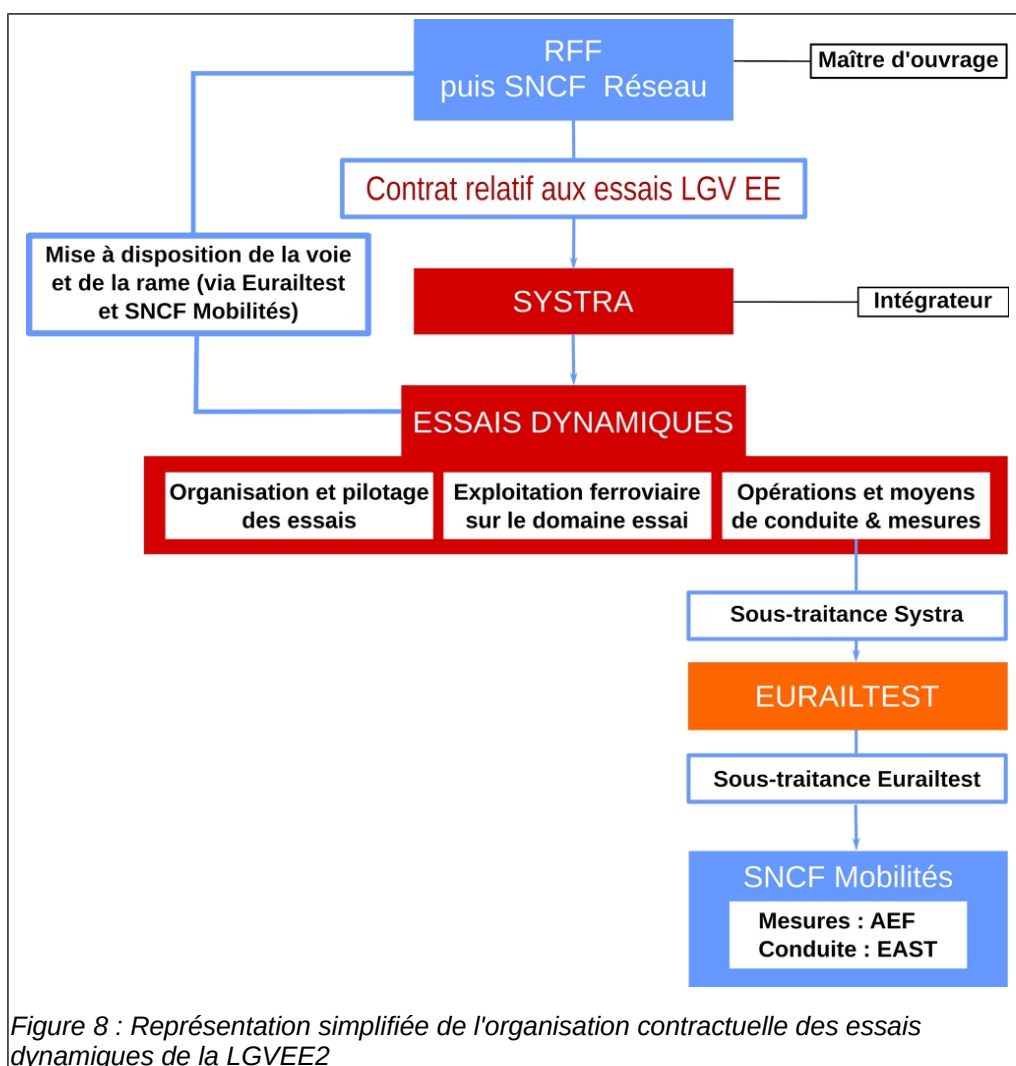
Une représentation simplifiée de cette organisation est donnée dans le schéma ci-après.

³ Porté à 360 km/h pour des raisons techniques voir plus avant.

⁴ Inexia est une société d'ingénierie ferroviaire filiale de la SNCF.

⁵ Systra est une société d'ingénierie ferroviaire filiale commune de la SNCF et de la RATP.

* Terme figurant dans le glossaire.



2.4.5 - L'organisation opérationnelle des essais dynamiques de la LGV EE

Les marches d'essais de la LGV EE comportent des parties sur les voies du RFN et hors RFN.

Pour assurer la sécurité des circulations et du personnel et la bonne réalisation des essais spécifiés, la circulation des trains d'essais fait l'objet d'une organisation spécifique et de procédures particulières en application des principes évoqués plus haut au chapitre 2.3 et au paragraphe 2.4.1.

C'est le document Systra « Procédures autorisant les circulations d'essais » (PACE) qui explicite l'organisation mise en place.

L'équipement en personnel des trains d'essai

Pour la campagne d'essais dynamiques de la LGV EE, un train d'essai comporte obligatoirement les personnels suivants dont les missions sont précisées dans les PACE⁶.

Dans la voiture laboratoire

- le chef d'essai appartenant à Systra⁷ qui est le responsable technique des essais et le responsable de la sécurité des personnes à bord du train ;

⁶ Les fiches de poste du chef d'essai, du pilote et de l'équipe de conduite sont données en annexe 2.

⁷ Par défaut, dans la suite du rapport, le terme « chef d'essai » fait référence à cet acteur.

- le chef d'essai RFN habilité selon le référentiel OP 0518 ⁸ et appartenant à l'AEF ;
- l'équipe technique avec les ingénieurs et techniciens de l'AEF exploitant les différentes chaînes de mesures ;
- les experts voie, caténaires et signalisation de Systra et de SNCF Réseau.

Dans la cabine de conduite avant

- le conducteur titulaire, le second conducteur⁹ et le cadre traction appartenant tous trois à l'EAST* ;
- le pilote Systra.

Dans la cabine arrière

- un technicien voie de SNCF Réseau.

Dans la rame

- le chef de bord Systra, responsable des entrées et sorties des personnes et de la gestion de leurs déplacements dans la rame.

En outre, des représentants du maître d'ouvrage, des techniciens avec des missions particulières peuvent être présents sur la rame, de même que des encadrants des différents services impliqués et des personnes invitées. L'accès de toutes ces personnes suppose une autorisation préalable délivrée selon une procédure définie dans les PACE.

Les documents opérationnels

Les PACE définissent le contenu et la diffusion des documents qui contiennent tous les renseignements utiles à la préparation et à la réalisation des essais, notamment :

- l'avis hebdomadaire d'essais (AHE) élaboré en semaine S-1 par la maîtrise d'œuvre des essais et adressé aux différents services concernés pour prévoir les moyens nécessaires aux essais de la semaine S ;
- l'avis journalier d'essais (AJE) produit chaque soir par la maîtrise d'œuvre des essais. Cet avis précise le détail des circulations de la journée du lendemain. Il inclut la liste nominative des participants sur la rame et au sol et la liste des éventuels invités. C'est un document au format A3, qui inclut également la « **feuille de marche** » de chaque circulation du lendemain.

La feuille de marche comporte un schéma de la ligne sur lequel apparaît la voie de circulation du train. Elle indique les heures de début et de fin de la marche, les heures d'entrée et de sortie du domaine d'essai et la vitesse maximale. Elle n'indique pas les différents paliers de vitesses à respecter, notamment à la sortie de la LGV et sur les points singuliers.

8 OP 0518 Circulation des trains d'essai sur le réseau ferré national.

9 La présence du 2^e conducteur pour les marches en survitesse n'est pas prévue par les PACE mais par le référentiel EAST RA 0005.

* Terme figurant dans le glossaire

Marche N°318 - 004 / Voie 2 à 340 km/h (uniquement sur Ligne Nouvelle)
de la marche : 203 kms
cumulée : 27047 kms

Date : Samedi 14 Novembre 2015

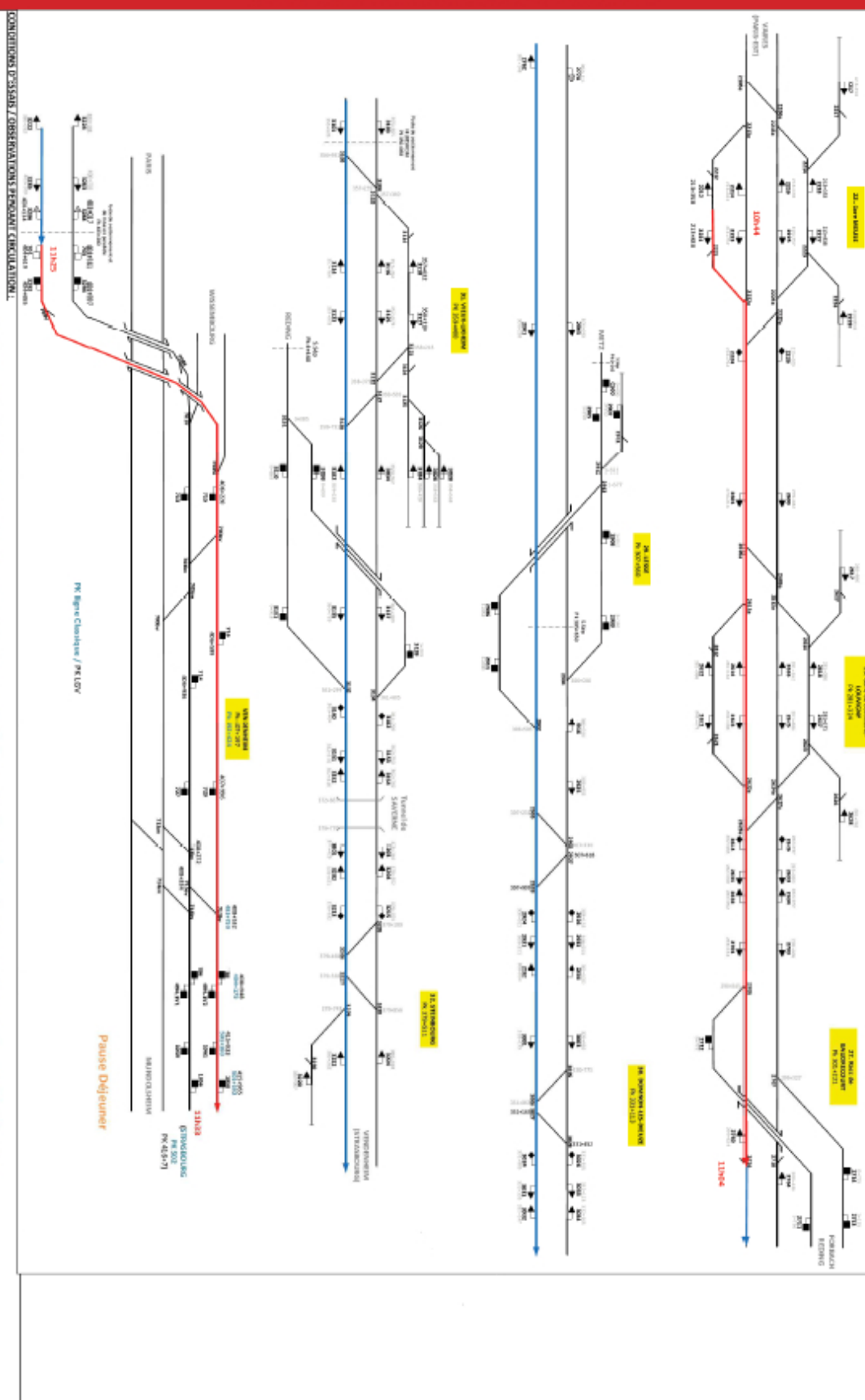


Figure 9 : Exemple de feuille de marche

La « **fiche de vitesse du pilote traction** » appelée aussi « **fiche de vitesse** » remplie manuellement par le chef d'essai avant chaque marche, en fonction des demandes des experts présents dans la voiture laboratoire, indique le détail des vitesses prescrites et les PK correspondants.

Fiche de Vitesses du Pilote Traction

Chef d'essai

Nom : _____ Date et heure : 11/11/2015

Marche n° : 315-005 (STRASBOURG VILLE → MEUSE TGV)

Vitesses de circulation maximales sur la marche d'essai			
Du PK STRASBOURG BV	au PK 408+272 POINTE AIG 7136	Vitesse	VLIGNE
Du PK 408+272 POINTE AIG 7136	au PK 405+815 POINTE AIG 701	Vitesse	100
Du PK 405+815 POINTE AIG 701	au PK 404+561 C703 à niveau	Vitesse	160
Du PK 404+561 C703 à niveau	au PK 403+740 LEVEZ PANTO	Vitesse	170
Du PK 403+740 LEVEZ PANTO	au PK 400+000	Vitesse	200
Du PK 400+000	au PK 398+770	Vitesse	330
Du PK 398+770	au PK 272+570 REP 2564	Vitesse	340
Du PK 272+570 REP 2564	au PK 213+838-REP 2117 MEUSE TGV	Vitesse	VLIGNE
Du PK	au PK	Vitesse	
Du PK	au PK	Vitesse	

Figure 10 : Exemple de fiche de vitesse

La fiche de vitesse est remise par le chef d'essai au pilote Systra (voir article 2.4.5) qui la transmet au cadre traction (CTT) responsable de l'équipe de conduite. Ce dernier en déduit, en concertation avec son équipe, les modalités de conduite et notamment les stratégies de freinage c'est-à-dire les points de freinage, le type de frein à utiliser, la puissance de freinage à appliquer et la vitesse à atteindre.

Cette stratégie de conduite est transcrite, à sa façon, par le conducteur titulaire sur la feuille de marche qu'il dispose sur le pupitre de conduite.

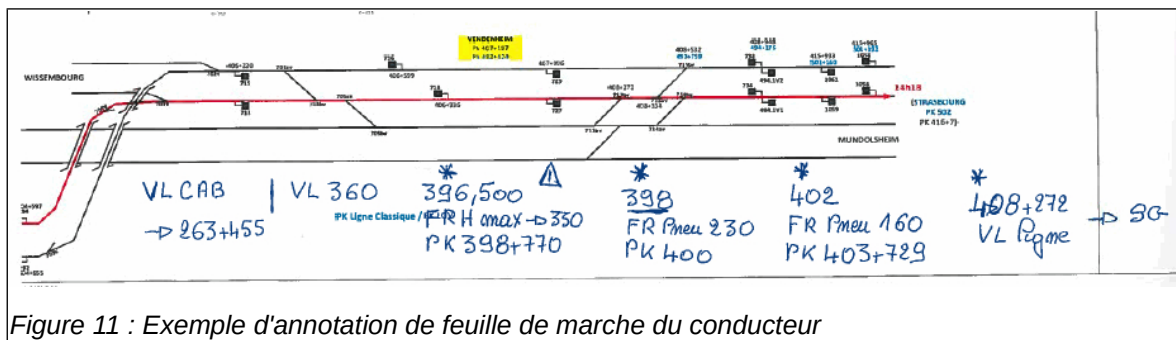


Figure 11 : Exemple d'annotation de feuille de marche du conducteur

2.5 - Le train d'essai

2.5.1 - La rame TGV



Figure 12 : La rame d'essai

Il s'agit de la rame n° 744 de la série des TGV DAsyE (Duplex Asynchrone Ertms) aptes à la vitesse commerciale de 320 km/h et interopérables.

Comme toutes les rames de ce type, elle est composée de deux motrices M1 et M2 encadrant 8 remorques numérotées R1 à R8.

Elle est orientée avec la motrice M2 côté Strasbourg ; la motrice M1 et la remorque R1 étant côté Paris.

2.5.2 - Les systèmes de freinage de la rame

Comme toutes les rames TGV, la rame d'essai est équipée d'un système de freinage électrique et d'un système de freinage pneumatique.

Le frein électrique seul est commandé par le manipulateur Traction-Freinage (MPTF). Il procure une décélération maximale d'environ 0,4 m/s².

Le frein pneumatique est automatiquement combiné avec le frein électrique et est commandé par le manipulateur de frein (MPF). La décélération maximale appelée freinage maximal de service varie entre 1,1 et 1,6 m/s² selon la vitesse du train.

Comme tous les freins pneumatiques, son action n'est pas immédiate. Les temps de serrage et de desserrage sont respectivement de 3 et 5 secondes.

Le MPTF et le MPF lorsqu'ils sont tirés à fond permettent d'obtenir le freinage d'urgence tout comme le bouton poussoir d'urgence (BPURG). La décélération en freinage d'urgence est la même qu'en freinage maximal de service.

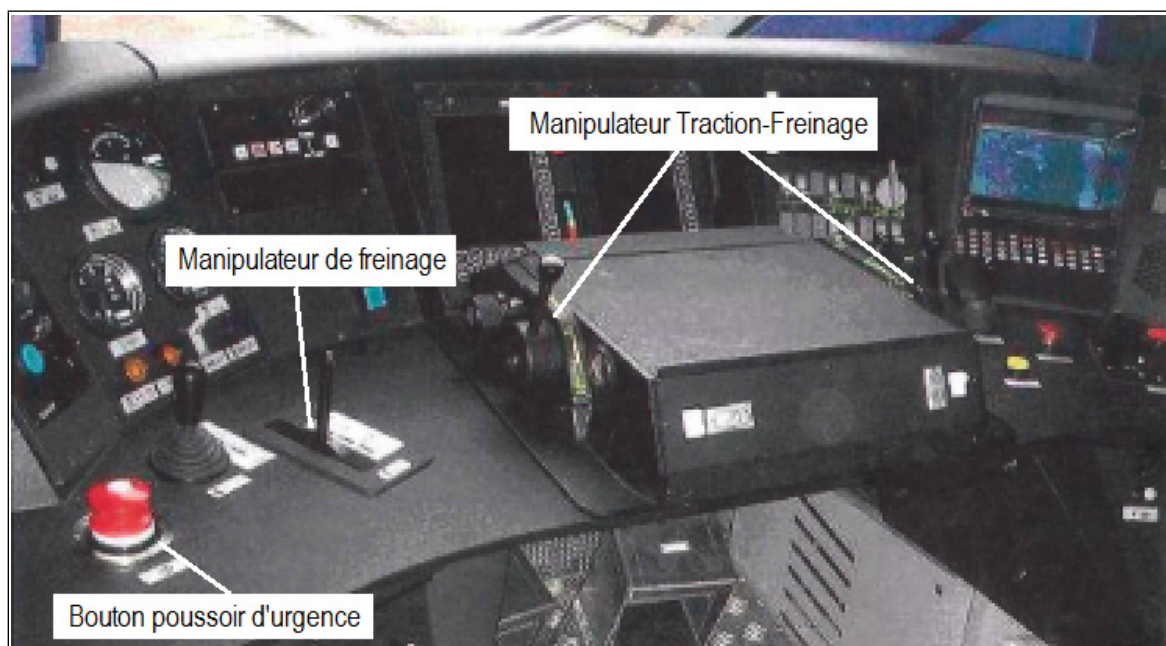


Figure 13 : Les différentes commandes des freins

2.5.3 - Les équipements spéciaux

La rame a été spécialement équipée pour réaliser les essais de montée en vitesse de la LGVEE2.

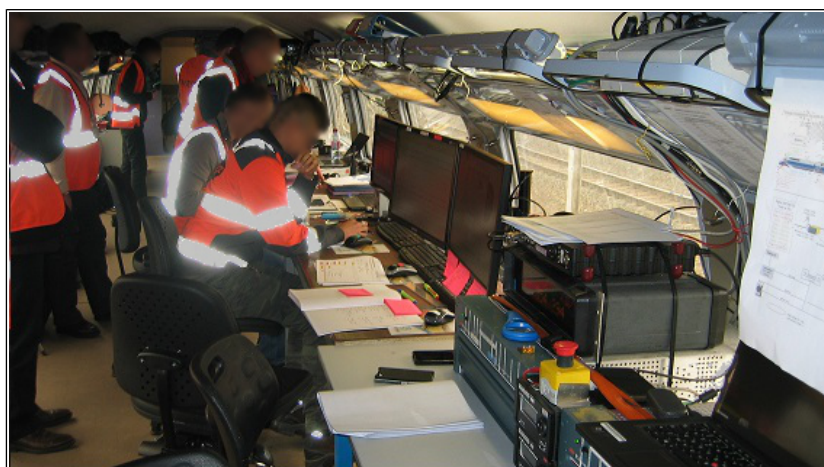


Figure 14 : Intérieur de la voiture laboratoire

La remorque R1 a été transformée en « voiture laboratoire ». Une partie des sièges a été déposée et remplacée par les équipements de mesure et d'enregistrement des données et par les postes de travail des ingénieurs et techniciens d'essais. C'est également dans cette voiture que se trouve le poste du chef d'essai.

La rame est équipée de divers capteurs et de caméras permettant notamment de mesurer et de surveiller différents paramètres de dynamique ferroviaire et de captage. En cas de dépassement du seuil de sécurité d'un paramètre, les experts ou le chef d'essai peuvent déclencher une alerte sonore en cabine et ainsi faire ralentir immédiatement la rame par le conducteur.

Elle dispose d'un système de tachymétrie et d'odométrie (vitesse et PK) spécifique avec affichage dans chaque cabine et dans la voiture labo

Enfin, elle est équipée d'un système de communication interphonique entre les deux cabines de conduite et la voiture laboratoire.

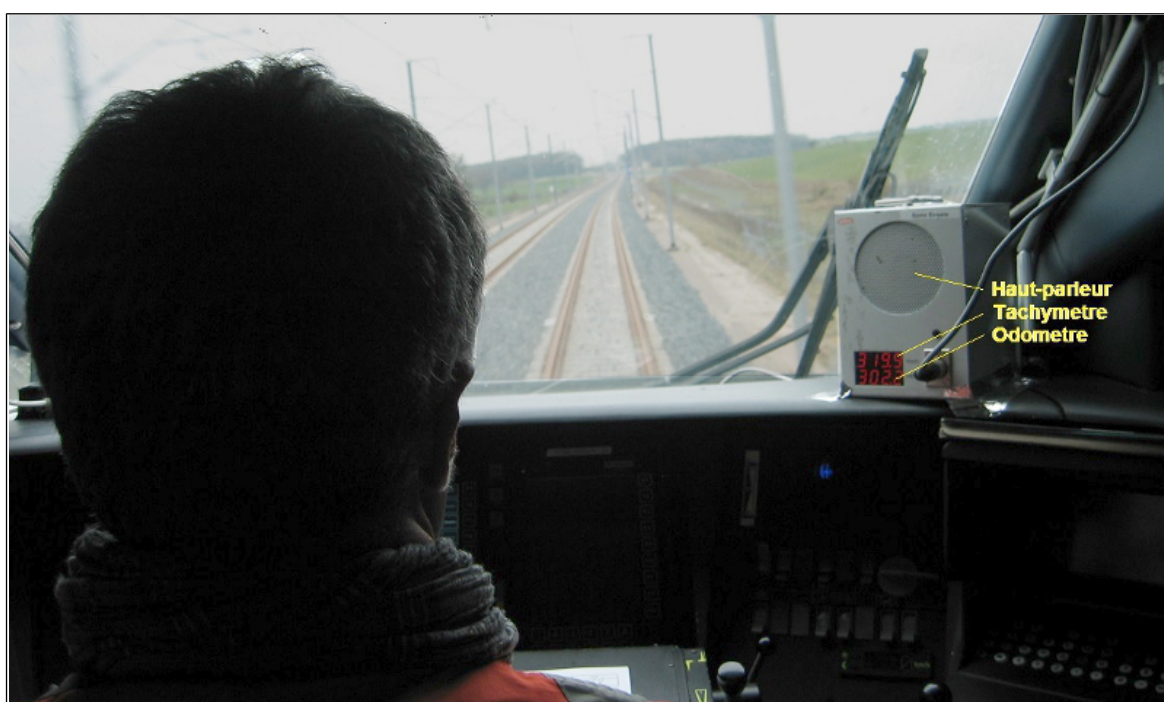


Figure 15 : Vue du boîtier d'interphonie avec visualisateurs

Ces modifications sont sans conséquence sur la sécurité. Notamment, elles ne sont de nature à modifier ni les performances, ni le comportement dynamique, ni les capacités de freinage de la rame.

De même, ses équipements de sécurité sont ceux d'une rame TGV de série mais, pour les essais de survitesse, le système de contrôle de vitesse (COVIT) est inhibé car celui-ci ne permet pas de dépasser la vitesse normalement autorisée de plus de 15 km/h.

2.5.4 - Le programme d'essais du 14 novembre 2015

Le programme journalier d'essais du 14 novembre 2015 prévoyait 7 marches.

Référence	Horaire	Départ	Arrivée	Vitesse max	Type
318-001	06h12 / 07h59	Paris	Lorraine	V.ligne	Acheminement
318-002	08h22 / 09h28	Lorraine	Strasbourg	160	Reconnaissance
318-003	09h39 / 10h24	Strasbourg	Meuse	320	Essai
318-004	10h44 / 11h33	Meuse	Strasbourg	340	Essai survitesse
318-005	13h20 / 14h05	Strasbourg	Meuse	360	Essai survitesse
318-006	14h28 / 15h17	Meuse	Strasbourg	360	Essai survitesse
318-007	16h10 / 16h55	Strasbourg	Meuse	360 ou V.ligne	Essai survitesse (réserve) ou acheminement

2.5.5 - Le train d'essai n° 814521

Il s'agit de la marche de Meuse à Strasbourg référencée 318-006 sur le programme d'essais.

Le départ est prévu à 14 h 28 après un arrêt de 23 min pour le changement de sens et la préparation de la marche. L'arrivée est prévue à 15 h 17.

La marche comporte un parcours en survitesse sur la voie 2 de la ligne nouvelle.

S'agissant de la dernière marche de sens impair du programme de montée en vitesse, elle doit s'effectuer, sur la ligne nouvelle à la vitesse maximale de la ligne +10 % afin que le processus d'homologation de la ligne soit complété.

Les vitesses maximales prescrites pour cette marche sont :

- vitesse normale selon signalisation du PK 213,838 (Meuse) au PK 263,455 ;
- 360 km/h du PK 263,455 au PK 398,770 ;
- 330 km/h du PK 398,770 au PK 403,809 ;
- 176 km/h du PK 403,809 au PK 406,015 ;
- 160 km/h du PK 406,015 au PK 408,532 (Aiguille 715 b de raccordement à la ligne classique Paris-Strasbourg) ;
- vitesse normale selon signalisation du PK 408,532 à Strasbourg.

53 personnes étaient présentes à bord dont :

- 18 agents opérationnels (8 Systra et 10 SNCF) ;
- 16 agents non opérationnels (7 Systra et 9 SNCF) ;
- 19 invités extérieurs.

Notamment, dans la cabine de conduite, se trouvaient en plus de l'équipe de conduite et du pilote Systra, un technicien Systra en charge de la surveillance de la signalisation de cabine et deux cadres SNCF non opérationnels.

3 - La recherche des causes immédiates de l'accident

3.1 - L'examen des données de l'enregistreur de bord

Note sur le calage des points kilométriques

Les enregistreurs de bord possèdent leur propre odométrie et ne reconnaissent pas les PK de la ligne.

Pour exploiter un enregistrement, il faut caler l'odométrie de l'engin avec les PK du secteur concerné. Ce calage se fait en utilisant l'enregistrement d'un point remarquable dont on connaît le PK. Selon les cas, on peut prendre un point d'information TVM sur ligne à grande vitesse, ou un crocodile sur ligne classique, le point de déraillement ou le point d'arrêt final du train.

Selon le point remarquable pris en compte, ce calage peut impliquer une incertitude plus ou moins importante.

En l'occurrence, c'est l'arrêt des enregistrements ATESS qui sert de point de référence et que nous positionnons au point de choc de la motrice contre la poutre latérale du pont-rail au PK 404,226. Sachant que, dans la réalité, cet arrêt correspond à un point situé entre le début du déraillement au PK 404,100 et le point de choc du PK 404,226. Nous considérons que le calage retenu implique une incertitude de 100 m environ.

En superposant les PK de la ligne et les limites de vitesse prévues pour cette marche sur le tracé des vitesses enregistrées, on obtient le graphique ci après.

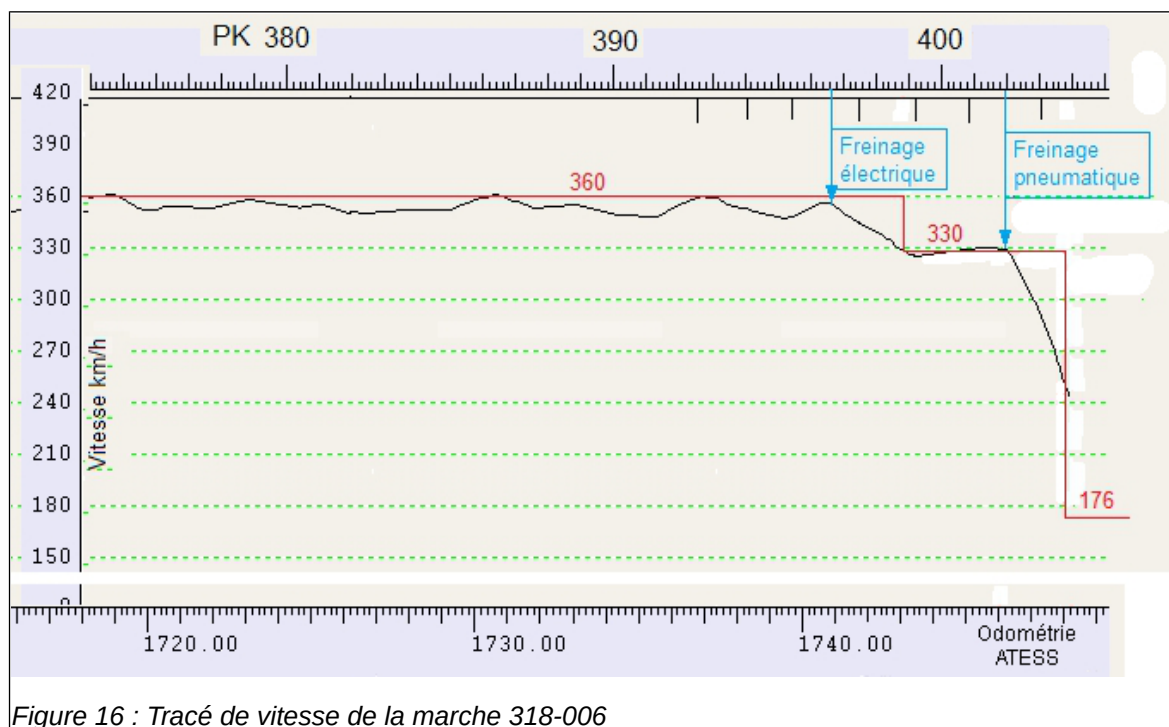


Figure 16 : Tracé de vitesse de la marche 318-006

L'examen du tracé et l'exploitation du listing donné en annexe 3 permettent de dire que le freinage électrique a été déclenché au PK 396,800 et relâché au PK 398,940. En outre, on constate la superposition d'un bref freinage pneumatique entre les PK 398,240 et 398,650.

Le conducteur a ensuite tractionné du PK 399,300 au PK 401,300 pour remonter de 325 à 330 km/h sur le tronçon où la vitesse maximale prescrite est de 330 km/h.

Le freinage pneumatique final a été déclenché au PK 402,050.

Le PK 403,809 correspondant à l'entrée de la zone limitée à 176 km/h a été franchi à 265 km/h et l'enregistrement s'arrête environ 400 m plus loin à la vitesse de 243 km/h.

Le listing montre également une petite erreur de manipulation sans conséquence significative lors du déclenchement du freinage, le manipulateur passant en position Urgence pendant 4 s avant d'être remis en position normale.

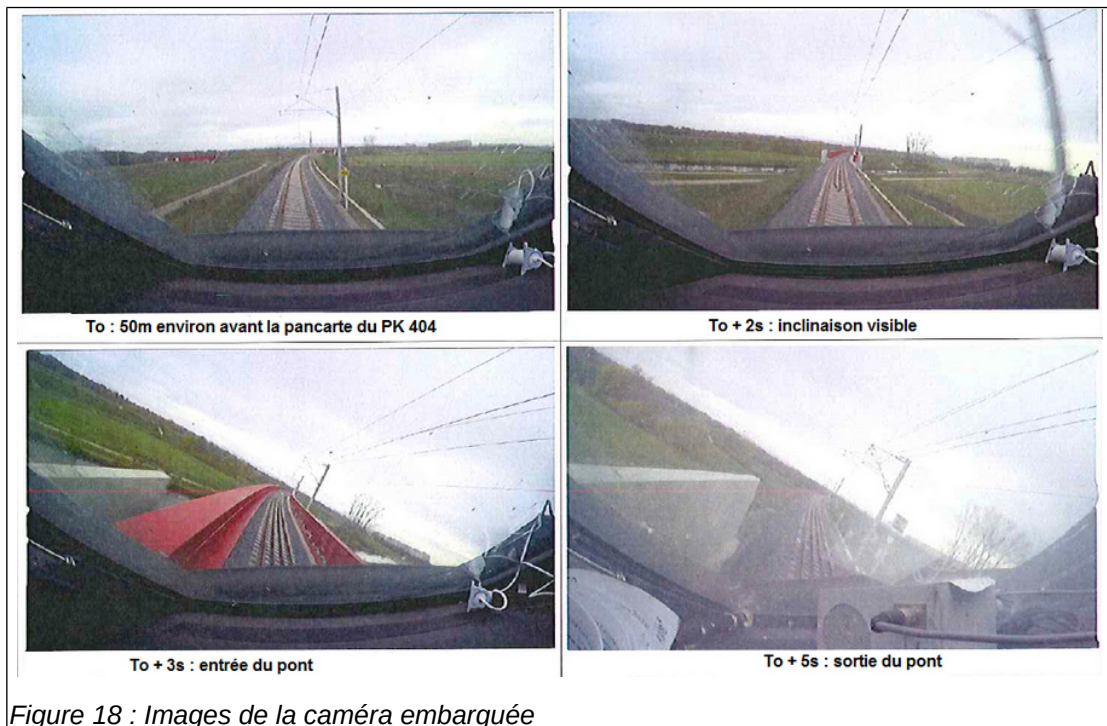


Figure 17 : Manipulateur de freinage

3.2 - Les enregistrements de la caméra embarquée

Une caméra embarquée en cabine de conduite a enregistré les images suivantes du déraillement.

Elles montrent que la motrice a commencé à se renverser peu après avoir franchi la pancarte du PK 404, environ 100 m avant l'entrée du pont. On remarque également que l'inclinaison de la motrice est constante pendant la traversée du pont



3.3 - Les investigations sur la rame TGV accidentée

3.3.1 - Les constats sur la rame

L'examen des essieux de la rame permet de conclure à l'absence de rupture d'axe ou de fusée.

Les boîtes d'essieu ne présentent pas de trace d'échauffement.

Sur les quatre essieux de la motrice de tête, on observe des traces grises de roulement sur le ballast sur les roues du côté gauche. En revanche, les roues du côté droit ne présentent pas de telles traces.



L'examen de l'ensemble des organes mécaniques ne permet pas de détecter d'avarie susceptible d'être à l'origine du déraillement.

3.3.2 - L'examen des données de maintenance

Affectée au Technicentre Est Européen (TEE) depuis le 7 septembre 2015, la rame 744 faisait l'objet d'une trame de maintenance renforcée pour tenir compte des sollicitations supplémentaires liées aux marches de survitesse. Dans ce cadre, la périodicité de l'examen en service (ES) était ramenée à 7 jours ou 5000 km au lieu de 7500 km et sa consistance était renforcée pour les essieux, les trappes escamotables et les carénages.

Les éléments de traçabilité, dont les principaux figurent en annexe 4 permettent de vérifier que la trame de maintenance préventive était respectée et que les signalements et les opérations de maintenance corrective récents ne font apparaître aucune anomalie concernant les organes mécaniques, les freins ou les systèmes de sécurité.

3.4 - Les investigations sur l'infrastructure

3.4.1 - Les constatations sur la voie 2

Les rails ne présentent pas de rupture ou de dégradation apparente. Aucun indice de déformation du remblai n'est visible.

On constate une déformation visible de la voie sur une zone commençant vers le PK 404 soit à 200 m environ avant le pont sur le canal.



Figure 20 : Vue de la Voie 2 en direction de Strasbourg

Au PK 404,068, on commence à voir apparaître des traces de roulement de boudin sur la table de roulement du rail de la file de gauche (pour le sens de circulation du train) puis, au PK 404,110, des traces de roulement sur les têtes de traverses côté gauche. En revanche, aucune trace de roulement n'est constatée du côté droit.



3.4.2 - Les constatations sur le pont-rail

Hormis la destruction du parapet en béton et les dégâts sur la poutre latérale gauche consécutifs au déraillement, aucun désordre n'est constaté sur l'ouvrage.

On note des traces de frottement sur la semelle supérieure de cette poutre.

3.4.3 - La vérification des paramètres géométriques de la voie 2

Les paramètres théoriques

Les données géométriques de la voie 2 sont :

- un alignement du PK 400,914 au PK 403,809
- un raccordement entre les PK 403,809 et 403,954
- une courbe de rayon 945 m et de dévers 163 mm entre les PK 403,954 et 404,643

Le relevé Mauzin

Le dernier enregistrement Mauzin avant l'accident a été réalisé le 10 septembre 2015. L'extrait correspondant à la zone concernée, avec l'indication des tolérances contractuelles, figure en annexe 5. Les caractéristiques géométriques de la voie sont globalement très bonnes. Les paramètres de dressage sont légèrement perturbés entre les PK 404,080 et 404,320 mais sont dans les tolérances.

Le Mauzin a également enregistré les valeurs de devers. Elles sont conformes au devers théorique dans le raccordement ; elles sont en moyenne de 161 mm dans la pleine courbe, ce qui est dans la tolérance de +/- 3 mm prescrite pour une voie neuve.

Le levé topographique

Le 25 février 2016 un levé topographique de la voie 2 en amont du point de déraillement a été effectué à la demande des experts judiciaires.

Les dévers et les flèches mesurés lors de ce levé sont cohérents avec ceux relevés par le Mauzin, jusqu'au PK 404 pour les dévers et jusqu'au PK 403,950 pour les flèches. Ensuite, ils s'en écartent de façon erratique.

Le BEA-TT considère que ce levé confirme les résultats du relevé Mauzin et que les écarts observés après le PK 403,950 correspondent aux déformations de la voie consécutives aux efforts latéraux et verticaux exercés par le train en excès de vitesse juste avant son déraillement.

Pour la partie non-déformée de la courbe, l'exploitation du levé topographique donne un rayon de 944 m et un dévers de 160,4 mm.

3.5 - La cause immédiate du déraillement

Le tracé des vitesses issu du dépouillement de l'enregistreur de la motrice et illustré par la figure 16, montre que :

- la vitesse du train était de 265 km/h au PK 403,809 où la vitesse maximale prescrite par la marche se réduit à 176 km/h ;
- le début de la pleine courbe, situé au PK 403,954 est franchi à environ 255 km/h ;
- à l'entrée du pont, où les enregistrements s'arrêtent, la vitesse est de 243 km/h.

Les images de la caméra embarquée de la figure 18 montrent que la motrice a commencé à se renverser entre le PK 404 et l'entrée du pont.

Le BEA-TT a effectué un calcul simple tenant compte du rayon de la courbe et du devers donnés par le levé topographique, d'une hauteur du centre de gravité du véhicule de 2014 mm et d'un désaxement du centre de gravité de 100 mm vers l'extérieur de la courbe sous l'effet de la force centrifuge. Ce calcul, donné en annexe 6, a montré que, dans cette courbe, ce type de matériel est susceptible de se renverser dès que la vitesse dépasse 235 km/h et donc que la vitesse du train dans la pleine courbe était largement suffisante pour provoquer le basculement.

Une étude du centre d'ingénierie du matériel (CIM) de la SNCF utilisant des outils de simulation numérique conclut également au renversement par vitesse excessive. Le rapport d'étude du CIM est donnée en annexe 7.

Le renversement a probablement commencé par la remorque R8 située immédiatement derrière la motrice et dont le centre de gravité est plus haut. Ensuite la motrice s'est inclinée à son tour et a déraillé d'abord avec son bogie arrière qui a percuté le parapet puis la poutre gauche du pont. Sous le choc, l'arrière de la motrice s'est séparé de l'avant qui a continué sa course en s'appuyant sur la poutre gauche du pont avant de dérailler complètement par la gauche et de dévaler le talus.

Le transformateur principal, désolidarisé de la caisse est tombé sur le talus à la sortie du pont et a pris feu.

Le reste de la rame s'est disloqué et les différents véhicules ont déraillé vers la gauche de la voie avant le pont. Les huit remorques ont franchi le canal sur leur élan.

La motrice de queue, partant de plus loin, n'a pas atteint la rive opposée et est restée partiellement immergée.

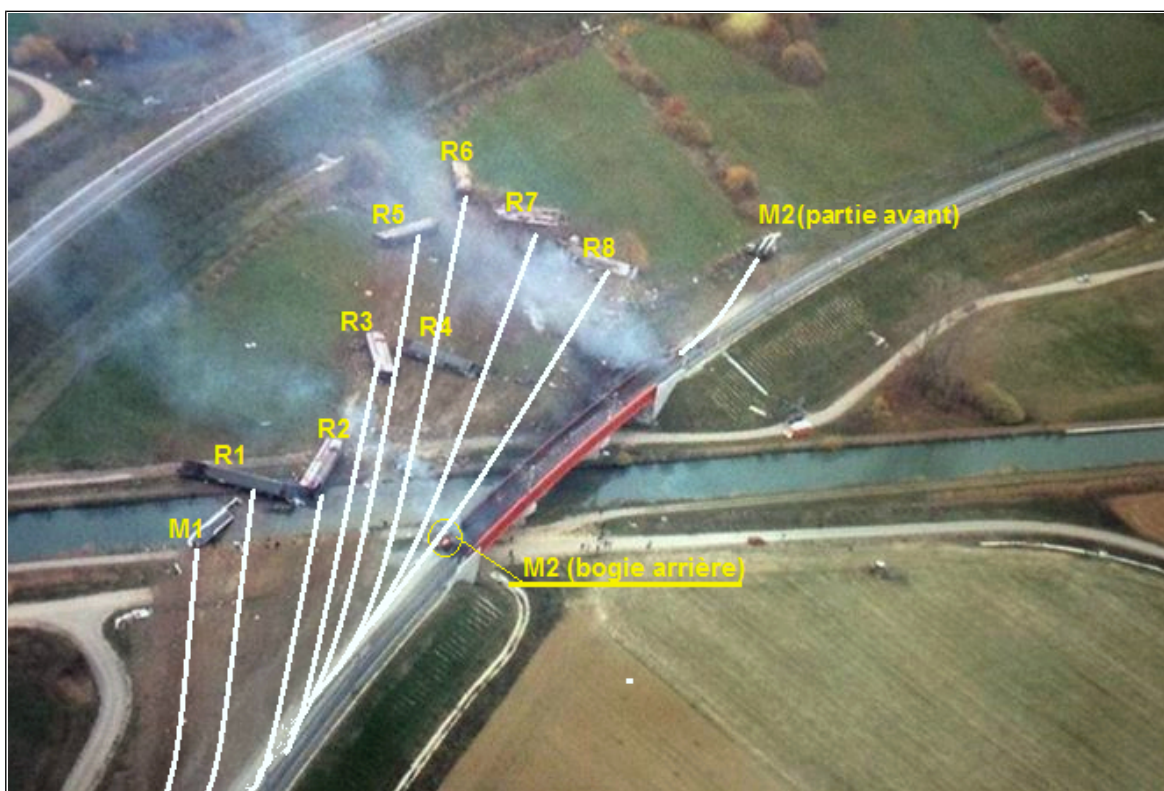


Figure 22 : Trajectoires probables des différents véhicules

Les investigations sur la voie en amont du point de déraillement et sur le matériel roulant n'ayant mis en évidence aucune anomalie susceptible de contribuer au déraillement, le BEA-TT conclut que l'accident est dû à une cause unique qui est la vitesse très excessive de la rame dans la courbe à droite précédant le pont sur le canal.

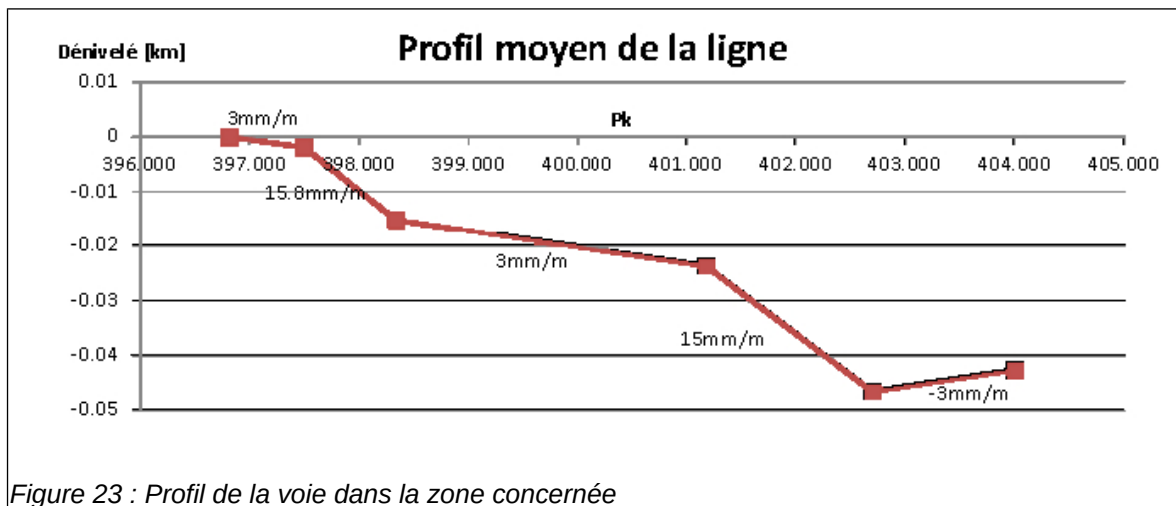
3.6 - La cause de l'excès de vitesse

L'examen des données de l'enregistreur de bord montre que le freinage final a été déclenché au PK 402,050 à la vitesse de 329 km/h.

Pour un TGV du type concerné, sur une voie en palier, la distance nominale¹⁰ pour passer de 329 à 176 km/h avec un freinage maximal de service ou un freinage d'urgence est de l'ordre de 2700 m.

Compte tenu du profil de la ligne, pour respecter le seuil de 176 km/h du PK 403,809, il faut déclencher son freinage maximal au moins 2850 m avant soit, au plus tard au PK 400,959, donc juste avant le PK 401.

¹⁰ C'est-à-dire en faisant l'hypothèse que les systèmes de tous les véhicules fonctionnent de façon nominale et que le coefficient de frottement des garnitures de frein sur les disques et l'adhérence roue/rail ne sont pas dégradés.



Le freinage a été déclenché environ 1100 m plus tard ce qui, à 329 km/h, représente un retard de 12 secondes.

Les données de l'enregistreur permettent également d'affirmer que le temps de réaction et l'intensité de la réponse des freins à la commande donnée par le conducteur ont été conformes aux spécifications.

Ceci permet de conclure que la cause unique de l'excès de vitesse est le caractère tardif du freinage devant assurer la transition de 330 à 176 km/h.

4 - La recherche des causes du freinage tardif

4.1 - Les résumés des déclarations et des témoignages

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

Les explications entre crochets ont été ajoutées par le BEA-TT.

4.1.1 - *Les entretiens avec les personnes présentes dans la cabine de conduite*

Les enquêteurs du BEA-TT ont recueilli les déclarations de toutes les personnes présentes en cabine de conduite lors de l'accident.

➤ **Le conducteur titulaire**

Le conducteur est affecté à l'entité d'appui du service traction (EAST) depuis juillet 2014.

C'est sa première participation à une campagne d'essais d'homologation d'une ligne nouvelle. Il était affecté aux marches d'essais de la LGVEE depuis le 27 septembre 2015.

La répartition des rôles en cabine n'était pas définie. On s'organisait au coup par coup.

Quand il était deuxième conducteur, il annonçait les PK. Il le faisait à l'avance en annonçant « 5 km ... 2 km, 1 km, top ». Mais ça n'est pas normalisé.

[Sur ce type d'essai,] le conducteur surveille son indicateur de vitesse et le profil de la voie de façon à maintenir au mieux la vitesse de consigne. Il ne peut pas regarder les PK en même temps. Il freine quand il entend le top freinage.

Il n'a pas participé au calcul des points de freinage pour la marche 318-006.

Il ne se souvient pas comment s'est passé le freinage de la marche 318-004.

Pendant la marche, tout se passait normalement. Le deuxième conducteur a annoncé le premier freinage [le freinage électrique du PK 397] qui a été normalement effectué.

Le conducteur titulaire n'a pas entendu d'annonce pour le 2^e freinage [du PK 401]. Il a freiné par réflexe, peut-être à l'apparition, sur son visualisateur du signal « baisser panto » [du PK 402,235].

Il ajoute, qu'à peu près au même moment, il y a eu un appel par la liaison interphonique.

➤ **Le deuxième conducteur**

Le deuxième conducteur est affecté à l'EAST depuis février 2014.

C'est sa première participation à une campagne d'essais d'homologation d'une ligne nouvelle. Il était affecté aux marches d'essais de la LGVEE depuis deux semaines (2 novembre 2015).

Avant chaque départ de marche, l'équipe de conduite calcule les PK des freinages et des points particuliers.

Le conducteur titulaire note les vitesses à respecter et les points de freinage sur les feuilles de marche qui sont ensuite placées sur le pupitre.

Après départ de chaque marche, dès les premiers tours de roue, l'équipe de conduite cale l'odométrie avec le laboratoire.

Le deuxième conducteur précise, qu'avant la marche 318-006, il n'est pas arrivé en cabine tout de suite car il avait des choses à finir dans la cabine arrière où il avait assuré la conduite en titulaire de la marche 005. Il ajoute, qu'en tant que 2^e conducteur, il n'a pas de mission bien définie lors de la préparation de la marche et lors de sa réalisation et que la répartition des rôles est différente selon le CTT* présent.

Il a toutefois pu prendre connaissance du PK du 1^{er} freinage puis il a pris place à l'extrême gauche de la cabine ; à gauche du pilote Systra.

Avant le départ, le conducteur titulaire a appelé le labo pour faire préciser la vitesse de passage sur l'aiguille du PK 382,6. Il a ajouté cette vitesse sur la feuille de marche.

Pendant la marche, le CTT était à droite du conducteur près de l'interphone ; le pilote à gauche.

Les deux invités étaient de part et d'autre du conducteur adossés au fond de la cabine.

Le technicien Systra était un peu en arrière, entre le pilote et le deuxième conducteur.

La cabine était encombrée mais tout le monde était concentré sur sa tâche ; il n'y avait pas de conversation.

Le deuxième conducteur a annoncé le PK du premier coup de frein. Ce freinage a été fait au frein électrique comme prévu et il s'est bien passé.

À un moment, il y a eu un appel à l'interphone. Le son était fort mais pas net. Le CTT ne comprenait pas.

Pendant les marches précédentes et les jours précédents, le pilote était toujours à gauche et c'était toujours le CTT qui répondait à l'interphone.

Lors de la marche précédente [318-005], il y a eu un appel du chef d'essai pour demander de rouler à 340 km/h au lieu des 320 prévus à la marche. Le CTT a refusé.

Il précise que des ordres et des contre-ordres sur la vitesse de circulation étaient assez fréquents sur cette campagne (demande de 360 km/h au lieu de 352, puis finalement limitation à 352 sur certains points, demande de 340 au lieu de 320 en pleine circulation...). Il était prévu de faire un retour d'expérience à la fin du projet LGVEE2 pour anticiper et éviter d'avoir les mêmes imprécisions lors des campagnes à venir.

➤ **Le cadre Traction**

Le CTT est affecté à l'EAST depuis mai 2009.

Il n'a pas eu de formation particulière ni d'habilitation pour la fonction de CTT d'essais.

Il a participé à de nombreux essais, y compris en survitesse, mais c'est sa première expérience sur une campagne d'homologation de ligne nouvelle.

Il était affecté depuis septembre 2015 à la campagne d'homologation de la LGVEE2. Il assurait la fonction de CTT d'essais une semaine sur deux, en alternance.

* Terme figurant dans le glossaire

La détermination des points de freinage de la marche 318-006

Le CTT était sur l'idée de réaliser un freinage semblable à celui de la marche 318-004, c'est-à-dire freinage électrique au PK 397 puis freinage maximal de service (FMS) à la vue du PK 400.

Pendant le changement de cabine à Meuse, le conducteur titulaire et le pilote Systra sont passés par la voiture labo pour retirer la fiche de vitesse de la marche 318-006 auprès du chef d'essai.

Lorsque le CTT a pris place dans la cabine 2 à Meuse, le conducteur ou le pilote Systra lui ont proposé de reporter le 2^e freinage [*le freinage maximal de service du PK 400*] et il a été convenu de le faire à la vue du PK 401, compte tenu de la marge observée lors du freinage précédent. Dans l'esprit du CTT, cela conduisait à déclencher ce FMS au PK 400,7, le freinage électrique étant maintenu à fond depuis le PK 397 jusqu'au déclenchement du 2^e freinage.

Or ce n'est qu'à la vue du graphique ATESS et bien après l'accident, le 15 février 2016, qu'il a compris que le conducteur avait relâché son freinage aux environs du PK 399 et avait même repris de la vitesse pour remonter à 330 km/h.

Le déclenchement du 2^e freinage de la marche 318-006

L'attention du CTT a été accaparée par l'appel interphonique du chef d'essai qu'il situe entre le 1^{er} et le 2^e coup de frein.

Il ne s'explique pas pourquoi aucun des deux conducteurs ni le pilote n'ont réagi au moment prévu pour déclencher le 2^e freinage.

L'encombrement de la cabine

Il y avait 7 personnes en cabine dont deux invités.

Le CTT a manifesté ses réticences par rapport à la présence de ces personnes en cabine, mais il a finalement accepté bien qu'une des deux ait proposé de ne pas rester.

Pour la marche, le CTT a placé ces 2 personnes derrière lui après leur avoir donné les préconisations d'usage. Ils n'ont pas bougé et n'ont rien dit. Leur présence encombra un peu la cabine mais sans gêner le travail de l'équipe de conduite. Il considère qu'ils n'ont joué aucun rôle dans la survenue de l'accident.

Le système interphonique

Il s'agit d'un système interphonique ouvert. Tout le monde entend tout le monde, y compris les appels entre la cabine arrière et le chef d'essai qui n'intéressent pas la conduite.

Lorsque le chef d'essai appelle la cabine de conduite, le CTT répond rapidement afin que l'appel ne dérange pas davantage l'équipe de conduite. L'appel pendant la dernière marche demandait de maintenir la vitesse de 176 km/h jusqu'à la pointe de l'aiguille 702 ce qui n'était pas prévu à la fiche de vitesse.

Le retour d'expérience de la campagne

S'agissant de circulations hors RFN* et managées par Systra, le CTT déclare s'être trouvé parfois en porte-à-faux sans savoir si les règlements et les méthodes auxquels il était formé et habitué sur le RFN s'appliquaient ou pas. Il évoque notamment plusieurs cas où il avait dû faire preuve de fermeté vis-à-vis de demandes, émanant de Systra, qui ne lui

* Terme figurant dans le glossaire.

apparaissaient pas réglementaires. À titre d'exemples, il fournit à l'enquêteur du BEA-TT des échanges de courriels concernant les vitesses à tenir pendant les marches d'homologation.

➤ **Le pilote Systra**

Le pilote est un ancien conducteur de ligne, sous contrat avec Systra depuis septembre 2015 pour assurer les fonctions de pilote sur les trains d'essais de la LGVEE2.

Les fonctions du pilote sur ces trains sont différentes de celles prévues par les règlements en vigueur sur le RFN. Avant le départ, le pilote reçoit la fiche de vitesse de la part du chef d'essai qu'il transmet au cadre traction.

Par l'interphone, le pilote collationne la fiche de vitesse avec le chef d'essai et le CTT écoute.

Ensuite, si tout est bon, il transmet l'autorisation de départ au conducteur .

Pendant la marche, si l'équipe de conduite ne connaît pas la ligne, le pilote leur fait découvrir les points particuliers un peu comme pour un parcours de connaissance de ligne sur le RFN.

Si l'équipe de conduite connaît la ligne, ce qui est le cas le plus fréquent, il n'a pas de fonction précisément définie pendant la marche et n'a pas à intervenir dans la conduite.

En cas d'appel interphonique, c'est soit le pilote, soit le CTT qui répond en fonction de leur position. C'est celui qui est plus près du boîtier de l'interphonie qui prend le micro. Dans le cas de la marche 318-006, il y a eu un appel du chef d'essai concernant le franchissement de la jonction avec la ligne classique. C'est le CTT qui a pris l'appel car il était du côté du boîtier.

Concernant les personnes en cabine le 14 novembre, il précise qu'ils étaient un peu serrés mais pas au point que ça soit gênant. Les trois personnes qui n'appartenaient pas à l'équipe de conduite n'ont, à aucun moment, perturbé le travail de l'équipe.

Évoquant la marche de survitesse du 11 novembre sur Voie 1 [*marche similaire à la marche 318-006 mais sur V1 au lieu de V2*] il rapporte que l'équipe de conduite avait fait remonter la difficulté de marquer le palier à 330 puis de négocier la transition 330 – 176. On lui a répondu que le palier à 330 était nécessaire pour valider la zone concernée.

➤ **Le technicien signalisation Systra**

Il s'agit d'un technicien signalisation (SE) travaillant sur le chantier LGVEE pour le compte de Systra depuis 2013.

Le 14 novembre, il tenait le poste de technicien SE en cabine. À ce titre, il est chargé de surveiller le bon fonctionnement de la signalisation de cabine. Il n'a aucun rôle opérationnel en lien avec la conduite du train.

Lors du changement de cabine, il est arrivé le premier en cabine 2. Deux personnes étaient présentes. Ensuite le pilote et le conducteur titulaire sont arrivés puis le CTT et enfin le 2^e conducteur.

Le CTT était mécontent mais a autorisé les deux personnes à rester.

L'équipe de conduite a discuté pour positionner le point de freinage en aval par rapport à la marche précédente.

Pendant la marche, tout le monde était concentré et personne ne parlait.

Il ne se souvient pas d'avoir entendu un appel interphonique.

Peu avant le déraillement, il a entendu quelqu'un dire « attention, tu as enclenché le frein d'urgence ».

➤ **L'invité n° 1**

Il s'agit d'un cadre de SNCF Réseau, chef de projet à la direction de l'Ingénierie.

Après un parcours en cabine arrière de Strasbourg à Meuse, les deux invités restent en cabine et voient arriver l'équipe de conduite avec le conducteur titulaire, le CTT et le pilote, puis le technicien Systra et le deuxième conducteur.

L'invité propose de laisser sa place mais le CTT lui permet de rester.

L'équipe échange quelques banalités puis procède au briefing en vue de la marche suivante. Ils évoquent la vitesse de franchissement de l'aiguille d'ensablement et dans le tunnel de Saverne [PK 382] puis les modalités des séquences de freinage.

L'invité voit le conducteur titulaire annoter sa feuille de marche.

Il ne se souvient pas qu'il y ait eu un débat au sein de l'équipe sur les modalités des freinages. Il ne se souvient pas des PK de freinage retenus.

Pendant le parcours, le CTT annonçait les points singuliers (aiguille, tunnel) au fur et à mesure.

À un autre moment, le CTT a annoncé qu'il faudra tenir le 176 sur l'aiguille de raccordement. L'invité ne se souvient pas quand cette information a été communiquée à l'équipe de conduite.

Concernant le deuxième conducteur, l'invité pense que celui-ci n'avait pas de rôle défini lors de cette marche.

➤ **L'invité n°2**

Il s'agit d'un cadre de SNCF Réseau, chef de projet signalisation à la direction de l'Île-de-France.

Après un parcours en cabine arrière de Strasbourg à Meuse, les deux invités restent en cabine et voient arriver l'équipe de conduite à trois agents.

Il n'a pas tout de suite compris qui était le CTT et qui était le pilote.

Ils ont parlé de l'aiguille d'ensablement et de la traversée du tunnel de Saverne.

Il ne se souvient pas qu'ils aient parlé du freinage.

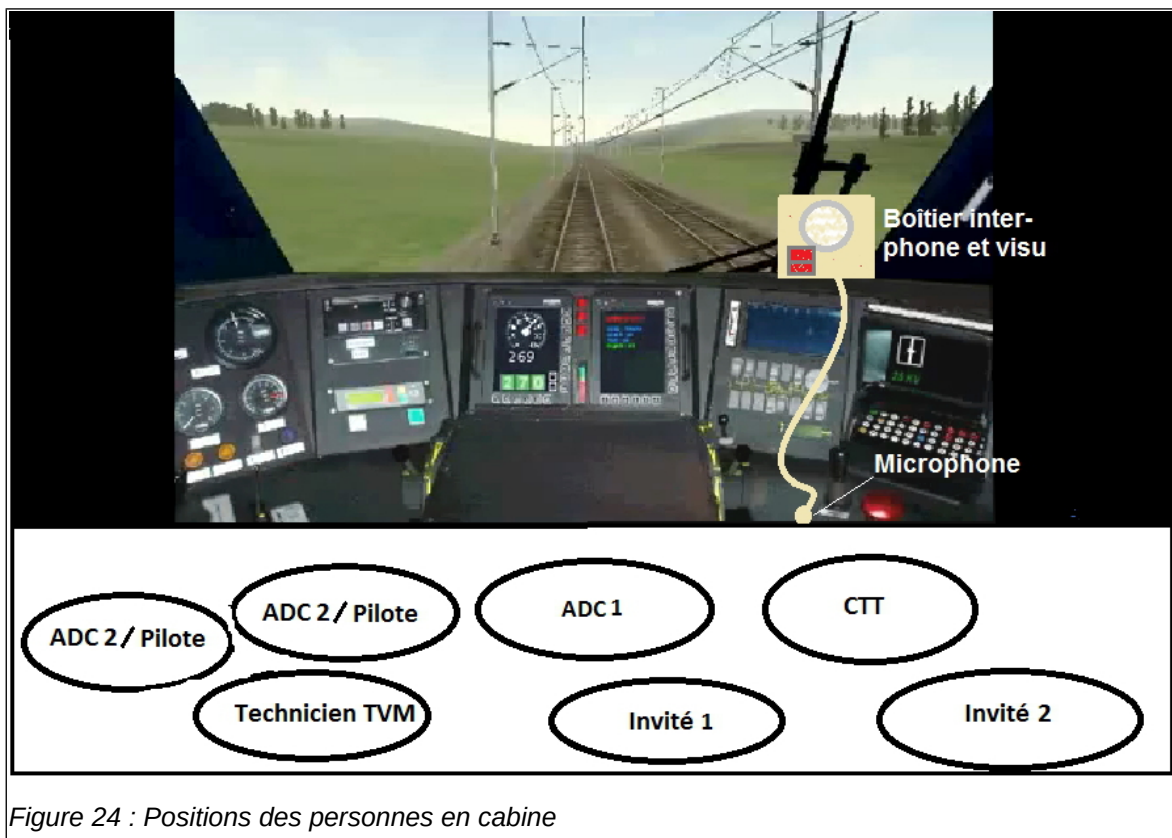
Pendant le parcours, l'invité s'intéressait surtout aux ouvrages d'art et il ne souvient pas des différents événements qui ont précédé le déraillement.

➤ **La position des personnes en cabine**

Les personnes ont été interrogées sur la position de chacun dans la cabine de conduite.

Leurs réponses sont cohérentes sauf pour la position relative du pilote et du deuxième conducteur qui ont pu permuter pendant le parcours.

Elles sont représentées dans la figure ci-après.



4.1.2 - Les résumés des déclarations écrites de l'équipe de conduite

Les membres de l'équipe de conduite SNCF ont rédigé le surlendemain de l'accident, des déclarations écrites comme prévu par les procédures internes de cette entreprise. Les explications entre crochets ont été ajoutées par le BEA-TT.

➤ Le conducteur titulaire

Nous circulons aux vitesses prévues par le programme d'essais. À 357 km/h, je déclenche le premier freinage pour descendre à 330 km/h lorsque le top freinage m'est donné par le 2^e conducteur, le CTT ou le pilote.

J'attends le 2^e top pour descendre à 176 km/h.

Le freinage est commandé, mais la rame entrant dans la courbe à droite se déporte et se soulève vers la gauche puis finit par sortir de la voie.

➤ Le deuxième conducteur

Le programme d'essais prévoyait de circuler à 357 km/h puis 330 km/h puis 176 km/h.

J'ai donné le top freinage au PK 397 pour respecter le 330 km/h au PK 398,800.

Dans un deuxième temps, le conducteur a commandé un freinage pneumatique pour se mettre à 176 km/h comme prévu au programme.

J'ai ressenti un heurt important ; je me trouvais tout à gauche de la cabine, contre la vitre latérale, sans visibilité sur la voie.

J'ai senti la motrice qui s'inclinait de plus en plus jusqu'au déraillement.

➤ Le cadre Traction (extraits)

Pour la marche 318-004 [Meuse – Strasbourg], après avoir pris les directives auprès du chef d'essai, je donne les instructions aux deux conducteurs et au pilote pour un freinage électrique à fond à la vue du PK 397 [pour la transition 340 – 320 du PK 398,770] puis un freinage pneumatique à 1,5 bar à la vue du PK 400 [pour la transition 320 – 176 du PK 403,809].

Lors de la marche, les deux décélérations sont conformes et les transitions sont largement respectées.

Pour la marche 318-005 [sens Strasbourg – Meuse], la fin du parcours en survitesse est ramené du PK 272,612 au PK 279, Le chef d'essai me demande de rester à 340 km/h au lieu des 320 affichés par la signalisation. Je refuse.

Pour la marche 318-006, les directives prises auprès du chef d'essai précisent un passage à 352 +1 km/h sur l'aiguille [d'ensablement] du PK 382,6.

Lors de la préparation avec l'équipe de conduite, on décide de réaliser le freinage électrique à la vue du PK 397 [pour la transition 360 – 330 du PK 398,770].

Puis, [pour la transition 330 – 176 du PK 403,809], le conducteur propose de freiner plus tard compte tenu de la marge [d'environ 2 km] observée lors de l'essai précédent.

J'accepte pour un freinage maximal à 1,5 bar au vu du PK 401, c'est-à-dire au PK 400,700. Cela laisse 3 km pour passer de 330 à 176.

J'insiste pour que le conducteur inscrive ces freinages sur son schéma de marche.

À l'approche du PK 382, le chef d'essai rappelle à la sono la vitesse à respecter sur l'aiguille.

Cette vitesse est respectée

À l'approche du PK 397, un décompte est réalisé à haute voix ; le freinage électrique est déclenché à la vue du PK. La transition [du PK 398,770] est respectée sans difficulté.

Il y a alors un appel du chef d'essai sur la sono.

J'attends environ le PK 400,700 et je donne l'ordre à haute voix « Freine » puis je m'approche de la sono pour entrer en relation avec le chef d'essai.

J'entends un bruit d'air [lié au fonctionnement du robinet de frein], je regarde le manipulateur de freinage et je vois que celui-ci est sur « SOS - Urgence ». Puis le conducteur le remet en position normale de freinage et me dit « tout va bien ».

Lors de l'échange avec le chef d'essai, je comprends mal ses propos et je dois me pencher vers le haut parleur ce qui ne me permet pas de voir à l'extérieur.

Le chef d'essai me demande si je peux maintenir le 176 km/h sur l'aiguille 702 pour la valider [dans le cadre de la procédure d'homologation de la ligne]. Je dis que je ne suis pas chaud et il me dit que c'est sur la zone de survitesse côté Strasbourg et que cela correspond à 160 + 10 %. Je termine la conversation sans vraiment donner de réponse.

Je ne sais pas combien de temps a duré la conversation mais quand je me suis relevé, le conducteur annonçait « Baisser panto » [au sectionnement du PK 403,280].

Jusqu'à ce moment, il n'y a aucun signe, aucune parole ni aucune alerte.

Du côté gauche de la cabine quelqu'un dit « On roule trop vite » ensuite tout s'enchaîne, on arrive dans la courbe et on déraille.

4.1.3 - Le résumé des déclarations du pilote à l'équipe d'enquête Systra

Le pilote a constaté une décélération largement suffisante sur le premier freinage, la vitesse passant facilement de 350 à 330 km/h au seul frein électrique sur une distance de 2 km.

Pour le deuxième ralentissement, la vitesse doit passer de 330 à 176 km/h. Le PK de freinage avait été marqué en rouge [sur la feuille de marche] mais le pilote ne se souvient plus du PK exact ni si l'annonce a bien été faite. Il ajoute que le chef d'essai est intervenu [à l'interphone] pour rappeler qu'il fallait être à tout prix être à 176 au niveau de la jonction [avec la ligne classique]. Il précise que c'était un simple rappel.

Le conducteur a freiné assez fortement de sorte que le freinage est passé en mode urgence. Il est repassé de suite en freinage normal puis a refait une dépression supplémentaire.

4.2 - L'examen complémentaire des enregistrements et des documents de cabine

4.2.1 - La marche 318-004

Les déclarations du CTT indiquent que la stratégie de freinage de la marche 318-006 a été élaborée à partir de celle de la marche 318-004, en reportant le point de freinage pneumatique pour balayer au mieux le palier à V 330. Il est donc apparu utile de s'intéresser aussi aux données relatives à cette marche.

L'enregistrement ATESS de la marche

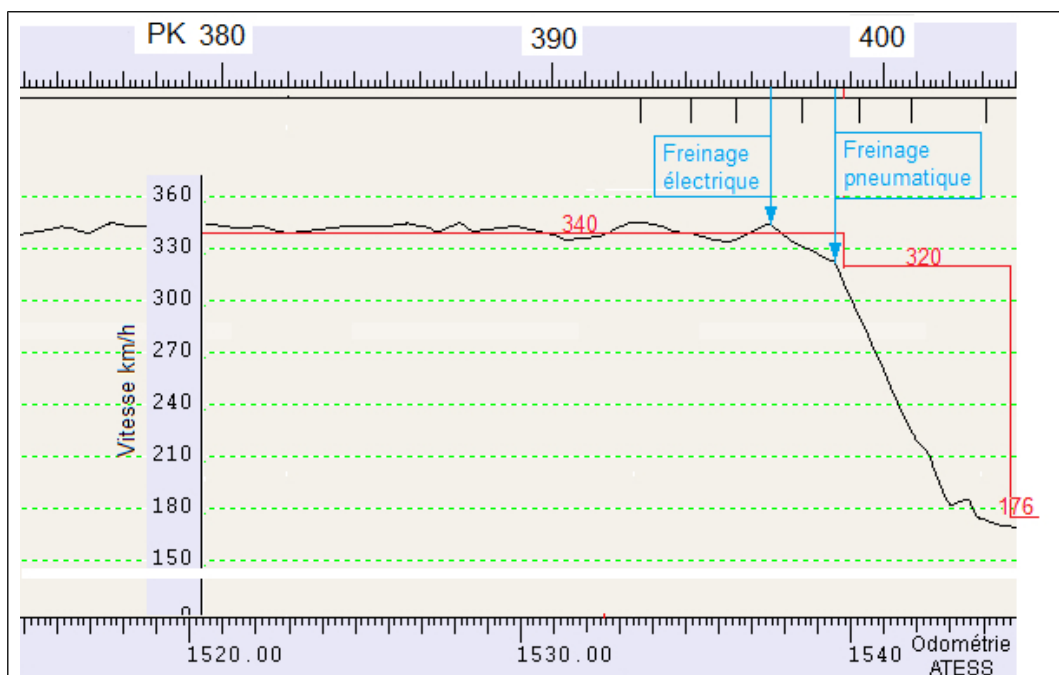


Figure 25 : Tracé de vitesse de la marche 318-004

Le polygone des vitesses prescrites figure en rouge sur le graphique.

Conclusion concernant la marche 318-004

On constate des incohérences concernant le point de freinage prévu pour passer de 320 à 176 km/h.

- les déclarations du CTT évoquent un freinage maximal de service « à la vue du PK 400 ». Le seuil du palier à 176 km/h étant au PK 403,809, un tel freinage réalisé dans des conditions nominales laisserait une marge de sécurité d'un peu plus d'un kilomètre ;
- l'annotation de la fiche de vitesse semble indiquer un freinage maximal de service au PK 401. Un tel freinage, toujours dans des conditions nominales laisserait une marge nulle ;
- la feuille de marche du conducteur ne comporte aucune indication de freinage ;
- l'enregistrement ATESS montre un freinage aux environs du PK 398,600.

Ces incohérences indiquent des faiblesses dans l'organisation et le fonctionnement de l'équipage qui font que :

- les freinages sont déclenchés à la vue des pancartes PK ce qui induit une avance de 300 à 400 m par rapport aux PK indiqués ;
- la stratégie de freinage imaginée par le CTT n'est pas comprise par chacun puisqu'au moins une personne a compris qu'il fallait freiner au PK 401 ;
- la stratégie n'est pas transcrite sur la feuille de marche du conducteur ;
- la mise en œuvre n'est pas conforme à la stratégie prévue puisque le freinage pneumatique est déclenché largement plus tôt.

4.2.2 - La marche 318-006

L'enregistrement ATESS de la marche

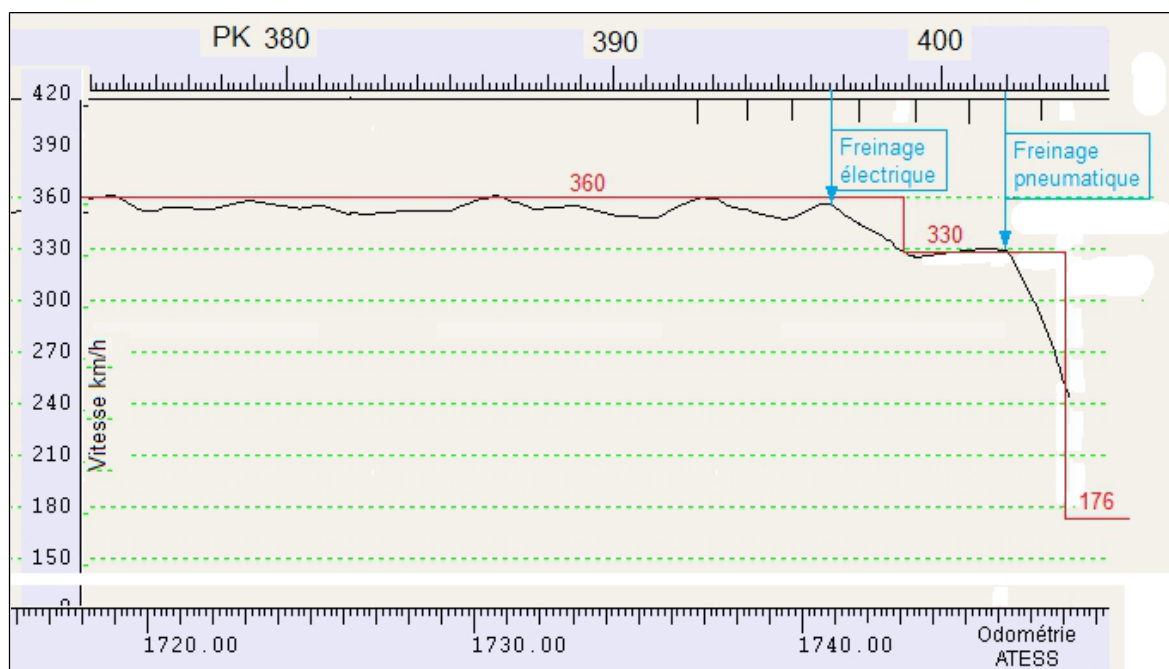


Figure 28 : Tracé de vitesse de la marche 318-006

L'analyse détaillée de l'enregistrement est donnée à l'article 3,1.

Concernant les freinages, on observe que :

- le freinage électrique a été déclenché au PK 396,800 et relâché au PK.398,940 ;
- le freinage pneumatique final a été déclenché au PK 402,050.

Les documents de cabine

Comme pour la marche 318-004, deux fiches de vitesse ont été retrouvées dont une comporte des annotations manuscrites. Deux annotations semblent concerner la stratégie du freinage final : 397 $\frac{1}{2}$ et 402 $\frac{1}{2}$.

Une autre annotation concerne la vitesse maximale de 352 km/h sur l'aiguille du PK 382,600.

Marche n°: 318-006

Vitesses de circulation maximales sur la marche d'essai		
Du PK 213 + 838 MEUSE TGV	au PK 263 + 455	Vitesse V_{CAB}
Du PK 263 + 455	au PK 398 + 770	Vitesse 357 (0, + 3)
Du PK 398 + 770	au PK 403 + 809	Vitesse 330
Du PK 403 + 809	au PK 408 + 015 Pointe Alg 702	Vitesse 176
Du PK 406 + 015 Pointe Alg 702	au PK 408 + 532 Pointe Alg 715 (Lato = 453 + 753)	Vitesse 160
Du PK 408 + 532 Pointe Alg 715 (Lato = 453 + 753)	au PK STRASBOURG VILLE	Vitesse V_{CAB}
Du PK	au PK	Vitesse

Annotations manuscrites à droite du tableau : 352, 382, 600, 352.

Figure 29 : Annotations de la fiche de vitesse 318-006

Comme pour la marche 318-004, la feuille de marche du conducteur comporte des annotations manuscrites reportant les transitions de vitesses issues de la fiche.

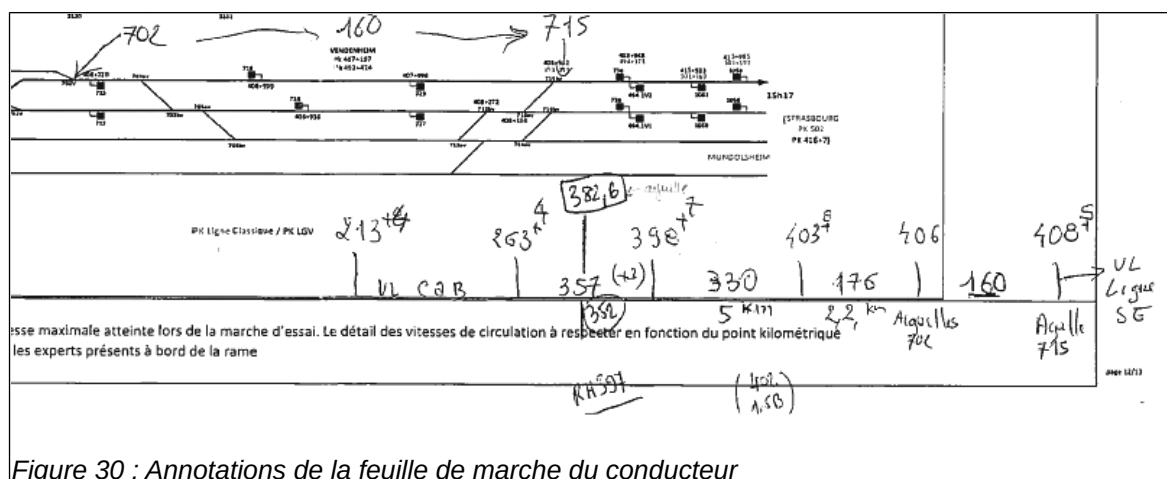


Figure 30 : Annotations de la feuille de marche du conducteur

Elle comporte deux annotations supplémentaires : « RH 397 » et « 402 / 1,5 B » que l'on peut interpréter comme des indications de freinage :

- freinage électrique (rhéostatique) au PK 397 ;
- freinage pneumatique avec 1,5 bar de dépression (freinage maximal de service) au PK 402.

L'exploitation de l'enregistrement sonore en cabine

Une caméra placée en cabine, à titre personnel, par le chef de bord, a enregistré cette dernière marche. Des images issues de cet enregistrement sont utilisées au point 3.2 pour la recherche des causes immédiates de l'accident.

L'enregistrement sonore n'était pas exploitable en l'état à cause du bruit de roulement régnant dans la cabine. Il a fait l'objet d'un traitement informatique dans le cadre de l'enquête judiciaire permettant de comprendre l'essentiel des échanges.

De l'exploitation de cet enregistrement il ressort que :

- les points de freinage prévus étaient le PK 397 pour le freinage électrique et le PK 402 pour le freinage pneumatique ;
- un appel interphonique du chef d'essai demandant le franchissement à 176 km/h de l'aiguille 702 située au raccordement de Vendenheim est arrivé alors que le train se trouvait approximativement au PK 399. C'est le CTT qui a répondu et la conversation a duré environ 10 secondes ;
- l'approche du PK 402 a été annoncée et le top freinage a été donné à ce PK.

4.3 - Conclusions concernant la marche 318-006

Les différents documents et enregistrements sont cohérents sur le fait qu'il était prévu que les freinages électriques et pneumatiques soient déclenchés respectivement aux PK 397 et 402 et, au final, c'est ce qui a été fait.

En revanche, les annotations sommaires de documents de bord ne permettent pas de savoir si le freinage électrique devait être maintenu, comme le déclare le CTT, où s'il devait être relâché, comme le conducteur l'a fait pour balayer le palier à 330 km/h, avant de déclencher le freinage pneumatique final.

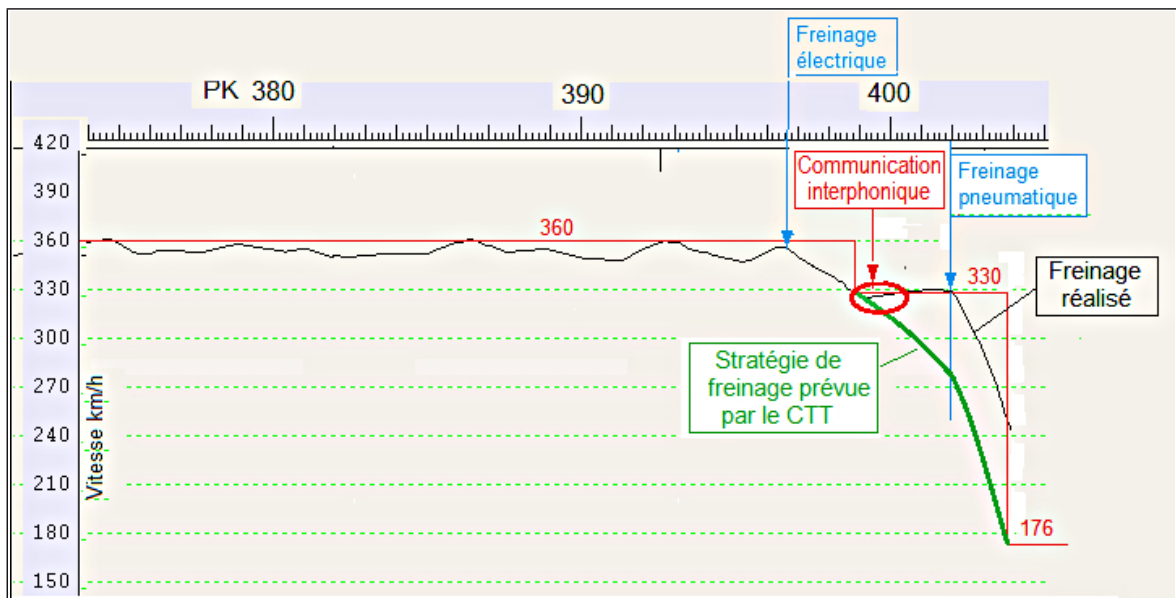


Figure 31 : Graphique indiquant la stratégie de freinage avec maintien du frein électrique et le positionnement de la communication interphonique

Les calculs illustrés par la figure ci-dessus montrent que le maintien du frein électrique jusqu'au PK 402 aurait pu permettre de respecter le seuil de 176 km/h, mais sans aucune marge de sécurité.

Il apparaît donc que la stratégie de freinage évoquée par le CTT n'a pas été comprise par le reste de l'équipage.

L'appel interphonique au PK 399 n'explique pas pourquoi le freinage électrique a été interrompu mais il a pu capter l'attention du CTT qui, ainsi, n'a pas vu que le conducteur relâchait son freinage au lieu de le maintenir.

Le freinage pneumatique a été déclenché au PK prévu qui était, à la limite, acceptable pour la vitesse de 280 km/h mais trop tardif pour la vitesse de 330 km/h.

En tout état de cause, l'élaboration de la stratégie de freinage de la marche 318-006 à partir de celle de la marche 318-004 était faussée à la base par le fait que le freinage pneumatique de la marche 318-004 avait été indûment anticipé par rapport au PK prévu.

5 - Les investigations sur les facteurs explicatifs en lien avec la conduite

Définitions

Pour plus de clarté, dans la suite du rapport, nous appellerons :

- **équipe de conduite** ou **équipe** l'ensemble formé par le CTT et les deux conducteurs ;
- **équipage de cabine** ou **équipage** l'ensemble formé par l'équipe de conduite et le pilote Systra.

Cette notion d'équipage n'a pas de fondement contractuel ou organisationnel. Elle est propre à ce rapport et vise uniquement à faciliter la compréhension des événements.

5.1 - Les personnes présentes en cabine de conduite

Il y avait 7 personnes en cabine lors de la marche 318-006 :

- le conducteur titulaire de SNCF Mobilités ;
- le deuxième conducteur de SNCF Mobilités ;
- le cadre Traction (CTT) de SNCF Mobilités ;
- le pilote Systra ;
- le technicien signalisation Systra ;
- deux cadres de SNCF Réseau invités.

Au-delà des 4 premières qui constituent donc l'équipage de cabine, tel que prévu par les référentiels en vigueur sur cette campagne d'essais, il y avait donc trois personnes supplémentaires dont une avec une mission technique.

Le nombre de personnes normalement autorisé dans une cabine de TGV est de 4 mais le référentiel TT 0055 prévoit que des personnes supplémentaires peuvent être admises en présence d'un CTT et avec l'accord de celui-ci.

Le CTT a confirmé avoir donné cet accord.

Les témoignages et les déclarations des membres de l'équipage sont unanimes et cohérents pour dire que ces trois personnes n'ont pas bougé et n'ont rien dit pendant la marche.

Pour ce qui est de l'encombrement physique de la cabine, l'enquêteur du BEA-TT a réalisé une « reconstitution » avec 7 personnes de gabarit comparable dans une cabine du même type. Elle permet de conclure que l'encombrement n'était pas de nature à gêner la bonne exécution des tâches de l'équipage.

Au total, le BEA-TT considère que la présence de ces trois personnes n'était pas contraire à la réglementation et n'a joué aucun rôle dans la chaîne causale de l'accident.

5.2 - Les référentiels de conduite d'un train d'essais

5.2.1 - Les référentiels nationaux

Les personnels de l'équipe de conduite sont formés à l'application des référentiels nationaux du métier de conducteur et, pour les spécificités des trains d'essais aux référentiels SNCF relatifs à la conduite de ces trains, notamment le document d'application EAST TT 01500 « *Consigne opérationnelle AEF - EAST* », la préconisation EAST RA 0005 « *Missions du CTT au sein de l'EAST* » et la directive OP 0518 « *Circulation de train d'essai* ».

Dans ces référentiels, on notera que le mode de fonctionnement de l'équipe de conduite et la répartition des tâches en son sein ne sont pas précisés. Notamment, l'EAST RA 0005 prévoit la présence d'un deuxième conducteur pour les marches de survitesse, mais n'est pas claire quant à son rôle : s'agit-il seulement d'un conducteur de relève ou a-t-il une mission opérationnelle lors des marches où il ne conduit pas.

5.2.2 - Les référentiels propres à la campagne d'essais LGVEE2

S'agissant d'une campagne hors RFN et avec Systra comme intégrateur, les référentiels sont différents et, comme indiqué au paragraphe 2.4.5 du présent rapport, c'est le document Systra « Procédures autorisant les circulations d'essais » (PACE) qui s'applique. Ce document définit notamment les missions de chacun ainsi que les procédures, documents et imprimés à utiliser.

Il reste proche des documents nationaux, mais il en adapte les prescriptions à cette organisation particulière.

Une particularité par rapport aux organisations classiques du RFN est la présence systématique d'un pilote Systra en cabine de conduite. En plus des tâches habituelles du pilote qui sont de renseigner l'équipe de conduite sur les caractéristiques et particularités de la ligne, les PACE lui confient un rôle de surveillance de la voie et de ses abords ainsi que des tâches situées à l'interface entre les responsables Systra (Chef d'essai, chef de bord, opérateur LGV...) et l'équipe de conduite.

Une autre particularité concerne la répartition des responsabilités en matière de sécurité entre le chef d'essai et le CTT.

Les textes RFN et notamment les articles 105 et 106 de la directive OP 0518 donnent une responsabilité globale au chef d'essai en lui conférant une autorité sur toutes les personnes présentes à bord et limitent le champ des missions de l'équipe de conduite et du CTT essentiellement à des tâches de réalisation de gestes métier, d'application de la réglementation et de respect des prescriptions.

En revanche, l'article 11.7 des PACE semble donner au CTT une responsabilité globale sur la sécurité de la circulation du train d'essai :

« Le cadre transport traction ligne est le responsable de la sécurité de la circulation du train d'essai qu'il accompagne. »

Le BEA-TT ne se prononce pas sur l'interprétation qu'il faut donner à cette rédaction mais considère qu'une responsabilité aussi globale ne correspond pas aux compétences normalement attendues d'un CTT. En outre, une telle évolution aurait dû être mise en évidence, discutée entre donneur d'ordres et prestataire et formellement diffusée aux acteurs concernés, ce qui n'a pas été le cas.

Les fiches de postes du conducteur, du CTT, du pilote et du chef d'essai extraites des PACE ainsi que les articles correspondants de la directive OP 0518 sont données en annexe 2.

5.2.3 - Les missions de l'équipe de conduite et du pilote

Les missions de l'équipe de conduite

Elles consistent à :

1. recevoir par l'intermédiaire du pilote, avant chaque marche, la fiche de vitesse indiquant les vitesses à pratiquer tronçon par tronçon ;
2. en déduire, en fonction des performances du train et des caractéristiques de la ligne, la stratégie de conduite c'est-à-dire les points kilométriques et les modalités d'accélération et de freinage qui permettront de respecter la fiche de vitesse, sans dépasser les vitesses maximales mais aussi en balayant chaque tronçon, le plus exhaustivement possible, à la vitesse prescrite par la fiche de vitesse ;
3. partager et noter les PK et modalités décidées au point 2 ;
4. attendre l'autorisation de départ transmise par le pilote ;
5. mettre en œuvre la marche telle que prévue au point 2 ;
6. prendre en compte les aléas survenant pendant les parcours, les communications d'exploitation arrivant par la radio sol-train et les communications propres aux essais arrivant par l'interphone ;
7. rendre compte après chaque marche.

Les missions du pilote

Elles sont très réduites lorsqu'il accompagne une équipe de conduite ayant déjà acquis la connaissance des particularités de la ligne.

Essentiellement, avant chaque marche, il reçoit la fiche de vitesse des mains du chef d'essai et il la transmet au CTT. Le moment venu, il transmet au conducteur l'autorisation de départ reçue du chef d'essai puis, pendant le parcours, il surveille visuellement la voie et ses abords.

5.2.4 - La répartition des tâches en cabine

Avant la marche

La tâche 1 de la liste ci-dessus est attribuée au CTT par les PACE.

La tâche 2 n'est pas évoquée par les textes et aucune méthode pour la réaliser n'est donnée. Toutefois, il est clair pour tout le monde qu'elle est de la responsabilité du CTT.

La tâche 3 n'est pas évoquée non plus. La pratique est que le conducteur annote la feuille de marche à sa façon puis la dispose devant lui sur le pupitre.

Les méthodes d'annotation de la feuille de marche appartiennent à chaque conducteur. Le BEA-TT a pu consulter des feuilles de marche annotées par différents conducteurs. Certaines comportent des annotations soignées et explicites d'autres sont griffonnées et peu lisibles, Les modalités et les PK de freinage n'apparaissent pas systématiquement. Pour la marche 318-006, les deux freinages ne sont indiqués que de façon sommaire.

Pendant la marche

Comme indiqué plus haut, cette répartition n'est pas spécifiée dans le référentiel EAST.

Avec la répartition de principe donnée par les PACE, le conducteur conduit, le pilote surveille la voie et le CTT veille au respect des règles relatives à la sécurité des circulations. Le second conducteur n'est pas évoqué.

Or dans le cadre d'une marche de montée en vitesse, cette répartition de principe n'est pas applicable car le conducteur ne peut pas conduire seul en sécurité.

Son attention, est en grande partie accaparée par l'observation du tachymètre et par l'action sur les manipulateurs de traction et de freinage afin de tenir exactement la vitesse prescrite. En effet :

- si la vitesse du train est trop haute, il y a potentiellement risque de déraillement ;
- si la vitesse est trop basse, la montée en vitesse ne sera pas validée et la marche sera à refaire.

Il ne peut pratiquement pas observer la voie ni détecter de façon sûre les points singuliers et notamment les PK où un freinage doit être amorcé.

Il est donc nécessaire qu'une deuxième personne l'assiste en lui annonçant ces points et ces PK en temps utile et ce, avec une fiabilité absolue, car, en cas d'erreur, il n'y a pas de boucle de rattrapage de type contrôle de vitesse.

Une organisation officielle est donc amenée à se mettre en place au sein des équipages ; elle peut différer selon les personnes présentes et notamment selon le CTT en fonction. En général, c'est le CTT qui se charge d'annoncer les PK.

Selon la consigne EAST TT 01500, le CTT est aussi l'interlocuteur du chef d'essai pour les aspects sécurité et opérationnels. C'est donc lui qui répond à l'interphone en cas d'appel du chef d'essai.

Les différentes fonctions « temps réel » du CTT ne sont compatibles que si, pendant la marche, les appels extérieurs se limitent à des cas d'urgence impliquant un ralentissement ou un arrêt du train. Dans les autres cas et notamment si une prise de décision du CTT est nécessaire, il y a un risque qu'une de ses fonctions ne soit pas correctement remplie.

Les déclarations et divers éléments recueillis lors de cette enquête montrent que, le cas échéant, d'autres membres de l'équipage pouvaient assurer ou concourir à la fonction d'annonce des points singuliers et des PK, notamment au sein de l'équipage concerné. Toutefois, cette fonction ne peut être assurée avec un niveau de sécurité suffisant que si cette personne est clairement désignée, ce qui n'était pas le cas.

5.3 - Retour sur la marche 315-006 du 11 novembre 2015

Lors des entretiens avec les membres de l'équipage, plusieurs d'entre eux ont évoqué cette marche qui présente de nombreuses similitudes avec la marche 318-006 du 14 novembre et au cours de laquelle ils ont éprouvé des difficultés pour réaliser les paliers de vitesses qui leur étaient demandés.

5.3.1 - Les vitesses cibles

La marche 315-006 est, comme la marche 318-006, la marche de survitesse finalisant les essais dynamiques de la voie concernée (voie 1 le 11 novembre, voie 2 le 14 novembre).

Semblablement, la vitesse cible, (voir§ 6.1.3), comporte une marche en ligne à 352 km/h jusqu'au PK 398,770 puis un palier à 330 km/h.

À la différence de la voie 2, il y a un petit palier à 253 km/h correspondant à la zone à V 230 située entre les PK 403,351 et 403,729.

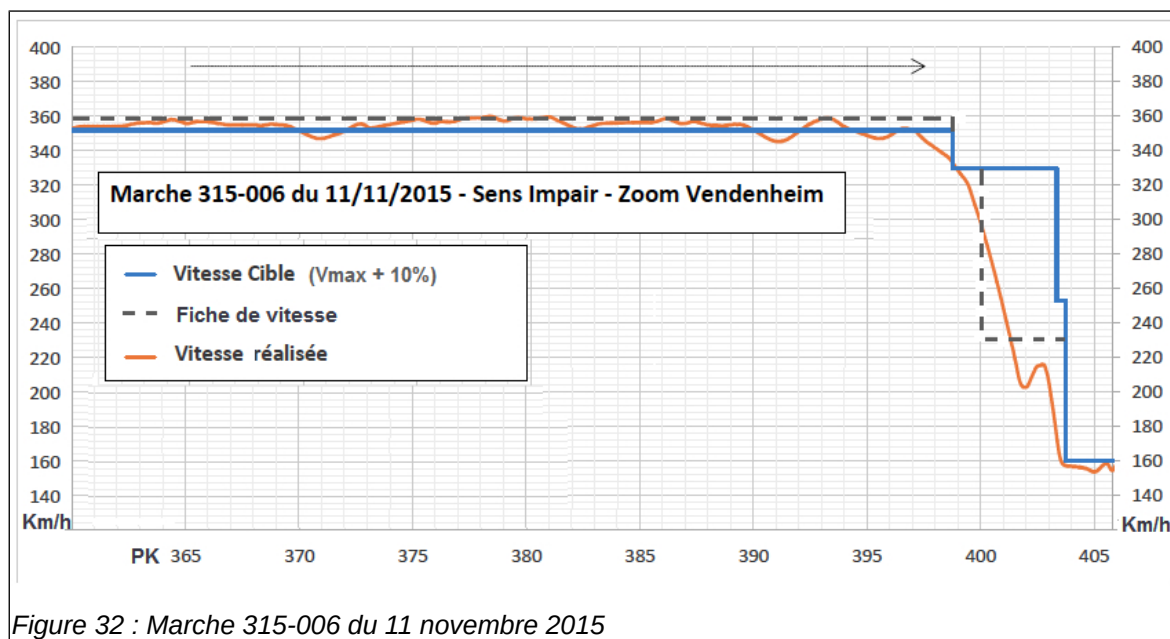
La sortie à partir du PK 403,729 est à 160 km/h.

La fiche de vitesse rédigée par le chef d'essai indique, en pleine ligne, une vitesse maximale de 360 km/h, conforme à la décision du 9 novembre 2015, puis un petit palier à 330 du PK 398,770 au PK 400 puis un palier à 230 km/h sans lien avec la vitesse cible.

La motivation de ce palier à 230 km/h n'a pas pu être expliquée.

En tout état de cause ces paliers à 330 et 230 n'étaient pas faisables en pratique car leurs seuils ne sont distants que de 1230 m alors qu'il faut plus de 2000 m pour passer de 330 à 230 km/h. Ils interrogent sur le réalisme des fiches de vitesse.

5.3.2 - Les vitesses enregistrées



Les données enregistrées montrent que la vitesse de 360 km/h n'est pas dépassée, sauf très ponctuellement de 1 km/h. Le palier à 330 km/h n'est pas du tout marqué et la vitesse sur cette section est largement en dessous de la vitesse cible. Le freinage se poursuit jusqu'à 200 km/h, puis la traction reprend sur 800 m à partir du PK 402. Enfin, un nouveau freinage permet de respecter le seuil à 160 km/h.

En revanche, par rapport à la fiche de vitesse, le début du palier à 230 km/h est largement dépassé.

À aucun moment la sécurité n'est compromise, ce palier ne correspondant à aucune réalité concrète, mais il montre que les méthodes utilisées par le chef d'essai pour

produire sa fiche de vitesse puis par l'équipage pour en déduire la stratégie de conduite ne sont pas fiables.

5.3.3 - L'enregistrement des conversations en cabine

Le BEA-TT a eu communication de la transcription des conversations enregistrées par la caméra du chef de bord Systra que ce dernier avait posée en cabine, à titre personnel, pour cette marche.

Cet enregistrement, dont des extraits ont été publiés dans la presse nationale fin juillet 2016, apporte des informations intéressantes sur le fonctionnement de l'équipage¹¹ et sa compréhension des enjeux et des objectifs qui lui sont assignés.

Les principales informations qu'en tire le BEA-TT sont les suivantes :

- L'équipage est conscient de la difficulté, mais il ne remet pas en cause la faisabilité ni la pertinence de la fiche de vitesse donnée par le chef d'essai. Pour la respecter au mieux, il vise à tangenter successivement les seuils de 330 et 230 km/h puis à marquer le palier à 230 avant de freiner pour le seuil de 160 km/h.
- Bien que la stratégie de freinage (PK, type de frein à utiliser, dépression à appliquer...) ait été décidée avant le départ et notée par le conducteur sur sa feuille de marche, celle-ci fait encore l'objet de discussions pendant le parcours, jusqu'à 5 min avant le premier freinage, entre le CTT, le pilote et le 2^e conducteur. Le conducteur titulaire, concentré sur sa conduite, ne participe pas à la discussion.
- Le CTT est inquiet pour le respect du seuil à 230 km/h, mais il n'arrive pas à faire prévaloir une position sécuritaire.
- La discussion est confuse ; l'équipage ne se rend pas compte clairement qu'il est impossible de tangenter les deux seuils successifs à 330 et 230 km/h, leur distance n'étant que de 1230 m.
- Lors de la première transition, le conducteur relâche légèrement son freinage pour tangenter le seuil à 330 km/h. Il déclenche ensuite un freinage maximal de service mais rapidement chacun se rend compte que le seuil à 230 km/h sera dépassé.
- Il s'efforce toutefois de recoller au palier à 230 puis reçoit l'ordre de freinage pour le palier à 160 qui est respecté.
- Après la fin du parcours sur LGV, les échanges avec le chef d'essai montrent que le dépassement du seuil à 230 km/h est accueilli plutôt favorablement car il permettra la validation de la marche.
- Ces échanges montrent aussi que ce dépassement de la vitesse prescrite, malgré son ampleur n'est considéré par personne comme un événement de sécurité comme il l'aurait été automatiquement sur le RFN.

5.3.4 - Les enseignements

L'élaboration de la fiche de vitesse par le chef d'essai est critiquable car elle comporte des seuils et des paliers injustifiés et qui ne peuvent pas être réalisés.

La préparation de la marche par l'équipage sous la direction du CTT manque de méthode. Les performances de freinage prises en compte ne comportent aucune marge de sécurité. Des erreurs de calcul mental font que la distance des deux seuils est évaluée à 1700 m alors qu'elle n'est que de 1230 m.

11 L'équipage est formé de l'équipe de conduite proprement dite et du pilote Systra.

Le départ est donné alors que les modalités exactes de freinage font encore l'objet de discussions.

Le CTT sent que le respect de la fiche de vitesse ne va pas être possible mais n'arrive pas à imposer une solution claire et sûre.

À l'instant T, les ordres de freinage sont donnés par plusieurs personnes et ne sont pas précis ce qui occasionne une mauvaise réaction du conducteur et aggrave le dépassement du seuil à 230 km/h.

À l'issue de la marche, le principal risque perçu par l'équipe d'essai et par l'équipe de conduite est que la marche ne puisse pas être validée par les experts faute d'une vitesse suffisante.

Plus globalement, il semble que les acteurs de cet événement ont perdu leurs repères fondamentaux. Les paliers de la fiche de vitesse étant parfois au-dessus et parfois en dessous de la vitesse cible, les membres de l'équipage ne savent plus clairement si ces paliers sont à considérer vraiment comme des vitesses maximales.

Il s'ensuit que la criticité de l'incident et la nécessité d'un retour d'expérience n'est perçue ni par l'équipe de conduite ni par Systra dont le chef d'essai indique RAS sur son rapport journalier du 11 novembre 2015. Or on peut penser qu'une analyse à froid de l'événement aurait permis de mettre en évidence les causes du dépassement et d'en tirer les conséquences.

6 - Les investigations sur les causes origines de l'événement

6.1 - Le processus d'autorisation de mise en exploitation commerciale de la LGVEE2

6.1.1 - Les principes régissant les évolutions du système ferroviaire

Le décret n° 2006-1279 du 19 octobre 2006 relatif à la sécurité et à l'interopérabilité du système ferroviaire stipule dans son article 43 que :

« Tout système ou sous-système nouveau est conçu, réalisé et, le cas échéant, modifié de telle sorte que le niveau global de sécurité après sa mise en œuvre soit au moins équivalent à celui résultant de la mise en œuvre de systèmes ou sous-systèmes existants assurant des services ou fonctions comparables ».

Cet article est la traduction réglementaire du principe GAME (Globalement Au moins Equivalent), apparu en France dans le domaine de la sécurité ferroviaire dès les années 1990, et qui a durablement structuré les esprits des acteurs français de la sécurité.

Les règlements européens n° 352/2009 puis n° 402/2013 « concernant la méthode de sécurité commune... » (MSC) prévoient désormais l'évaluation de l'acceptabilité des risques d'un système nouveau ou modifié selon au moins un des principes suivants :

- a) l'application de règles de l'art reconnues et pertinentes ;
- b) une comparaison avec un système similaire présentant un niveau de sécurité acceptable ;
- c) une estimation explicite des risques.

Bien que le principe GAME ne corresponde qu'à une (l'option b) des trois possibilités proposées par la MSC, il continue à être invoqué très fréquemment, notamment en cas de doute dans l'interprétation ou sur la pertinence des règles de l'art.

6.1.2 - Le processus d'autorisation

Une ligne nouvelle, comme tout système ou sous-système ferroviaire nouveau, ne peut être mise en service qu'après avoir obtenu son autorisation de mise en exploitation commerciale (AMEC) conformément aux prescriptions du Titre V du décret n° 2006-1279 relatif à la sécurité et à l'interopérabilité du système ferroviaire.

Cette autorisation est délivrée par l'établissement public de sécurité ferroviaire (EPSF) à l'issue d'un processus comportant notamment la production d'un dossier de sécurité démontrant le respect des normes et spécifications obligatoires et l'application de la méthode commune de sécurité.

Le décret prévoit également l'intervention d'un expert ou organisme qualifié agréé (EOQA) indépendant, chargé d'évaluer si la conception et la réalisation du système ou sous-système considéré permettront de respecter ces exigences.

La démarche aboutissant à l'AMEC est un processus lourd qui démarre très en amont, dès la phase de définition du projet et qui aboutit quasiment à la veille de sa mise en service. Dans ce cadre, le demandeur doit donc produire tous les éléments tels que dessins, notes de calculs, résultats d'essais, analyses de risques etc. permettant de démontrer le respect des exigences réglementaires à l'EOQA et à l'EPSF.

Il est clair que pour un projet aussi important qu'une LGV, le maître d'ouvrage qui est le demandeur de l'AMEC, ne voudra pas prendre le risque que l'AMEC lui soit refusée au motif que l'EOQA ou l'EPSF considère que le déroulement ou l'exhaustivité des essais dynamiques n'ont pas été conformes à ce qui était attendu.

6.1.3 - Les spécifications pour les essais dynamiques d'une LGV

La méthode visant à démontrer la sécurité, au sens de la dynamique ferroviaire, de la circulation sur une LGV par des essais successifs à vitesse croissante jusqu'à un essai final à une vitesse supérieure à la vitesse prévue pour la ligne (essai de survitesse) trouve son origine lors de la mise en service de la première LGV en 1981.

Le taux de survitesse décidé pour cette ligne a été de 30 km/h pour une vitesse prévue de 260 km/h.

Pour les LGV suivantes, dont la vitesse prévue était désormais égale ou supérieure à 300 km/h, ce taux de survitesse a été fixé à 10 %. Ce taux de 10 % a été justifié par la prise en compte du cumul des marges de fonctionnement et de réglage des différents systèmes de tachymétrie et de sécurité.

Cette méthode, interne à la SNCF, a été reprise sommairement dans le référentiel SNCF IN 3279 « Référentiel technique pour la réalisation des LGV – Partie équipements ferroviaires – Tome EF 1 Voie ferrée ».

6.1.2 Les essais dynamiques

Les essais dynamiques permettent la validation du sous-système voie pour la vitesse de circulation envisagée.

Les essais dynamiques doivent être réalisés :

- avec une rame homologuée pour les vitesses envisagées (ou plusieurs rames, pour les lignes à trafic mixte : voyageurs, marchandises, pendulaires...), instrumentée en conséquences,
- à une vitesse maximale supérieure d'au moins 10 % de la vitesse maximale d'exploitation envisagée, tout en circulant par paliers afin de garantir la sécurité de la rame d'essais,
- sur tous les itinéraires,
- par un organisme qualifié, garant de la qualité des mesures,
- en respectant les prescriptions de la « Consigne d'Essais » fournie par le MOA (précisant les mesures techniques, d'organisation, d'exploitation et de sécurité).

Pour chaque vitesse, les accélérations verticales et transversales en caisse et en bogie doivent être mesurées et analysées avant d'autoriser la circulation à un palier de vitesse supérieur.

Pour permettre le passage à un palier de vitesse supérieur, tout en respectant les critères de sécurité et de confort, des reprises de géométrie peuvent être effectuées (en fonction de l'analyse des enregistrements accélérométriques).

Ces essais font l'objet d'un **contrôle extérieur** (voir **chapitre 7.2.2**) portant sur les résultats techniques de la marche d'essai finale réalisée à V+10%.

Figure 33 : Extrait du référentiel SNCF IN 3279

Elle a ensuite été reprise et détaillée dans les 7 pages du chapitre 6 du document technique de l'Union Internationale des Chemins de fer (UIC) « Guide pour l'homologation de lignes à grande vitesse » de mai 2006.

6.7. Déroulement des essais dynamiques

Les essais dynamiques visent à contrôler le système de transport partant de parcours à vitesse limitée jusqu'à la vitesse maximale d'essai (vitesse d'exploitation ou de conception + 10%).

Le principe est de parcourir tous les itinéraires tant en voies principales que vers les raccordements et gares intermédiaires, par palier de vitesse à convenir (en principe déterminé par le système de signalisation ; par exemple 160, 200, 230, 270, 300, 320 et 352 km/h pour une ligne conçue pour 320 km/h) jusqu'à la vitesse signalée + 10%.

Après chaque parcours les différentes mesures et observations qui touchent le fonctionnement et la sécurité du système sont analysées par le chef d'essais qui peut se faire assister par des experts des sous-systèmes et comparées aux normes et tolérances en vigueur.

L'acceptation des mesures dudit parcours constitue un point de passage obligé pour entamer le parcours suivant.

En cas d'anomalie pouvant mettre en danger les installations et/ou le matériel roulant et de ce fait la sécurité, les parcours d'essais sont interrompus jusqu'à ce que l'anomalie soit levée (voir également chapitre 10).

Figure 34 : Extrait du référentiel UIC

À la différence du document SNCF, le document UIC évoque non seulement la vitesse d'exploitation mais aussi la vitesse de conception de la ligne.

6.1.4 - Les ambiguïtés des référentiels d'essais

Ces documents, destinés à des ingénieurs et techniciens, ne sont portés par aucun texte réglementaire et n'ont donc pas de caractère obligatoire.

Ils ne définissent pas la notion de « vitesse maximale d'exploitation » et notamment ne disent pas si cette vitesse doit tenir compte des seuils de vitesse qui seront imposés aux trains commerciaux par les systèmes de signalisation et de contrôle de vitesse.

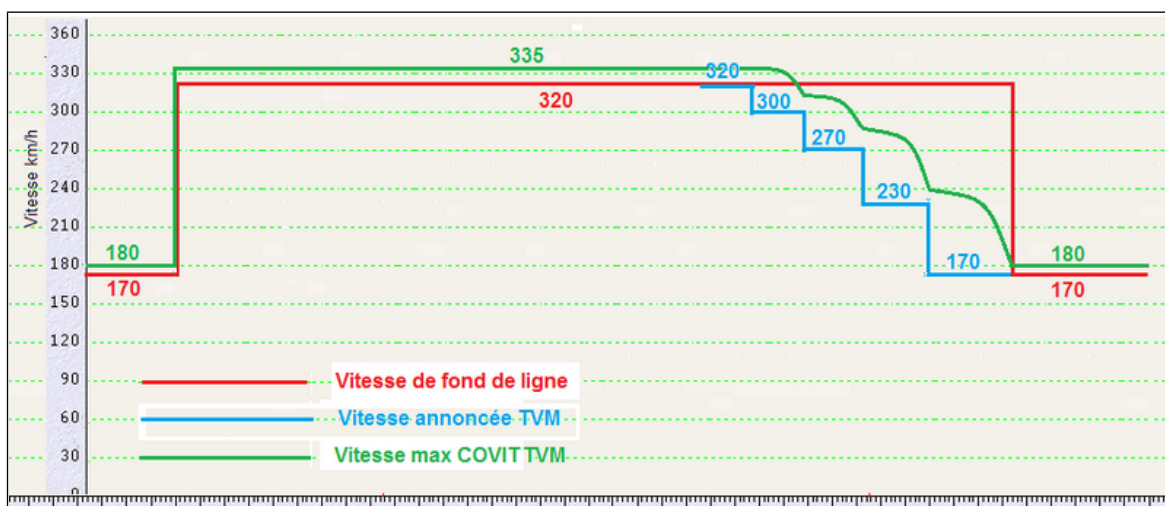


Figure 35 : Illustration de l'ambiguïté sur la vitesse maximale d'exploitation

Ces documents ne tiennent pas davantage compte du fait que les marches d'essais devront être réalisées par des trains réels qui ne peuvent pas tenir une vitesse exactement constante et dont les performances de freinage et d'accélération ne sont pas infinies.

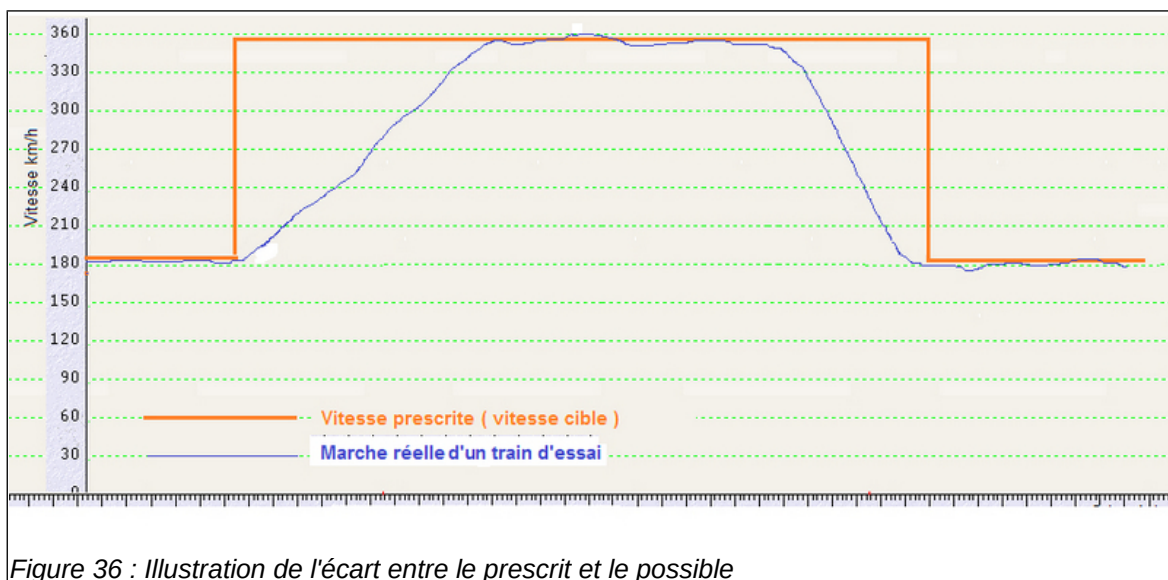


Figure 36 : Illustration de l'écart entre le prescrit et le possible

Notamment :

- ils ne précisent pas les tolérances à appliquer sur les vitesses prescrites ;
- ils ne disent pas comment traiter les zones de transition entre différentes vitesses (les angles du polygone des vitesses).

On voit qu'une application littérale de ces textes est impossible, pourtant ils sont devenus la référence pour les essais dynamiques dans le processus d'autorisation de mise en exploitation commerciale d'une ligne à grande vitesse.

6.1.5 - L'application du « principe GAME » aux essais dynamiques

Depuis la première LGV en 1981, la connaissance du comportement à grande vitesse du matériel et de la voie ont fait des progrès immenses. Pour beaucoup de phénomènes, les outils informatiques de simulation permettent de calculer la valeur des paramètres dynamiques sans faire d'essais exhaustifs.

N'ayant pas de caractère obligatoire, le principe ou les modalités des essais dynamiques auraient pu être remis en cause par le maître d'ouvrage mais il aurait fallu démontrer à l'EPSF et à l'EOQA* que la nouvelle méthode respectait la MSC*.

Une telle démonstration est difficile et son acceptation n'est pas garantie c'est pourquoi cette option n'a jamais été envisagée.

Une fois admis qu'on appliquerait l'IN 3279, l'interprétation de ses ambiguïtés se devait d'être au moins aussi stricte que pour les LGV précédentes, à savoir :

- la vitesse prescrite¹² sera la vitesse maximale d'exploitation + 10 % ;
- la vitesse maximale d'exploitation ne tiendra pas compte des réductions imposées par les systèmes susceptibles d'évoluer dans l'avenir tels que les systèmes de signalisation et de contrôle de vitesse et les détecteurs de boîtes chaudes (DBC) ;
- la tolérance sur la vitesse prescrite sera a priori égale à zéro c'est-à-dire qu'elle doit être tenue partout sauf aux endroits où c'est manifestement impossible. (Autrement dit, les angles du polygone des vitesses doivent être balayés aussi loin que possible).

* Terme figurant dans le glossaire.

¹² Également appelée vitesse cible.

Sans qu'à aucun moment, il n'ait été demandé explicitement aux équipes de conduite de prendre des risques, ceci a conduit à une pression sur ces équipes pour « tenir le trait » quitte à dépasser ponctuellement la vitesse prescrite.

Par exemple, compte tenu des capacités d'accélération de la rame et du profil difficile de la ligne, il s'est avéré impossible de tenir la vitesse prescrite de 352 km/h dans certaines zones en rampe. Il a alors été demandé aux équipes de conduite de monter à 360 km/h en amont de ces zones pour prendre de la vitesse et tenir le 352 km/h dans les zones en question.

Or, pour un tractionnaire, une vitesse prescrite est une vitesse maximale et n'est pas négociable ; la demande a donc été refusée par les CTT concernés car étant contraire à leurs règles. La question a été tranchée par une étude du centre d'ingénierie du matériel montrant que la vitesse de 360 pouvait être pratiquée sans danger.

La vitesse maximale pour ces marches a alors été officiellement modifiée et portée à 360 km/h, la vitesse cible pour la validation restant à 352 km/h.

De même, pour balayer au mieux chaque tronçon, il était sous-entendu qu'il fallait accélérer à fond en entrée de zone à grande vitesse et retarder autant que possible les freinages en sortie. Ceci suppose la détermination, par l'équipe de conduite, d'une stratégie de freinage permettant un balayage optimal de la zone sans compromettre la sécurité du train.

Compte tenu des particularités du freinage ferroviaire, cette détermination n'a rien d'évident.

6.2 - L'externalisation des essais dynamiques

Comme indiqué plus haut, le maître d'ouvrage a confié l'intégration des essais dynamiques de la LGVEE2 à la société Systra qui elle-même a externalisé notamment la conduite du train via Eurailtest.

Ce choix, qui avait donné satisfaction pour la première phase de la LGVEE et pour la LGV Rhin-Rhône, implique une grande co-activité entre des entreprises ayant des pratiques différentes et accroît le nombre d'intervenants dans une relation contractuelle complexe comme indiqué au point 2.4.4.

Concrètement, il a entraîné un certain nombre de conséquences.

6.2.1 - L'organisation opérationnelle :

Deux chefs d'essai sur la rame

Le chef d'essai Systra n'étant pas habilité selon l'OP 0518, il ne peut pas assurer cette fonction sur les voies du RFN et notamment lors des parcours d'approche et de sortie de la zone d'essai. Dans une marche d'essai de Meuse-TGV à Strasbourg-Ville comme la 318-006, le chef d'essai Systra n'était théoriquement en responsabilité qu'entre les raccordements de Baudrecourt et de Vendenheim, le chef d'essai AEF étant en charge des parcours RFN de Meuse à Baudrecourt et de Vendenheim à Strasbourg-Ville.

Dans la pratique, le chef d'essai Systra dirigeait l'ensemble du parcours et se référait au chef d'essai AEF pour les décisions concernant le RFN. Ce mode de fonctionnement qui s'était mis en place depuis le début de la campagne n'était pas décrit dans les référentiels¹³.

13 Il est rappelé que dans ce rapport, le terme chef d'essai désigne le chef d'essai Systra.

Présence systématique d'un pilote en cabine

Dans une organisation classique, un pilote n'est requis que lors des premières circulations pour faire connaître les particularités de la ligne aux premières équipes de l'EAST. Dans le cas de la LGVEE, le choix a été fait de le maintenir pendant toute la durée de la campagne en lui confiant des tâches d'interface entre le CTT et les responsables opérationnels Systra dont le chef d'essai. Ses tâches officielles étant très limitées, il ne restait pas inactif et concourait dans la pratique au travail de l'équipe de conduite constituant avec elle un équipage dont les interactions étaient variables et non-spécifiées.

Absence de concertation systématique entre chef d'essai et CTT

Avant chaque marche, la fiche de vitesse est remise par le chef d'essai au pilote qui la transmet à l'équipe de conduite. Il n'y a donc pas de contact direct et de concertation entre chef d'essai et CTT sur la faisabilité ou les particularités de la marche demandée.

Report de responsabilités vers le CTT

La direction de l'essai et la conduite du train n'étant pas assurées par la même entreprise, la répartition des responsabilités a dû être précisée. Elle l'a été en reportant sur le prestataire Traction une responsabilité globale de sécurité de la circulation dont les CTT concernés n'ont pas eu conscience et pour laquelle ils n'étaient pas formés.

6.2.2 - La maîtrise dans la conception des marches et leur réalisation

La conception, l'organisation et la réalisation des marches d'essais reposent sur un ensemble de métiers très spécifiques qui ne peuvent être maîtrisés que dans des organismes qui les exercent régulièrement et depuis un temps suffisant pour capitaliser l'expérience.

Cette expérience et les pratiques qui en découlent ne sont pas toujours formalisées dans des documents. La connaissance et la maîtrise de ces bonnes pratiques suppose donc une certaine expérience individuelle.

Par exemple, lors des entretiens à l'AEF et à l'EAST, plusieurs interlocuteurs ont affirmé qu'il n'était pas dans leurs pratiques d'enchaîner en survitesse la pleine ligne et le raccordement de sortie. Il en va de même du bon usage de l'interphonie pendant les marches.

Or si l'encadrement mis en place par Systra avait, pour la plupart, déjà participé à plusieurs campagnes, le chef d'essai Systra, qui avait l'essentiel des responsabilités opérationnelles à bord, en était à sa première campagne alors que le chef d'essai de l'AEF qui n'avait qu'un rôle limité avait une ancienneté de plus de 20 ans aux essais dont 9 ans comme chef d'essai.

6.2.3 - Le relationnel entre l'intégrateur Systra et l'EAST

Dans le cadre de la campagne concernée, les relations entre les personnes étaient bonnes ; toutefois les signalements faits par les CTT à leur hiérarchie, montrent que certains problèmes se posaient de façon persistante tels que le respect des amplitudes journalières de conduite, l'accès des visiteurs aux cabines de conduite et l'interprétation des limites de vitesse à respecter. La remontée des problèmes vers l'intégrateur et son traitement sont complexifiés par l'absence de lien direct entre l'EAST et Systra due à la présence de l'étage contractuel Eurailtest.

Pour les campagnes d'essais réalisées en interne à la SNCF, l'AEF qui assure la maîtrise d'œuvre et l'EAST ont mis en place des procédures communes et des dispositifs de

retour d'expérience et d'amélioration. Dans ce cadre, les interfaces sont fluidifiées et le traitement des problèmes est facilité.

6.3 - Le planning de la campagne d'essais dynamiques

Le déroulement était en phase avec le calendrier prévu.

Le 14 novembre 2015 était normalement le dernier jour des essais de montée en vitesse.

Cette journée avait été programmée en remplacement des journées des 12 et 13 novembre annulées en raison du manque de sillons disponibles.

La campagne d'essais se poursuivait au-delà de cette date pendant les semaines 47 et 48 avec des essais de nuit concernant les systèmes de radio et de contrôle commande.

Ensuite, les semaines 49 et 50 étaient en réserve et permettaient de programmer des marches de montée en vitesse en cas de besoin.

L'examen des plannings journaliers montre des temps de retournement entre deux marches souvent inférieurs à 20 min et pouvant descendre jusqu'à 10 min.

Pour la journée du 14 novembre, le temps de retournement avant la marche 318-006 était de 23 min.

Dans la matinée, le temps de retournement avant la marche 318-003 était de 12 min.

Les plannings journaliers apparaissent donc exagérément serrés par rapport aux échéances du projet, avec des temps de retournement souvent insuffisants pour permettre une préparation correcte de la marche suivante.

6.4 - Les personnes présentes à bord

53 personnes étaient présentes à bord du train :

- 18 agents opérationnels (8 Systra et 10 SNCF). Ce sont ceux qui constituent l'équipe de conduite et l'équipe d'essai et qui assurent les différentes fonctions techniques et logistiques nécessaires au déroulement des marches d'essais.
- 16 agents non opérationnels (7 Systra et 9 SNCF). Ce sont essentiellement des dirigeants ou des membres des différentes entités impliquées dans la maîtrise d'ouvrage, la maîtrise d'œuvre, les études ou la réalisation de la LGVEE mais n'ayant pas de fonction opérationnelle à bord le 14 novembre.
- 19 invités extérieurs, essentiellement des parents ou des amis des précédents. Ces invités se trouvaient, pour 16 d'entre eux en remorque R3, 1 en remorque R2 et 2 en cabine arrière afin de ne pas gêner le travail des agents opérationnels en cabine de conduite et en remorque R1.

La présence d'agents non opérationnels ou d'invités extérieurs sur un train d'essais n'est pas anormale ou inhabituelle, qu'il s'agisse de montées en vitesse sur ligne nouvelle ou de matériels nouveaux sur les voies du RFN.

Ce sont le plus souvent des personnes impliquées, à différents niveaux, dans le projet ou des dirigeants d'entité effectuant des tournées de veille ou de contrôle sur leurs agents impliqués dans la campagne d'essais (agents de conduite, chefs d'essai, ingénieurs et techniciens...).

Ce peut être aussi des personnes extérieures au projet, invitées dans le cadre d'actions de communication institutionnelles ou intéressées à titre personnel ou simplement des relations professionnelles ou personnelles.

Pour gérer leur nombre et s'assurer de leurs motivations, leur accès est soumis à une procédure d'autorisation préalable et leur montée dans la rame est contrôlée.

Dans le cas de la campagne d'essais de la LGVEE2, leur nombre maximal est de 20 personnes et les modalités d'autorisation et d'accès sont décrites dans les PACE*.

La liste des personnes autorisées est éditée la veille et annexée à l'avis journalier d'essai du jour. Le contrôle d'accès des personnes et leur gestion à bord relève des missions du chef de bord Systra.

La logistique Systra assure la fourniture des repas à l'ensemble des personnes à bord, y compris les invités.

Les témoignages indiquent que le 14 novembre, dernier jour de la campagne de montée en vitesse, du vin a été proposé aux invités lors du repas de midi.

Dans un tel cas, il appartient aux personnes assurant des fonctions de sécurité sur la rame de s'abstenir. Tel a été le cas comme le prouvent les analyses sanguines effectuées dans le cadre de l'enquête de gendarmerie qui ont conclu à une alcoolémie nulle.

Au total, il n'apparaît pas que l'accueil de personnes invitées à bord de la rame d'essai soit contraire aux règles en vigueur et ait eu un lien de causalité avec la survenue de l'accident.

En revanche, il est indéniable que la gravité des conséquences en a été alourdie puisque notamment deux d'entre elles sont décédées dans l'accident.

* Terme figurant dans le glossaire.

7 - Les mesures de sécurité pour la reprise des essais

7.1 - Les mesures prises pour la reprise des essais sur LGVEE2

Afin de finaliser la campagne d'essais en vue d'une mise en exploitation commerciale de la ligne en juillet 2016, Systra et la SNCF, en lien avec la mission présidée par André-Claude Lacoste, ont pris conjointement des mesures de sécurité complémentaires et ont modifié certaines procédures d'essais et les documents afférents.

Ces mesures ont été communiquées le 19 février 2016 à l'EPSF (en annexe 8) pour une reprise des essais le 29 février 2016.

Les principales mesures susceptibles d'être pérennisées sont les suivantes.

- renforcement de la préparation pré-opérationnelle des marches. La feuille de marche, préparée à l'avance par le chef d'essai, fait désormais apparaître sous forme graphique, la vitesse cible, la vitesse maximale et les zones de freinage. Cette feuille de marche est traduite à l'avance par l'équipe de conduite en une fiche train formalisée.
- renforcement de la préparation opérationnelle. Le briefing organisé entre l'équipe d'essai et l'équipe de conduite immédiatement avant chaque marche permettra de partager une dernière fois la feuille de marche et la fiche train associée et d'y apporter les ajustements éventuels pour tenir compte des résultats des marches précédentes. Les modalités de ce briefing ont été formalisées et sa durée a été portée à 40 min pour les marches en survitesse.
- limitation stricte des accès en cabine et renforcement des conditions d'accès à bord.
- amélioration de la description du rôle de chacun des acteurs.
- en cours de marche, interdiction des appels en direction de la cabine hors nécessité d'urgence et interdiction des modifications de marche.
- constitution d'une documentation commune, partagée par tous les acteurs et facilement accessible.

En outre, spécifiquement pour la fin de la campagne de la LGVEE2, il a été décidé de remettre en service le contrôle de vitesse (COVIT) ce qui a pour effet d'interdire les marches en survitesse. En l'absence de ces marches, des résultats de simulations ont été pris en compte pour l'autorisation de mise en exploitation du raccordement de sortie V2 détérioré lors de l'accident.

7.2 - Les mesures annoncées pour les campagnes ultérieures

La SNCF a publié le 18 juillet 2016 le rapport réalisé à la demande des présidents de SNCF Réseau et SNCF Mobilités par André-Claude Lacoste et Jean-Luc Wybo.

SNCF Réseau et SNCF Mobilités se sont également engagées à mettre en œuvre les recommandations qu'il comporte et qui sont reprises en annexe 9 au présent rapport.

8 - Le déroulement de l'événement

8.1 - Remarque préalable

Les témoignages et les déclarations des différents acteurs ne sont pas entièrement cohérents ni entre eux ni avec certains documents et enregistrements.

Au moment de la rédaction du présent rapport, il reste donc un certain nombre d'incertitudes sur le rôle et les actions de chacun dans le déroulement de l'événement décrit ci-après. Il n'appartient pas au BEA-TT de lever ces incertitudes lorsqu'elles ne font pas obstacle à la recherche de voies d'amélioration et à la formulation de recommandations pertinentes.

8.2 - Déroulement de l'événement

Le 14 novembre 2015, la campagne d'essais dynamiques de la deuxième phase de la ligne à grande vitesse est-européenne qui dure depuis septembre touche à sa fin avec les derniers essais de survitesse de la voie 2 qui sont prévus pour l'après-midi.

Trois jours avant, le 11 novembre lors des essais de survitesse de la voie 1, la dernière marche, numérotée 315-006, comportait des paliers de vitesse successifs erronés et en pratique infaisables, à la sortie de la LGV entre le PK 397,770 et le PK 403,809.

Pour tenter cependant de réaliser la marche comme demandée, la stratégie de conduite conçue par l'équipage était compliquée et irréaliste.

Lors de cette marche, le balayage de ces paliers n'a finalement pas pu être réalisé et un seuil de vitesse de 230 km/h a été largement dépassé, sans conséquence pour la sécurité de la circulation.

À l'issue de cette journée, le cadre traction et le pilote ont signalé verbalement au chef d'essai les difficultés rencontrées. Le dépassement a été accueilli plutôt favorablement et la marche a été validée. Le chef d'essai a indiqué RAS sur son compte rendu journalier et aucun retour d'expérience sécurité n'a été effectué.

L'avis journalier d'essais (AJE) du 14 novembre comporte 7 marches numérotées 318-001 à 318-007, les marches 001 et 002 étant des marches d'acheminement, les marches 318-003 à 318-006 des marches de survitesse sur voie 2, et la marche 318-007 une marche de réserve ou de retour vers Paris.

Les marches de survitesse 318-004 et 318-006, dans le sens Paris-Strasbourg, ont un polygone de vitesses plus simple que celles du 11 novembre, mais elles comportent encore entre les PK 398,770 et 403,809 un palier à 320 km/h pour la marche 318-004, puis à 330 km/h pour la marche 318-006, suivi d'une zone à 176 km/h.

L'équipement en personnel de la cabine de conduite est constitué de deux conducteurs qui alternent à chaque marche, un cadre traction, un pilote et un technicien signalisation.

L'AJE inclut aussi la liste des personnes autorisées à accéder au train d'essais au cours de la journée. Cette liste prévoit la présence de 19 personnes invitées extérieures.

Les trois premières marches se déroulent sans incident et conformément au programme.

La marche 318-004 est une marche en survitesse avec une vitesse maximale de 340 km/h. Pour cette marche, la stratégie de freinage prévoit un freinage rhéostatique à la vue du PK 397, puis un freinage pneumatique à 1,5 bar (freinage maximal de service) à la

vue du PK 400, selon certaines déclarations, ou au PK 401 selon une fiche de vitesse retrouvée sur place.

Le freinage électrique est réalisé au PK 396,700, ce qui est conforme à la stratégie convenue, mais le freinage pneumatique est déclenché par erreur au PK 398,600 donc beaucoup plus tôt que prévu.

Le BEA-TT pense que cette erreur est due au fait que l'annonce des freinages était faite à la vue des panneaux PK situés au bord de la voie et non pas en consultant l'odomètre de cabine. Ces panneaux jaunes sont bien visibles de loin mais la vitesse ne permet pas de lire les chiffres inscrits. Il est donc possible de confondre un panneau avec un autre.

Le manque d'organisation de l'équipage a fait que personne ne s'est rendu compte de cette erreur d'annonce.

Le seuil à 320 km/h est tangenté et la vitesse de 176 km/h est atteinte environ 2 kilomètres avant le seuil prescrit. Cette marche est validée par les experts présents dans la rame autorisant ainsi la montée en vitesse pour la marche finale.

La coupure déjeuner est réalisée après cette marche.

Le programme reprend à 13 h 20 avec la marche 318-005 de Strasbourg à Meuse. Pendant ce parcours, le seul fait notable est la demande formulée en cours de route par le chef d'essai de porter de 320 km/h à 340 la vitesse prescrite entre les PK 273 et 279, ce que le CTT refuse.

À l'arrivée à Meuse, le temps de retournement de 23 min prévu au programme est respecté.

Le technicien signalisation de Systra est le premier à changer de cabine. Ensuite, le conducteur prévu pour la marche suivante quitte le premier la cabine de conduite avec le pilote pour se rendre à l'autre extrémité du train et mettre en service la cabine de conduite correspondante. Au passage, le pilote récupère la fiche de vitesse de la marche suivante auprès du chef d'essai

Pendant ce temps, le conducteur sortant met hors service sa cabine avec le CTT.

Le CTT gagne l'autre cabine où il constate la présence de deux personnes invitées.

Malgré sa réticence initiale, il accepte finalement la présence de ces personnes auxquelles il donne des consignes de comportement et qu'il place derrière lui.

Ensuite, l'équipage se concerte pour traduire la fiche de vitesse qu'il vient de recevoir en actions de conduite.

Une discussion a lieu concernant la stratégie de freinage à adopter pour réaliser le palier de vitesse à 330 km/h en sortie de LGV.

Pour satisfaire le souhait exprimé par la maîtrise d'œuvre de mieux balayer ce palier et compte tenu de la marge de 2 km constatée lors de la marche 318-004, il est décidé de reporter le point de déclenchement du freinage maximal de service.

La teneur de cette discussion n'a pas pu être clairement établie par l'enquête, la compréhension et le souvenir qu'en ont les différents acteurs n'étant pas cohérents.

Il semble qu'il y ait eu un malentendu sur la stratégie de freinage.

Pour le CTT, la stratégie adoptée consiste à freiner au frein électrique à la vue du PK 397 puis de freiner au frein pneumatique à 1,5 bar sans relâcher le frein électrique.

Selon le conducteur, il est convenu de relâcher le frein électrique, une fois la vitesse tombée à 330 km/h, puis de se maintenir à 330 km/h jusqu'au point de déclenchement du freinage pneumatique.

En tout état de cause, le point convenu pour le déclenchement du freinage pneumatique est le PK 402.

Le deuxième conducteur arrive après la discussion ci-dessus et n'a qu'une compréhension partielle de la stratégie décidée au vu de la feuille de marche annotée sommairement par le conducteur titulaire.

Personne n'est désigné formellement pour assurer l'annonce des points de freinage.

Le départ est donné à 14 h 28.

À la première pancarte kilométrique, l'odomètre de bord est recalé par rapport aux PK de la ligne.

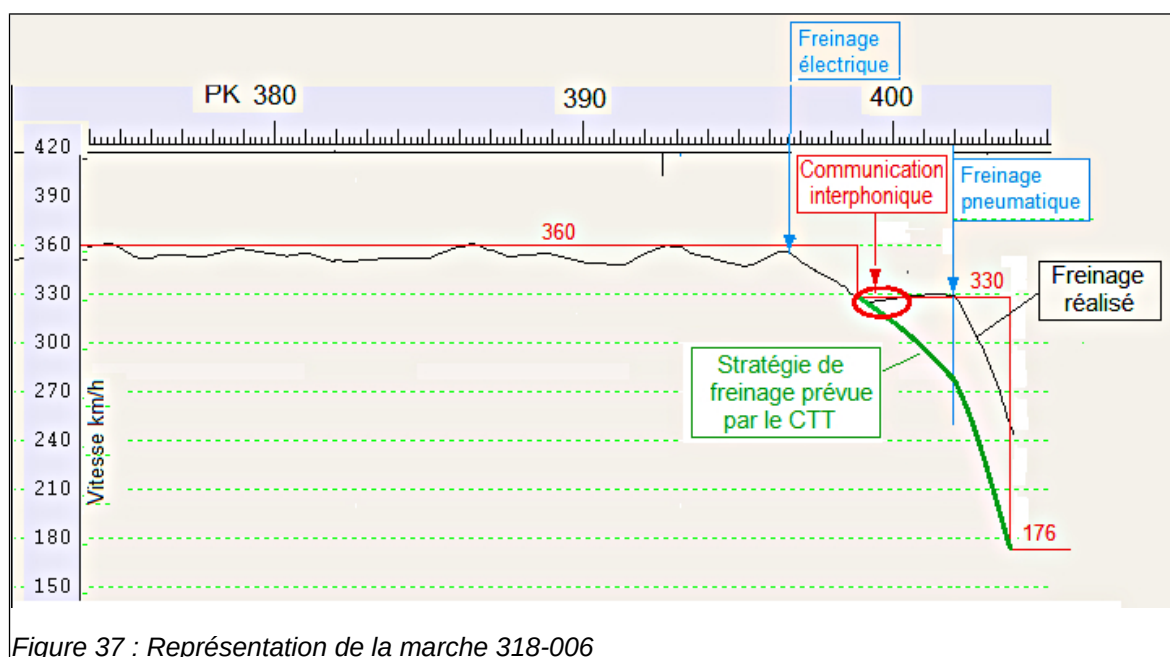
Le début du parcours se déroule normalement ; l'ambiance en cabine est calme ; les deux invités sont silencieux et ne perturbent pas le travail de l'équipage.

À l'approche du PK 397, le deuxième conducteur effectue l'annonce du premier point de freinage.

Le conducteur déclenche le freinage électrique au PK 396,800. Il lui superpose un bref freinage pneumatique pour respecter le seuil du PK 398,770 puis relâche les freins pour balayer le palier à 330 km/h. Il tractionne légèrement pour se maintenir à cette vitesse.

Simultanément, l'équipage reçoit un appel interphonique du chef d'essai en vue de reporter le point de transition 176/160 km/h au-delà de l'aiguille 702 de raccordement au RFN.

Le CTT répond au chef d'essai. Il comprend mal ses propos ; il doit se pencher vers le haut parleur de l'interphonie. Cette demande perturbe le CTT car elle implique un dépassement de la vitesse maximale autorisée sur le RFN.



Le CTT ne se rend pas compte que le conducteur a relâché son freinage et que le train roule toujours à 330 km/h.

Apparemment, personne n'est conscient d'aller vers un dépassement catastrophique de la vitesse prescrite à l'entrée de la zone à 176 km/h.

L'approche du PK 402 est annoncée normalement et le freinage pneumatique est déclenché au PK 402,050, donc au point prévu mais bien trop tard par rapport à la vitesse réelle du train.

Le conducteur positionne par inadvertance son manipulateur de freinage sur la position Urgence. Il s'en aperçoit aussitôt et revient en freinage maximal de service comme prévu.

Il effectue normalement le « baisser panto » du PK 403,208.

L'entrée de la zone à 176 km/h, située au PK 403,809, est franchie à 265 km/h.

La pleine courbe de rayon 945 m est abordée à 255 km/h.

Le train commence à se renverser environ 100 m avant l'entrée du pont qui est située au PK 404,226 et qui est franchie à 243 km/h.

9 - Analyse des causes et orientations préventives

9.1 - Les causes de l'événement

9.1.1 - Les causes directes

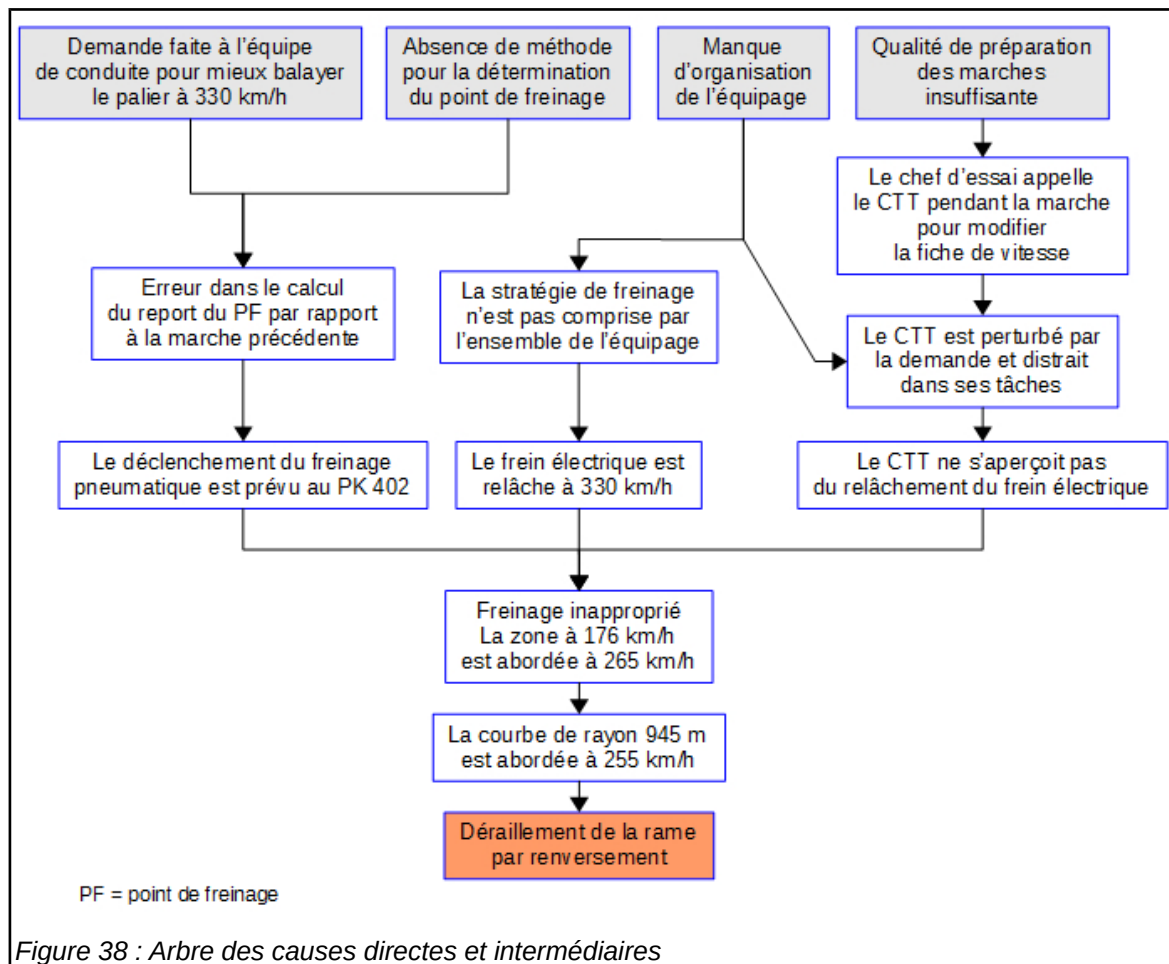


Figure 38 : Arbre des causes directes et intermédiaires

La cause directe de l'accident est la vitesse de 255 km/h dans une courbe serrée de 945 m de rayon.

Cet excès de vitesse est dû à un freinage inapproprié par rapport à la vitesse initiale du train pour aborder la zone à 176 km/h située à la sortie de la ligne à grande vitesse, juste avant la courbe en question.

Ce freinage inapproprié est lui-même le produit de trois chaînes causales :

- une stratégie de freinage inadaptée, résultant d'un raisonnement erroné et prévoyant un freinage pneumatique au PK 402 pour respecter le seuil de 176 km/h au PK 403,809 ;
- une incompréhension entre le CTT et le reste de l'équipage sur les modalités du freinage se traduisant par le relâchement du frein électrique par le conducteur et le maintien de la vitesse de 330 km/h jusqu'au déclenchement du freinage pneumatique ;
- un appel interphonique pendant le freinage qui a perturbé le CTT et l'a empêché de voir que le frein électrique avait été relâché contrairement à la stratégie qu'il avait prévue.

9.1.2 - Les causes origines

Pour rechercher les orientations préventives, le BEA-TT a établi un arbre des causes origines représenté dans la figure ci-après.

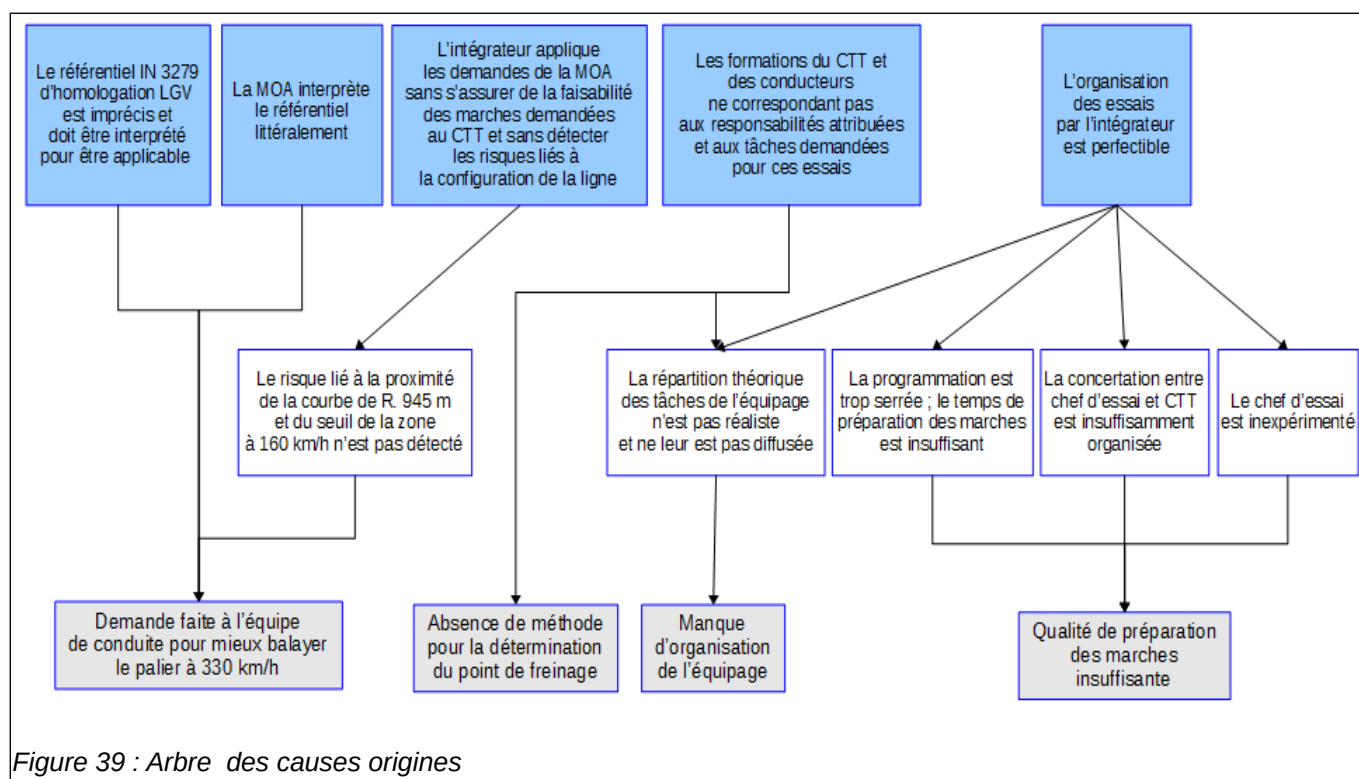


Figure 39 : Arbre des causes origines

9.2 - Les orientations préventives

9.2.1 - Le référentiel d'homologation des LGV

L'application littérale du référentiel d'homologation IN 3279 a abouti à demander à l'intégrateur¹⁴, puis à l'équipe de conduite, de balayer aussi exhaustivement que possible, chaque tronçon de la ligne avec une survitesse de 10 % et sans tenir compte des réductions de la vitesse maximale des trains imposées par les systèmes de signalisation, de contrôle de vitesse et de détection des boîtes chaudes.

Elle a poussé l'équipe de conduite à retarder au maximum ses freinages, prenant ainsi inconsciemment des risques excessifs.

Lors des homologations des LGV récentes, les marches de survitesse n'ont pas mis en évidence de problème supplémentaire par rapport aux marches à vitesse normale et les outils actuels de simulation permettent de calculer la valeur de la plupart des paramètres dynamiques pour une vitesse V+10 % en se limitant à des essais à la vitesse V.

Toutefois, on peut admettre que des marches en survitesse à V+10 % soient utiles, notamment pour vérifier l'étalonnage des outils de simulation, pour s'assurer qu'un problème nouveau lié à des innovations technologiques ne va pas apparaître ou qu'un phénomène à seuil ne va pas se déclencher. Dans certains cas, en lien avec la recherche ferroviaire, des survitesses plus fortes peuvent même être nécessaires.

¹⁴ Terme défini à l'article 2.4.4.

La conviction du BEA-TT est que ces marches en survitesse n'ont pas besoin d'être exhaustives au point de vouloir balayer chaque tronçon de la ligne ni, a fortiori, de vouloir s'approcher des extrémités de chaque palier de vitesse.

Par ailleurs, si l'on peut comprendre le souhait du maître d'ouvrage de viser une homologation qui ne soit pas liée à un système de signalisation particulier comme la TVM où à des systèmes de sécurité susceptibles d'évoluer dans l'avenir, il n'est pas souhaitable d'en faire entièrement abstraction au point de vouloir balayer les extrémités de la partie à grande vitesse au plus près des transitions de sortie.

Un maître d'ouvrage peut difficilement prendre sur lui d'interpréter a minima un référentiel comme l'IN 3279 qui a acquis, au travers du « Guide pour l'homologation des lignes à grande vitesse » de l'UIC, le statut de règle de l'art internationalement reconnue.

Ce faisant, il risquerait de voir son dossier de sécurité déclaré non-conforme par l'EOQA puis refusé par l'EPSF. C'est pourquoi le BEA-TT considère donc que le référentiel d'homologation des lignes nouvelles doit donc être revu ou que son interprétation doit être clarifiée.

Dans cet esprit, le BEA-TT a invité, dans sa note d'étape du 5 février 2016, la SNCF et l'EPSF à s'interroger sans attendre sur les règles d'homologation des lignes nouvelles.

Faisant suite à cette demande, SNCF Réseau a engagé une démarche visant à rendre possible l'aménagement des prescriptions de vitesse d'essai du chapitre 6 de l'IN 3279.

Cette démarche a abouti à la rédaction d'une lettre de directives datée du 27 juin 2016 et concernant les LGV Est-Européenne phase 2, Sud-Europe-Atlantique et Bretagne-Pays de Loire. Cette lettre s'appuie sur les principes suivants :

- le principe des circulations en survitesse à $V + 10\%$ est maintenu pour les vitesses supérieures à 230 km/h ;
- la vitesse d'exploitation (V) à prendre en compte dans le calcul du $V + 10\%$ sera la vitesse nominale permise par le système de contrôle de vitesse ou de signalisation ;
- une modélisation du comportement dynamique (à $V + 15\%$) pourra être prise en compte pour les portions de voie où la vitesse prescrite n'a pu être atteinte ponctuellement.

À l'issue de l'expérimentation de ces nouvelles dispositions sur les LGV concernées, un retour d'expérience sera réalisé en vue de leur intégration dans le référentiel IN 3279.

Parallèlement, SNCF Réseau a engagé une action au niveau international pour faire évoluer le guide UIC concerné.

Compte tenu des actions engagées, le BEA-TT formule la recommandation suivante :

Recommandation R1 (SNCF Réseau et EPSF) :

Mener à terme la démarche en cours de clarification et d'aménagement des prescriptions d'homologation des lignes à grande vitesse incluses dans le référentiel SNCF IN 3279.

Les porter au niveau international, à l'UIC par SNCF Réseau et à l'ERA par l'EPSF.

9.2.2 - Les analyses préliminaires de risque

Contrairement aux essais sur le RFN qui sont autorisés par une autorité externe au demandeur, à savoir l'EPSF, les essais dynamiques d'une ligne nouvelle hors RFN ne font l'objet que d'une procédure interne au maître d'œuvre de ces essais.

Le système de management de la sécurité de Systra prévoit qu'une analyse prévisionnelle de risques (APR) soit réalisée avant le lancement de ces essais.

L'APR de la campagne d'essais LGVEE2 identifie le risque de dépassement de vitesse pendant les marches en survitesse avec inhibition du contrôle de vitesse. Elle identifie aussi les risques liés aux circulations sans TVM.

Toutefois, cette APR a un caractère formel et généraliste, sans prise en compte des dangers spécifiques liés aux particularités de la ligne. Le risque de déraillement lié à la présence d'une courbe sévère immédiatement après la transition de sortie de 330 à 176 km/h n'est pas identifié.

Toute la campagne se déroule sans que les acteurs soient conscients qu'un excès de vitesse à cet endroit aurait des conséquences catastrophiques, ce qui a eu très probablement des conséquences sur leur représentation des risques et des enjeux.

Recommandation R2 (Systra) :

Améliorer les méthodes d'analyse préliminaire des risques de façon à rechercher efficacement les dangers liés aux particularités de la ligne en lien avec la campagne d'essais envisagée. Informer les acteurs des risques particuliers identifiés.

Le BEA-TT invite l'ensemble des maîtres d'œuvre d'essais ferroviaires opérant sur les lignes en projet sur le territoire national à s'assurer de même de la qualité de leurs méthodes.

9.2.3 - La qualification des membres des équipes de conduite d'essais

La conduite des trains commerciaux sur le RFN est un travail essentiellement solitaire qui suppose l'application rigoureuse d'un ensemble de prescriptions réglementaires non négociables, avec une signalisation et des systèmes de sécurité en service, dans un environnement connu.

La conduite de certains trains d'essais tels que, par exemple, les essais de réception des matériels neufs, sont assez proches de la conduite d'un train commercial et ces essais ne supposent pas d'isoler les systèmes de sécurité ni de s'affranchir de la signalisation.

En revanche, la conduite des trains d'essais, lors des montées en vitesse sur ligne nouvelle et particulièrement lors des marches en survitesse, implique un travail en équipage, des modes opératoires et des responsabilités qui n'ont guère de points communs avec la conduite d'un train commercial.

En outre, le CTT doit être capable d'estimer si les marches demandées par le chef d'essai sont réalisables en sécurité et si nécessaire d'opposer un refus tout en étant réceptif aux arguments techniques des experts concernés.

Au total, il ne suffit pas d'être un très bon conducteur ou un CTT rigoureux et expérimenté pour avoir les aptitudes correspondantes. Or le système de management de l'EAST ne prévoit pas de système de formation ni d'habilitation spécifique pour les conducteurs et les CTT ayant à assurer ces fonctions.

Recommandation R3 (SNCF Mobilités) :

Mettre en place un système de sélection, de formation et d'habilitation des conducteurs et des CTT d'essai permettant de garantir la fourniture d'équipes de conduite dont les aptitudes et les qualifications soient cohérentes avec les particularités, la complexité et le niveau de risque des essais envisagés.

Le BEA-TT invite les autres entreprises ferroviaires susceptibles de réaliser des circulations d'essais sur le RFN à mettre également en œuvre cette recommandation.

9.2.4 - Les outils et les méthodes des équipes de conduite d'essais

Le choix de la méthode de freinage, la détermination de l'intensité électrique et de la dépression pneumatique à appliquer, le calcul du point d'application conditionnent la sécurité de la circulation et la validité de la marche d'essai.

Les CTT ne disposent d'aucune méthode ni outil de calcul pour les guider dans cette démarche.

Les CTT et les conducteurs connaissent les performances de freinage des matériels utilisés dans des conditions normales, mais le type de freinage qui peut être demandé en essai n'est pas forcément normal. Notamment, le frein ferroviaire n'est pas conçu pour effectuer des paliers de vitesses successifs de courte longueur comme ceux qui étaient demandés au cours de cette campagne.

Les choix et les calculs qu'il fallait effectuer de tête entre deux marches n'ont rien d'évident. Ils ont généré des discussions au sein de l'équipage et, au final, ils ont conduit à des erreurs tant le 11 novembre 2015 que le 14 novembre 2015.

Par ailleurs, aucun formalisme n'était prévu pour s'assurer avant le départ que la stratégie de freinage imaginée par le CTT était comprise et partagée par tout l'équipage.

Enfin, la répartition des tâches au sein de l'équipe de conduite lors des marches de survitesse n'est pas clairement définie dans les référentiels et les pratiques de l'EAST ne demandaient pas au CTT de les préciser.

Recommandation R4 (SNCF Mobilités) :

Mettre à disposition des équipes d'essai les outils pratiques permettant de les guider dans la détermination des stratégies de freinage et les méthodes permettant de s'assurer que les stratégies décidées sont bien comprises par chacun.

Définir, pour les principaux types d'essai, la répartition des tâches au sein de l'équipe de conduite et, pour les autres essais, développer les méthodes permettant au CTT d'effectuer cette répartition et de s'assurer que cette répartition est bien comprise.

Le BEA-TT invite les autres entreprises ferroviaires susceptibles de réaliser des circulations d'essais sur le RFN à mettre également en œuvre cette recommandation.

9.2.5 - L'organisation des campagnes d'essais

L'organisation mise en place par Systra pour cette campagne d'essai est semblable à celles qui avaient été mises en place par Inexia pour les campagnes LGV Rhin-Rhône et LGV Est Européenne 1^{re} phase et qui avaient donné satisfaction.

Toutefois, cette enquête a montré que cette organisation présente des faiblesses qui ont joué un rôle dans les chaînes causales de l'accident. Elles concernent notamment le niveau d'expérience du chef d'essai, le rôle du pilote par rapport à l'équipe de conduite, le

temps de préparation des marches, l'organisation de la concertation entre le chef d'essai et le CTT et la répartition des responsabilités.

Recommandation R5 (Systra) :

Faire évoluer les référentiels d'organisation des campagnes d'essais en tenant compte du retour d'expérience de l'accident d'Eckwersheim et de façon à garantir notamment :

- **l'expérience et la qualification du chef d'essai en rapport avec la criticité des essais envisagés ;**
- **une programmation des marches permettant des temps de préparation et de debriefing suffisants ;**
- **une organisation de la concertation entre chef d'essai et CTT privilégiant les contacts directs ;**
- **une redéfinition du rôle du pilote évitant de le positionner en interface entre chef d'essai et CTT et limitant le risque d'interférences avec les missions de l'équipe de conduite ;**
- **une répartition réaliste et clairement affichée des responsabilités entre le chef d'essai et le CTT.**

Le BEA-TT invite les autres entreprises susceptibles d'organiser ou de réaliser des circulations ou des campagnes d'essais sur le RFN à mettre également en œuvre cette recommandation.

9.2.6 - Les enregistrements des conversations des opérateurs de sécurité.

Sans la présence d'une caméra en cabine qui a fortuitement enregistré les conversations, il est probable que l'enchaînement des faits qui a conduit à l'accident du 14 novembre 2015 n'aurait pas pu être reconstitué avec exactitude.

Par exemple, seul l'enregistrement a permis de confirmer la réalité de l'appel interphonique du chef d'essai et de le positionner dans le temps. En dehors de l'équipage, la quasi-totalité des témoins, y compris en cabine de conduite, et dans la voiture laboratoire ne s'en souvenait pas.

L'enregistrement a également permis de confirmer que le point prévu pour le freinage final était bien le PK 402 et qu'il a été normalement annoncé, ce qui n'apparaissait pas au vu des témoignages et des déclarations.

L'enregistrement sonore est réalisé systématiquement depuis plus de 50 ans dans les cabines de pilotage des avions et sur les passerelles des navires marchands.

Dans le domaine ferroviaire, sur le RFN, seules les conversations radio sol-train avec les postes de régulation sont enregistrées.

Le BEA-TT, à l'issue de son enquête sur l'accident de Lachapelle-Auzac a émis en 2013 une recommandation portant sur l'enregistrement des communications téléphoniques de service des agents circulations.

Une recommandation similaire a été émise en juin 2016 dans le rapport sur l'accident de Saint-Germain-des-Fossés.

Ces recommandations n'ont eu pour l'instant qu'un commencement d'exécution.

Le BEA-TT est d'avis qu'il est temps de déployer plus largement les systèmes d'enregistrement sonore dans le domaine ferroviaire.

Le cas des trains d'essais avec ses interactions complexes au sein de l'équipe de conduite et entre l'équipe de conduite et le chef d'essai pourrait constituer une étape dans cette démarche.

Recommandation R6 (SNCF Mobilités) :

Lors des essais impliquant l'installation d'un système d'interphonie entre la cabine de conduite et le chef d'essai, mettre en place systématiquement un système d'enregistrement des sons en cabine et des communications interphoniques.

Plus largement, et en prenant en compte le fait que les spécifications des enregistreurs de données actuellement en service datent de plus de 25 ans, le BEA-TT invite la SNCF et l'EPSF à engager des réflexions et des démarches en vue d'un enrichissement des données enregistrées dans les trains et dans les postes en vue d'améliorer le retour d'expérience. Dans ce cadre, les enregistrements des sons et des communications seraient à prendre en compte.

Par ailleurs, la présence d'une caméra filmant vers l'avant a permis de positionner avec exactitude le phénomène de renversement de la motrice et a facilité la reconstitution du déraillement. L'installation de caméras frontales en tête des trains se répand en Europe dans de nombreux réseaux ferroviaires et urbains avec de nombreux avantages pour les exploitants et les autorités. La SNCF et l'EPSF sont invités à intégrer cette possibilité dans leurs réflexions.

9.2.7 - La mise en œuvre de « boucles de rattrapage »

Par définition, une circulation d'essai doit être capable d'approcher certaines limites du système ferroviaire. Par conséquent, certains systèmes de sécurité, obligatoires sur les trains commerciaux doivent pouvoir être isolés.

En l'absence de ces systèmes, la sécurité de la circulation d'essai, celle des autres trains susceptibles de se trouver au voisinage du domaine d'essai et celle des riverains repose davantage sur les procédures et sur le professionnalisme des équipes qui doivent être renforcés d'autant.

Toutefois, dans certains cas, sans atteindre le niveau de sécurité des systèmes équipant les trains commerciaux, certains dispositifs techniques propres aux trains d'essais pourraient constituer des boucles de rattrapage en cas de défaillance humaine ou organisationnelle.

Ainsi, l'équipement de surveillance de la vitesse en essai (ESVE) développé rapidement par l'AEF et le Centre d'Ingénierie du Matériel de SNCF Mobilités est désormais mis en œuvre lors des montées en vitesse sur les LGV.

Le BEA-TT prend acte de ce progrès et invite l'AEF à poursuivre le développement de l'ESVE et à imaginer de nouveaux dispositifs techniques propres à améliorer la sécurité des trains d'essais.

Il invite également les autres opérateurs d'essais ferroviaires susceptibles d'opérer en France à mettre au point des systèmes similaires.

10 - Conclusions et recommandations

10.1 - Les conclusions

La cause directe de l'accident est la vitesse de 255 km/h dans une courbe serrée de 945 m de rayon.

Cet excès de vitesse est dû à un freinage inapproprié par rapport à la vitesse initiale du train pour aborder la zone où la vitesse maximale prescrite n'est plus que de 176 km/h, et qui commence juste avant la courbe en question.

Ce freinage inapproprié est lui-même le produit de trois chaînes causales :

- une stratégie de freinage inadaptée, résultant d'un raisonnement erroné et prévoyant un freinage pneumatique au PK 402 pour respecter le seuil de 176 km/h au PK 403,809 ;
- une incompréhension entre le CTT et le reste de l'équipage sur les modalités du freinage se traduisant par le relâchement du frein électrique par le conducteur et le maintien de la vitesse de 330 km/h jusqu'au déclenchement du freinage pneumatique ;
- un appel interphonique pendant le freinage qui a perturbé le CTT et l'a empêché de voir que le frein électrique avait été relâché contrairement à la stratégie qu'il avait prévue.

10.2 - Les recommandations

Recommandation R1 (SNCF Réseau et EPSF) :

Mener à terme la démarche en cours de clarification et d'aménagement des prescriptions d'homologation des lignes à grande vitesse incluses dans le référentiel SNCF IN 3279.

Les porter au niveau international, à l'UIC par SNCF Réseau et à l'ERA par l'EPSF.

Recommandation R2 (Systra) :

Améliorer les méthodes d'analyse préliminaire des risques de façon à rechercher efficacement les dangers liés aux particularités de la ligne en lien avec la campagne d'essais envisagée. Informer les acteurs des risques particuliers identifiés.

Le BEA-TT invite l'ensemble des maîtres d'œuvre d'essais ferroviaires opérant sur les lignes en projet sur le territoire national à s'assurer de même de la qualité de leurs méthodes.

Recommandation R3 (SNCF Mobilités) :

Mettre en place un système de sélection, de formation et d'habilitation des conducteurs et des CTT d'essai permettant de garantir la fourniture d'équipes de conduite dont les aptitudes et les qualifications soient cohérentes avec les particularités, la complexité et le niveau de risque des essais envisagés.

Le BEA-TT invite les autres entreprises ferroviaires susceptibles de réaliser des circulations d'essais sur le RFN à mettre également en œuvre cette recommandation.

Recommandation R4 (SNCF Mobilités) :

Mettre à disposition des équipes d'essai les outils pratiques permettant de les guider dans la détermination des stratégies de freinage et les méthodes permettant de s'assurer que les stratégies décidées sont bien comprises par chacun.

Définir, pour les principaux types d'essai, la répartition des tâches au sein de l'équipe de conduite et, pour les autres essais, développer les méthodes permettant au CTT d'effectuer cette répartition et de s'assurer que cette répartition est bien comprise.

Le BEA-TT invite les autres entreprises ferroviaires susceptibles de réaliser des circulations d'essais sur le RFN à mettre également en œuvre cette recommandation.

Recommandation R5 (Systra) :

Faire évoluer les référentiels d'organisation des campagnes d'essais en tenant compte du retour d'expérience de l'accident d'Eckwersheim et de façon à garantir notamment :

- **l'expérience et la qualification du chef d'essai en rapport avec la criticité des essais envisagés ;**
- **une programmation des marches permettant des temps de préparation et de debriefing suffisants ;**
- **une organisation de la concertation entre chef d'essai et CTT privilégiant les contacts directs ;**
- **une redéfinition du rôle du pilote évitant de le positionner en interface entre chef d'essai et CTT et limitant le risque d'interférences avec les missions de l'équipe de conduite ;**
- **une répartition réaliste et clairement affichée des responsabilités entre le chef d'essai et le CTT.**

Le BEA-TT invite les autres entreprises susceptibles d'organiser ou de réaliser des circulations ou des campagnes d'essais sur le RFN à mettre également en œuvre cette recommandation.

Recommandation R6 (SNCF Mobilités) :

Lors des essais impliquant l'installation d'un système d'interphonie entre la cabine de conduite et le chef d'essai, mettre en place systématiquement un système d'enregistrement des sons en cabine et des communications interphoniques.

Le BEA-TT invite l'AEF à poursuivre le développement de l'ESVE et à imaginer de nouveaux dispositifs techniques propres à améliorer la sécurité des trains d'essais.

Il invite également les autres opérateurs d'essais ferroviaires susceptibles d'opérer en France à mettre au point des systèmes similaires.

ANNEXES

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête

Annexe 2 : Fiches de poste

Annexe 3 : Listing de l'enregistrement ATESS

Annexe 4 : Historique de maintenance de la rame

Annexe 5 : Enregistrement Mauzin

Annexe 6 : Évaluation de la vitesse de renversement

Annexe 7 : Simulation du comportement dynamique

Annexe 8 : Mesures prises par la SNCF

Annexe 9 : Recommandation du rapport « Réflexions sur la sécurité de l'organisation des essais ferroviaires à grande vitesse »

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête



MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE
ET DE L'ÉNERGIE



Le Directeur

La Défense, le 16 novembre 2015

DÉCISION

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

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

Vu les circonstances de l'accident impliquant un TGV survenu le 14 novembre 2015 et à la demande du Secrétaire d'état chargé des transports ;

décide

Article 1 : Une enquête technique est ouverte en application des articles L. 1621-1 et R. 1621-22 du code des transports concernant le déraillement d'une rame d'essai TGV, survenu sur une voie non exploitée commercialement, le 14 novembre 2015 sur la commune d'Eckwersheim (Bas-Rhin) ;

Le directeur du BEA-TT

Jean PANHALEUX

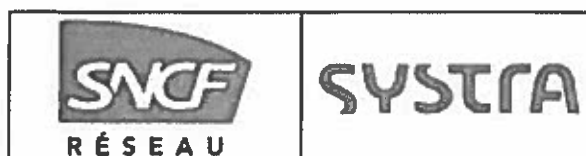
Annexe 2 : Fiches de poste

LIGNE A GRANDE VITESSE EST EUROPEENNE – 2^{ÈME} PHASE

Maîtrise d'Ouvrage



Direction des opérations - LGV Est européenne
92 avenue de France - 75 648 Paris Cedex 13



Marché n° : 13003739

Objet : Essais d'Intégration Ligne à Grande Vitesse Est Européenne 2^{ème} phase

PHASE POST MISE EN SERVICE (S2)

Emetteur :



SYSTRA

72, 74, rue Henry FARMAN
75015 PARIS

Procédures autorisant les circulations d'essais

Rédacteur		Vérificateur		Approbateur	
Nom-fonction	Date Emargement	Nom-fonction	Date Emargement	Nom-fonction	Date Emargement
Christophe LARDIN Exploitation / sécurité ferroviaire	06.10.2015 	Gérard DELRUE Exploitation / sécurité ferroviaire	06.10.2015 	Jean-Claude ZABEE Directeur SYSTRA France	06.10.2015

E S S X I T G E X P C O N S L G V E E 2 3 0 0 0 1 0 C 0

11.4 Conducteur

Le conducteur est en charge de la conduite d'un train d'essais ou de mesures.

Le conducteur participe aux processus de déroulement des essais avec ou sans interface circulation avec le RFN.

Le conducteur est toujours accompagné sur le domaine d'essais par un pilote traction (et le CTT s'il s'agit d'une marche d'essais) ou, par un Agent d'escorte (AE) lorsque la LGVEE2 est configurée en domaine travaux.

Pendant une marche d'essais, le conducteur se conforme aux directives du CTT et/ou du pilote traction présents en cabine.

11.5 Chef d'essais à bord de la rame

Le Chef d'essais présent à bord de la rame, appelé plus communément « Chef d'essais bord » est le Responsable technique des essais et le Responsable de la sécurité des personnes à bord des trains d'essais.

En liaison avec l'OPES, il est chargé du programme des essais et donne les directives nécessaires au cadre transport traction ligne (CTT).

Le Chef d'essais bord participe à l'élaboration de l'AHE et de l'AJE ainsi qu'à leurs modifications éventuelles.

Le Chef d'essais établit pour chaque marche d'essais, avec l'ensemble des personnes concernées, un schéma des marches d'essais concrétisant le programme d'essais.

A l'issue de la marche d'essais bord, le Chef d'essais bord reçoit du Responsable de l'équipe de mesures bord l'ensemble des relevés de mesures collectés pendant la marche d'essais. Après examen de ces éléments avec l'expert voie et l'expert caténaire d'i-Test, le Chef d'essais bord prononce la validation technique de la marche d'essais.

Avant chaque marche d'essai :

- le Chef d'essais bord remet au pilote traction une « fiche vitesse » reprenant les vitesses à respecter par le conducteur, ainsi que les phases de transition,
- le Chef d'essais bord remet au CTT le schéma de marche d'essais en lui précisant les vitesses et points d'arrêt à respecter. Ceci permet au Chef d'essais de s'assurer auprès du CTT que les conditions de freinage permettent de respecter la vitesse maximale prévue à ce schéma de marche d'essais,
- le Chef d'essais bord doit avoir obtenu l'assurance de l'OPES que l'itinéraire demandé a bien été formé et établi, et avoir reçu de ce dernier l'autorisation de départ qu'il retransmet verbalement au pilote traction.

Au cours des essais de montée en vitesse, le Chef d'essais bord fait réduire la vitesse si les valeurs limites des paramètres de conduite sont atteintes ou dépassées.

Reçoit de l'agent d'observation en cabine arrière, l'avis de dégagement de la zone en interface avec le RFN.

Suivant le cas, le Chef d'essais bord est chargé d'appliquer les procédures décrites dans l'une des fiches de l'annexe 1, 2, 3 ou 4 pour le déroulement des essais avec et sans interface circulation avec le RFN.

11.6 Chef de bord

Le Chef de bord est chargé de certaines opérations de sécurité et de contrôle avant l'autorisation de départ de la rame essais.

A cet effet, il respecte la procédure suivante :

- s'assure que toutes les personnes prévues à l'AJE sont présentes dans la rame,
- provoque et s'assure de la fermeture des portes,
- rend compte au Chef d'essais de l'accomplissement de ces tâches.

Pendant la circulation, il gère le déplacement des personnes dans la rame.

11.7 Cadre Transport Traction ligne (CTT)

Le cadre transport traction ligne est le Responsable de la sécurité de la circulation du train d'essais qu'il accompagne.

Il veille au respect par le conducteur des règles définies par :

- l'avis hebdomadaire / journalier d'essais (AHE / AJE),
- le schéma de marche d'essais,
- le RTES i-Test.

Le respect de l'ensemble de ces règles garantit la sécurité de la circulation du train d'essais.

Le CTT reçoit du Chef d'essais bord toutes les indications utiles concernant l'application du programme d'essais.

Le CTT participe au processus de déroulement des essais ainsi qu'au processus d'ouverture du domaine d'essais lorsque la reconnaissance du domaine d'essais (Balayage) est effectuée avec la rame d'essais.

Dans le cadre du processus de déroulement des essais :

- Le CTT fait procéder à l'armement ou au désarmement manuel de la signalisation cabine lorsque celle-ci ne s'est pas armée ou désarmée automatiquement lors de l'entrée sur la LGVEE2.
- En cas de survitesse, afin de ne pas être pris en charge lors du dépassement prolongé de la vitesse plafond de la ligne, le CTT fait procéder à l'isolement des dispositifs de contrôle du dépassement de la vitesse autorisée :
 - COVIT (Contrôle de Vitesse) lorsque la survitesse est prévue sur LGV uniquement,
 - KVB (Contrôle de Vitesse par Balise) et COVIT lorsque la survitesse est prévue depuis la ligne classique (zone d'essais) jusqu'à la LGVEE2 incluse, ou inversement,
- ➔ et en informe le Chef d'essais bord.
- Le CTT est le correspondant de l'OPES pour les échanges relatifs à la sécurité des circulations d'essais.

11.8 Pilote traction

Le pilote traction de la rame d'essais est chargé de renseigner le CTT sur les caractéristiques de la LGVEE2 (pentes, rampes, signalisation, points remarquables) et de donner l'autorisation de départ au conducteur.

Dans le cadre des marches d'essais, le pilote traction :

- reçoit du pilote traction une « fiche vitesse » reprenant les vitesses à respecter par le conducteur ainsi que les phases de transition,
- renseigne le CTT et le conducteur sur les caractéristiques de la ligne (signalisation, particularités...),

- reçoit du Chef de bord l'avis verbal que le service du train est achevé (montée ou descente des personnes prévues à l'AJE, fermeture des portes),
- retransmet au conducteur, l'autorisation de départ reçue du Chef d'essais,
- avise l'OPES, en cas d'acheminement hors essais dynamiques, lorsque la totalité de son train a dégagé le point repérable demandé,
- s'assure visuellement qu'il n'y a pas d'anomalie concernant la voie ou la caténaire ainsi qu'au niveau des abords (clôtures, portails, portillons, ...),
- note tout élément susceptible d'entraver la libre circulation des trains d'essais ou de mesures et en rend compte au chef d'essais bord.

Il peut être amené à participer aux opérations de balayage décrites à l'article 8.

Suivant le cas, le pilote traction est chargé d'appliquer les procédures décrites dans l'une des fiches de l'annexe 1, 2, 3 ou 4 pour le déroulement des essais avec ou sans interface circulation avec le RFN.

COPIE du 11/02/2016 (NON TENUE A JOUR)

Circulation de train d'essai

Document d'exploitation

Version 01 du 06-05-2010
Applicable à partir du 04-10-2010

RFF	(CG MR 3 H 1 n°1) RFN-CG-MR 03 H-01-n°001
-----	--


RÉSEAU FERRÉ DE FRANCE

OP00518

Article 105. Chef d'essai

Le demandeur désigne et met en place un chef d'essai autorisé et compétent pour le périmètre de l'essai.

Le chef d'essai est responsable de l'exécution des circulations dans le cadre des essais réalisés, et particulièrement de l'application des prescriptions relatives aux essais et des consignes de sécurité. Il est également responsable de la sécurité des personnes admises à bord du train d'essai.

À ce titre, il a autorité sur toutes les personnes présentes à bord.

Le chef d'essai doit s'assurer que le personnel chargé d'assurer les missions de surveillance des paramètres ayant une incidence sur la sécurité des circulations (par exemple, en fonction de l'essai, la vitesse, la stabilité, les courants perturbateurs, le captage...) est en adéquation avec les besoins de l'essai concerné tant en terme de compétence que de nombre.

Le chef d'essai doit pouvoir communiquer avec ce personnel et avec l'équipe de conduite.

Article 106. Équipe de conduite

L'équipe de conduite a la responsabilité des aspects sécurité liés à la conduite :

- application de la réglementation technique de sécurité et de la documentation d'exploitation du RFN,
- application des consignes spécifiques de l'essai, y compris les exigences de sécurité formulées dans l'autorisation délivrée par de l'EPSF,
- connaissance des gestes métier,
- respect des prescriptions d'utilisation du matériel moteur et remorqué (manipulation des commandes, observation des indications affichées au poste de conduite ...).

L'équipe de conduite d'essai doit être conforme aux prescriptions du document d'exploitation RFN SE 7 B n°1 (IN 1671). Elle se compose en outre obligatoirement d'un dirigeant qualifié du service de conduite de l'entreprise ferroviaire dans les cas suivants :

- dérogation à la réglementation technique de sécurité et à la documentation d'exploitation du RFN (composition, remorque, freinage et vitesses limites des trains...) prévue dans le programme d'essai et accordée par l'EPSF dans l'autorisation qu'elle a délivrée,
- contraintes inhérentes aux essais, qui exposeraient le conducteur à ne plus pouvoir assurer la conduite du train en toute sécurité,
- acheminement du matériel en essai.

Le dirigeant qualifié du service de conduite a pour mission :

- de veiller à la sécurité des circulations et à l'application des ART, AGT et des exigences de sécurité formulées dans l'autorisation délivrée par de l'EPSF,
- d'être l'interlocuteur du chef d'essai,
- de recueillir, analyser et faire exécuter au moment opportun les demandes de manipulations particulières,

COPIE du 11/02/2016 (NON TENUE A JOUR)

- d'assurer les liaisons entre la circulation d'essai, le centre opérationnel de gestion des circulations (COGC) et les postes.

Le demandeur doit s'assurer de l'habilitation de l'équipe de conduite (conducteur et dirigeant qualifié du service de conduite).

Annexe 3 : Listing de l'enregistrement ATESS

6.1 Freinage n°1

Les données de l'ATESS correspondantes au freinage n°1 sont les suivantes :

16486	1740.78	356	14/11/2015 - 15:03:18	EC	Manipulateur sur position freinage électrique
16487	1740.97	355	14/11/2015 - 15:03:20	35	Config locale de la motrice PBKA - PBA - POS -
16488	1741.26	350		0B	Seuil vitesse
16489	1741.67	345		0B	Seuil vitesse
16490	1741.72	345	14/11/2015 - 15:03:28	82	Franch. Signal Fermé RS (RATP: Signal à vigiler)
16491	1741.75	345	14/11/2015 - 15:03:28	83	Fin franch. Signal Fermé RS (RATP: Signal à vigiler)
16492	1741.75	344	14/11/2015 - 15:03:28	44	TVM 430 taux de vitesse → Taux de vitesse = 2
16493	1742.02	342		0A	RAZ compteur distance
16494	1742.18	340		0B	Seuil vitesse
16495	1742.22	340	14/11/2015 - 15:03:32	A1	Commande de freinage (MPF ou BP URG ou FU E
16496	1742.46	337	14/11/2015 - 15:03:36	35	Config locale de la motrice PBKA - PBA - POS -
16497	1742.58	335		0B	Seuil vitesse
16498	1742.63	335	14/11/2015 - 15:03:38	A0	Pas de commande de freinage (MPF ou BP URG d
16499	1742.66	335	14/11/2015 - 15:03:38	35	Config locale de la motrice PBKA - PBA - POS -
16500	1742.92	330		0B	Seuil vitesse
16501	1742.92	330	14/11/2015 - 15:03:40	ED	Manipulateur hors position freinage électrique

6.2 Freinage n°2

Les données de l'ATESS correspondantes au freinage n°2 sont les suivantes :

16520	1746.03	329	14/11/2015 - 15:04:14	A1	Commande de freinage (MPF ou BP URG ou FU Eqt Sécu)
16521	1746.06	329	14/11/2015 - 15:04:14	9D	BP URG enfoncé ou Manipulateur sur position Urgence
16522	1746.1	329	14/11/2015 - 15:04:16	9C	BP URG sur pos. Normal et Manipulateur hors pos. Urgence
16523	1746.16	329	14/11/2015 - 15:04:16	35	Config locale de la motrice PBKA - PBA - POS - DASYE - EURO
16524	1746.25	329	14/11/2015 - 15:04:18	35	Config locale de la motrice PBKA - PBA - POS - DASYE - EURO
16525	1746.4	325		0B	Seuil vitesse
16526	1746.53	320		0B	Seuil vitesse
16527	1746.54	320	14/11/2015 - 15:04:20	B1	Commande d'ouverture DJ par Z(DJ) ou Eqt de Sécu ou Automatis
16528	1746.67	315		0B	Seuil vitesse
16529	1746.67	315	14/11/2015 - 15:04:22	9B	Commande de Baisser Pantographe
16530	1746.8	310		0B	Seuil vitesse
16531	1746.83	308	14/11/2015 - 15:04:24	AA	Absence tension ligne locale
16532	1746.94	305		0B	Seuil vitesse
16533	1747.06	300		0B	Seuil vitesse
16534	1747.14	298		0A	RAZ compteur distance
16535	1747.18	295		0B	Seuil vitesse
16536	1747.3	290		0B	Seuil vitesse
16537	1747.31	290	14/11/2015 - 15:04:30	82	Franch. Signal Fermé RS (RATP: Signal à vigiler)
16538	1747.34	288	14/11/2015 - 15:04:30	83	Fin franch. Signal Fermé RS (RATP: Signal à vigiler)
16539	1747.34	288	14/11/2015 - 15:04:30	44	TVM 430 taux de vitesse → Taux de vitesse = 160 km/h, E: Vit
16540	1747.4	285		0B	Seuil vitesse
16541	1747.51	280		0B	Seuil vitesse
16542	1747.61	275		0B	Seuil vitesse
16543	1747.71	270		0B	Seuil vitesse
16544	1747.72	270	14/11/2015 - 15:04:34	35	Config locale de la motrice PBKA - PBA - POS - DASYE - EURO
16545	1747.8	265		0B	Seuil vitesse
16546	1747.88	260		0B	Seuil vitesse
16547	1747.96	255		0B	Seuil vitesse
16548	1748.06	250		0B	Seuil vitesse
16549	1748.15	245		0B	Seuil vitesse
16550	1748.18	243	14/11/2015 - 15:04:42	93	Fin de FU par le KVB et Z(KVB) sur normal

Annexe 4 : Historique de maintenance de la rame

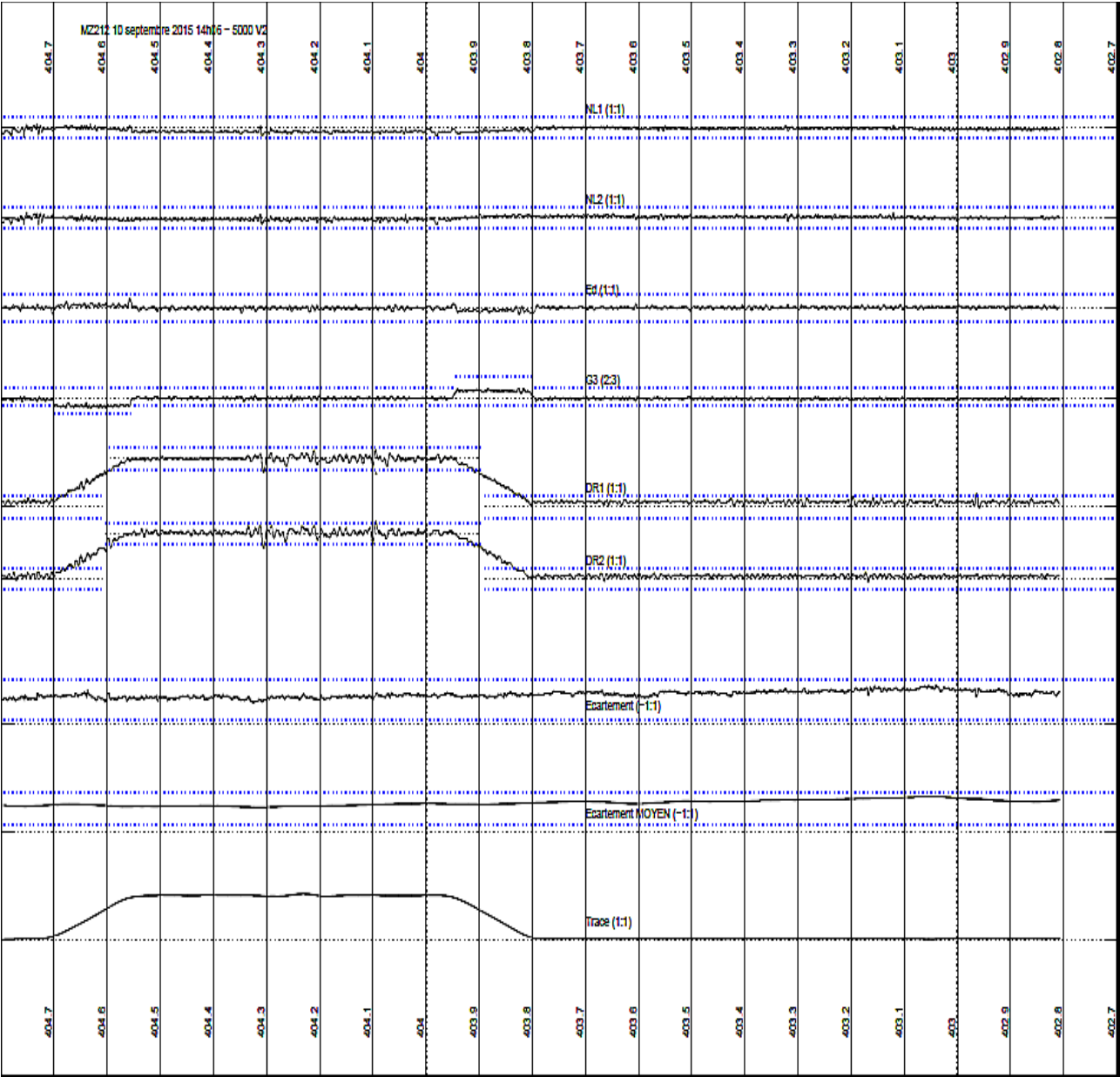
Opération	Niveau	Période
ES	2	Hebdomadaire (7 jours maxi sans dépasser 5000 km)
ATS 0	2	18 jours maxi
OP 37 A, OP 52 A (organes mécanique et caisse), OP 52 B	2	18 jours maxi
OP 37 B, OP 37 C	2	37 jours maxi
OP 52 A (organes autres que mécanique et caisse), OP 52 C	2	52 jours maxi
OP 168 A, OP 168 B	2	168 jours maxi
VL	3	550 000 km maxi sans dépasser 10 mois
VG	3	1 100 000 km sans dépasser 19 mois
GVG	3	2 200 200 km sans dépasser 37 mois

Schéma de maintenance de la rame d'essai

Visites de Niveau 3							
Documents de référence : MDM n°2015-2565							
Visite de N3 : VL, VG, GVG pas de modification de la trame de maintenance (ITM12005; 13005; 14005) et ATP/POT (15005)							
	no_rame	type_oe	date_fin_execution	etab_executant	km_cumule_oe	date_inl	Date de péremption
EAGVG	744	EAGVG	11/12/2013	pse	1398257	13/12/2013	08/01/2017
GVG	744	GVG	13/12/2013	pse	1398257	13/12/2013	10/01/2017
EAVG	744	EAVG	03/07/2015	amc	2128300	03/07/2015	30/01/2017
VG	744	VG	03/07/2015	amc	2128300	03/07/2015	30/01/2017
EAVL	744	EAVL	03/07/2015	amc	2128300	03/07/2015	01/05/2016
VL	744	VL	03/07/2015	amc	2128300	03/07/2015	01/05/2016
OP268A	744	OP168A	03/07/2015	amc	2128300	03/07/2015	18/12/2015
OP168B	744	OP168B	03/07/2015	amc	2128300	03/07/2015	18/12/2015

Traçabilité de la maintenance de niveau 3

Annexe 5 : Enregistrement Mauzin



Annexe 6 : Évaluation de la vitesse de renversement

Méthode

La méthode vise à évaluer, pour une courbe de rayon et de dévers donnés, la vitesse à partir de laquelle la résultante de la force de pesanteur (poids) et de la force centrifuge appliquées au centre de gravité d'un véhicule, sort de la surface de sustentation située entre les tables de roulement des rails.

Elle repose sur des hypothèses simplificatrices, notamment que les véhicules d'une rame sont indépendants les uns des autres et que les forces longitudinales de traction ou de freinage qui s'appliquent au véhicule au niveau du contact roue-rail et des organes de choc et traction ne jouent pas sur le mécanisme de renversement.

Elle ne vise pas à remplacer une étude basée sur des outils de simulation mais simplement à en vérifier approximativement les résultats.

Données

- Rayon : 944 m
- Dévers : 160 mm
- Vitesse : 243 km/h (soit 67,5 m/s)
- Hauteur du centre de gravité¹⁵ : 2014 mm au-dessus du plan du rail
- Déport transversal du centre de gravité au repos : 0
- Déport du centre de gravité en courbe¹⁶ : 100 mm vers l'extérieur de virage.

Calcul de la force centrifuge

$$F = M * \gamma = M * V^2/R = M * 4.83$$

Vérification graphique

Après avoir positionné sur un graphique à l'échelle, les deux rails avec leur dévers et le centre de gravité du véhicule, on trace horizontalement la force centrifuge ($M * 4,83$) et verticalement le poids ($M * 9,81$) appliqués au centre de gravité du véhicule.

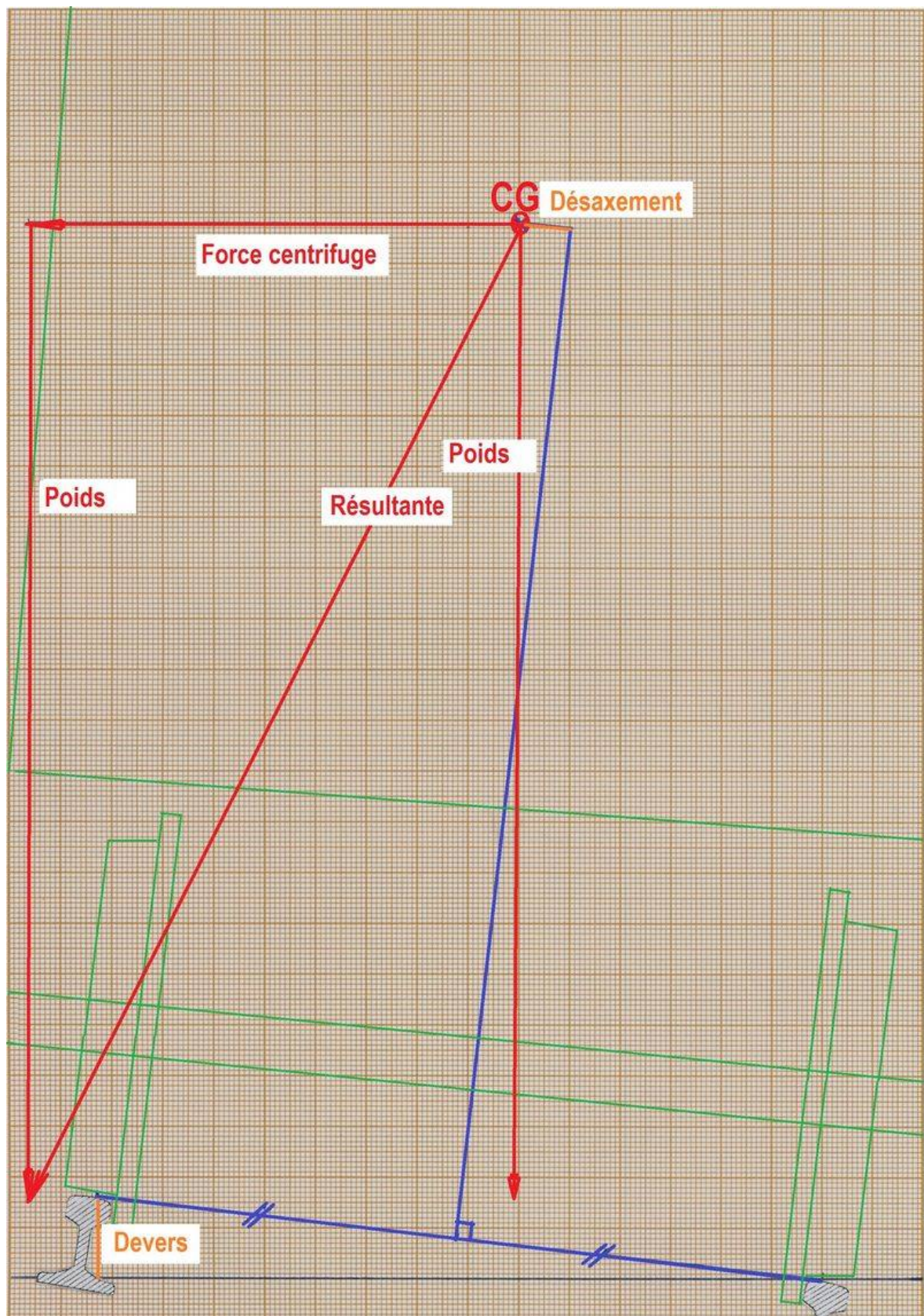
On vérifie alors que la résultante se projette nettement au-delà du rail extérieur. La condition de renversement du véhicule est donc réalisée pour la vitesse de 243 km/h qui est la vitesse du TGV au moment de l'impact avec le pont-rail.

À plus forte raison, cette condition était réalisée pour la vitesse de 255 km/h qui était la sienne à l'entrée de la pleine courbe.

La même vérification pour une vitesse de 235 km/h montre que la condition de renversement est encore réalisée.

¹⁵ Les données relatives au véhicule sont celles de la remorque R8 prise à titre d'exemple.

¹⁶ Ce déport vers l'extérieur du virage est dû aux mouvements des suspensions sous l'effet de la force centrifuge. Lorsque le véhicule circule en insuffisance de dévers ce déport est vers l'extérieur du virage.



Exemple de vérification graphique pour $V = 243 \text{ km/h}$

Annexe 7 : Simulation du comportement dynamique



Simulation du comportement dynamique

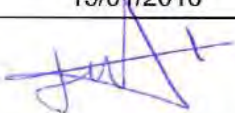
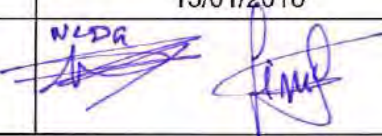
Déraillement TGV d'Eckwersheim

Référence affaire : n° 15-0761
Référence : **P/CIM CAB3/2016-0155**
Version 1 du 15/01/2016



FICHE D'IDENTIFICATION

Référence affaire	n° 15-0761
Libellé de l'affaire	Déraillement TGV d'Eckwersheim
Titre du document	Simulation du comportement dynamique
Référence	P/CIM CAB3/2016-0155
Version en cours	Version 1 du 15/01/2016

	Rédaction	Vérification	Approbation
Nom	Rémy DRON	Frédéric DESGACHES	Nicolas LOUIS DIT GUERIN Jean Louis LIMAL
Entité CIM	CIM CAB3	CIM CAB3	CIM CAB
Date	15/01/2016	15/01/2016	15/01/2016
Visa			

Suivi des modifications

Version et date	Motivation de la modification	Page(s) concernée(s)
Version 1 du 15/01/2016	Création	Toutes

Diffusion

Nom	Société / service	Observations
X. OUIN	Direction M	
A. BENOIST	Département MS	
P. DESAUNAY	Département MD	
B. ARES	Département MD	
B. SAGEOT	CIM	
J.L. LIMAL	CIM T	
B. COZZI	CGEDD/BEA-TT	

Référence	Version	Déroulement TGV d'Eckwersheim	Page
Affaire n° 15-0761 P/CIM CAB3/2016-0155	Version 1 du 15/01/2016	Simulation du comportement dynamique	3/16

SOMMAIRE

1	OBJET	4
1.1	Question posée – problématique	4
1.2	Client – Référence de la demande	4
2	METHODOLOGIE	4
3	DOCUMENTS DE REFERENCE.....	5
4	PARAMETRES INFRA.....	5
5	PARAMETRES MATERIEL	7
6	MODELISATION	7
6.1	Outils et moyens utilisés	7
6.2	Description du modèle numérique	8
7	CONFIGURATIONS DE CALCUL.....	8
7.1	Circulation du jour de l'accident	8
7.2	Circulation avec une réduction de 10km/h (pour info)	9
7.3	Circulation avec une réduction de 20km/h (pour info)	9
7.4	Circulation à la vitesse constante de 176km/h (pour info)	9
7.5	Circulation à la vitesse constante de 160km/h (pour info)	9
8	ANALYSE.....	9
9	CONCLUSION.....	11
ANNEXE 1 : COMPORTEMENT DANS LA CONFIGURATION DU 14 NOV 2015		12
ANNEXE 2 : COMPORTEMENT A VITESSE REDUITE A 230KM/H		13
ANNEXE 3 : COMPORTEMENT A VITESSE REDUITE A 220KM/H		14
ANNEXE 4 : COMPORTEMENT A VITESSE CONSTANTE V=176KM/H.....		15
ANNEXE 5 : COMPORTEMENT A VITESSE CONSTANTE V=160KM/H.....		16

Référence	Version	Déroulement TGV d'Eckwersheim	Page
Affaire n° 15-0761 P/CIM CAB3/2016-0155	Version 1 du 15/01/2016	Simulation du comportement dynamique	4/16

1 Objet

1.1 Question posée – problématique

Après une première investigation du CIM sur le comportement dynamique du TGV lors de l'accident d'Eckwersheim du 14/11/15, qui a fait l'objet du document « *Risque de renversement- Accident d'Eckwersheim – P/CIM CAB3/2005-4315 du 18/12/15* », il a été demandé de réaliser une étude complémentaire pour apporter des réponses aux questions suivantes :

- 1) Refaire le graphique du §3 avec 1 courbe par caisse M2, R8, R7, R6 sur la base des calculs avec les données théoriques de rayon et de dévers, ➔ *Traité au §8. Les évolutions de l'insuffisance de dévers et le roulis des caisses seront exprimées en fonction du PK et ceci pour les différentes configurations de circulations étudiées.*
- 2) Une fois obtenu, par SNCF-Réseau, les données réelles de rayon et de dévers au point estimé de déraillement, refaire le calcul de la vitesse limite pour M2 avec ces données (éventuellement aussi avec les données d'un point quelques mètres en amont), ➔ *Traité au §4. Il sera justifié la non prise en compte pour cette étude, des défauts géométriques des relevés de type MAUZIN*
- 3) Donner les positions de CG des différents véhicules de la rame pour me permettre de refaire de façon simple le calcul de renversement. ➔ *Traité au §5*

1.2 Client – Référence de la demande

Le client de cette prestation est Bruno COZZI (Chef de la division ferroviaire) CGEDD/BEA-TT

Demande exprimée par courriel du lundi 28 décembre 2015.

2 Méthodologie

Le travail a consisté à :

- Réutiliser et inverser (pour avoir la motrice M2 en tête) un modèle numérique de la rame TGV 2N dans la configuration du 14/11/15,
- Construire, à partir d'une analyse des schémas d'armement, un tracé de voie numérique représentatif de celui sur lequel a circulé la rame du 14/10/15,
- Prendre en compte dans les simulations, le freinage de la rame en incluant les décélérations issues de l'analyse faite par CIM ESF,
- A partir des résultats de simulation, montrer le comportement dynamique par des sorties graphiques adéquates.

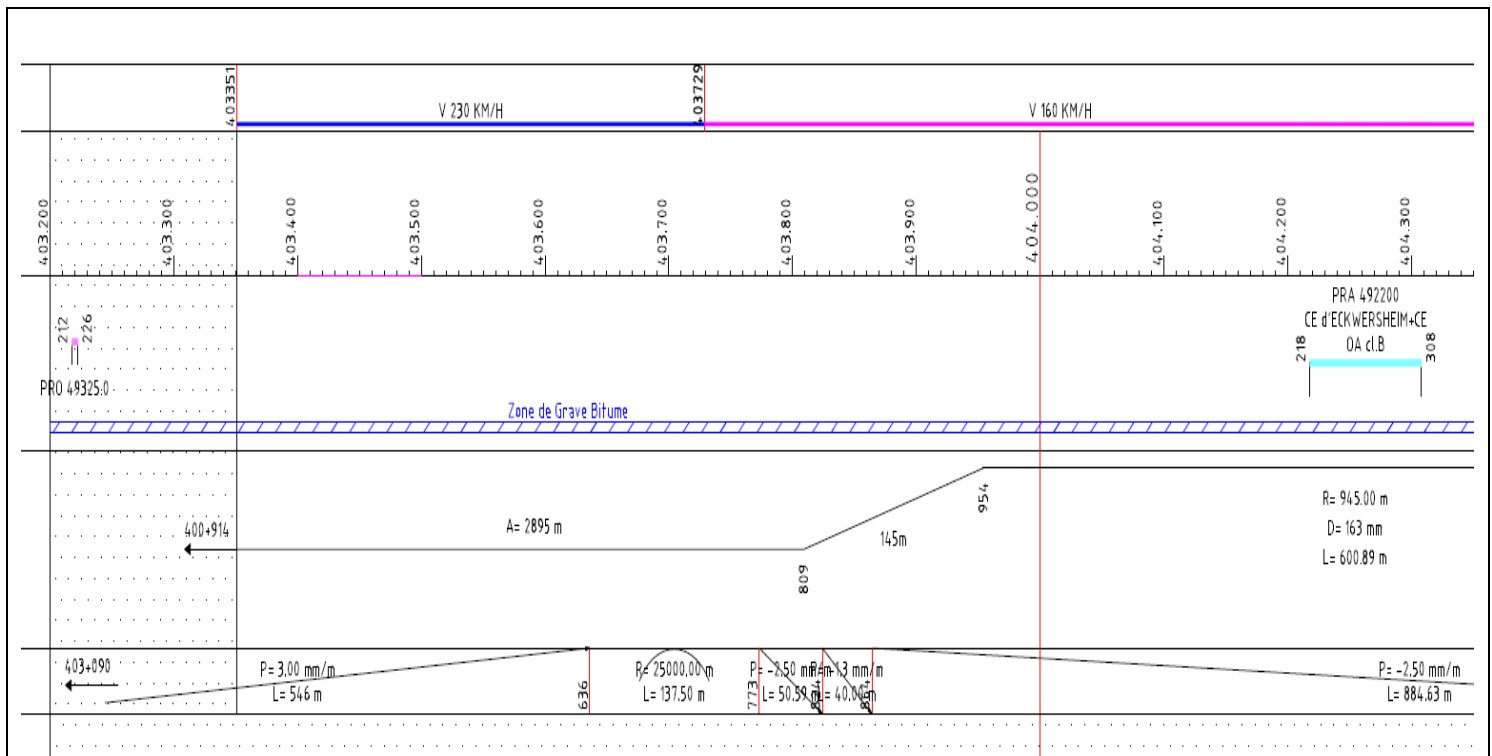
Référence	Version	Déraillement TGV d'Eckwersheim	Page
Affaire n° 15-0761 P/CIM CAB3/2016-0155	Version 1 du 15/01/2016	Simulation du comportement dynamique	5/16

3 Documents de référence

- Direction des audits de sécurité : Rapport d'enquête immédiate N°2015-AS-67 « Déraillement du train d'essai n°814521 sur le raccordement de Vendenheim de la LGVEE en construction – Le 14 novembre 2015 »,
- Document issu de la 1ère investigation du CIM : « Risque de renversement - Accident d'Eckwersheim – P/CIM CAB3/2015-4315 du 18/12/2015 »,
- Analyse CIM ESF de la bande ATES (CI/CIM ESF2/2016-0053 du 08/01/2016)
- Schéma d'armement de la voie du PK 393+000 au PK 403+351 « EXE-X-VCB-VOI-ARM_393000-210109.dwg »
- Schéma d'armement du Raccordement de VENDENHEIM V2 du PK 403+351 au PK 404+730 « EXE-X-VCB-VOI-ARM_403351-210114.dwg »,
- Graphique des enregistrements MAUZIN « Mauzin-Zone Rac V2-VENDENHEIM-10-09-2015.pdf »

4 Paramètres Infra

La voie numérique servant pour les simulations a été directement obtenue à partir du schéma d'armement ci-dessous :



Lors de la première investigation, nous ne disposions pas de toutes les données notamment de la longueur du raccordement parabolique d'entrée, paramètre ayant une influence importante sur le niveau de la réponse du matériel au passage d'un raccordement parabolique.

Référence	Version	Déraillement TGV d'Eckwersheim	Page
Affaire n° 15-0761 P/CIM CAB3/2016-0155	Version 1 du 15/01/2016	Simulation du comportement dynamique	6/16

Il avait été pris pour hypothèse un gauche d'entrée de 1mm/m. Ce schéma d'armement permet de rectifier cette valeur à 163/145 → soit un gauche de **1,12mm/m**.

Nous avons également reçu le 08/01/2016 de la part d'Emmanuel LAURANS de SNCF RESEAU, le relevé graphique des enregistrements MAUZIN du 10/09/2015 de la zone incriminée.

Sur cet extrait de relevé MAUZIN ci-dessous, on peut remarquer l'existence au PK404.100 d'un défaut de dressage un peu plus grand que sur le reste du relevé.

Après vérification par rapport à l'EN13848-5, pour une vitesse $160 < V \text{ (km/h)} \leq 230$, ce défaut isolé d'environ 3mm (valeur moyenne à crête) est éloigné de la valeur LAI (limite d'action immédiate) qui est de 12mm. Cette valeur est même inférieure à celles de la limite d'intervention LI voire de la limite d'alerte LA, qui valent respectivement de 7 à 9mm pour l'une et de 5 à 8mm pour l'autre.

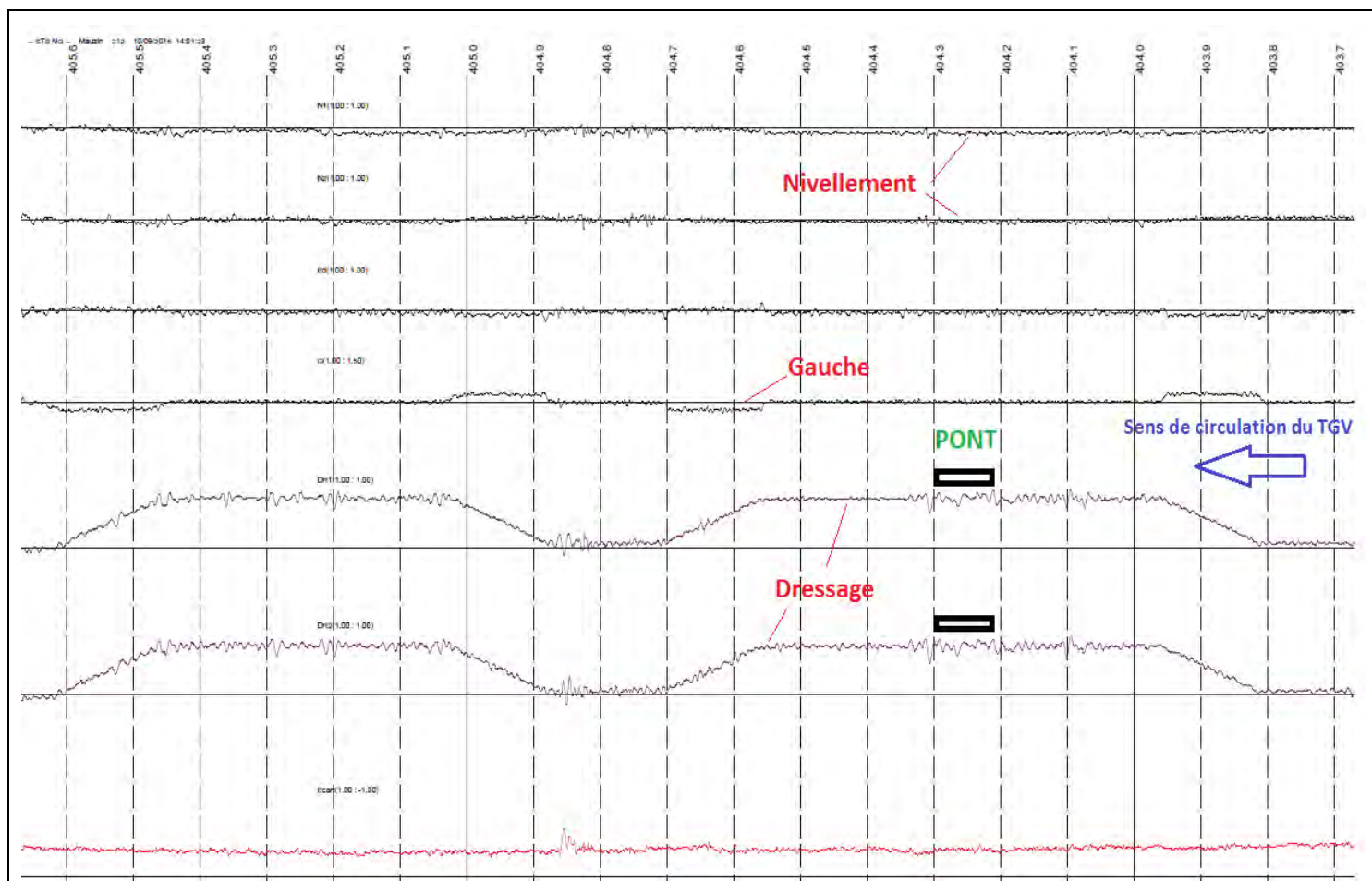
Celui-ci ne peut, en aucun cas, être la cause de l'accident. Sur une voie de plus mauvaise qualité géométrique, si ce défaut avait été plus important avec une vitesse plus basse, il y aurait eu des doutes et il aurait été nécessaire de se procurer les fichiers numériques de ces enregistrements MAUZIN afin de vérifier l'influence éventuelle de ce « défaut ».

Nous avons considéré qu'ici ce n'était pas le cas, et nous avons donc pris en compte le tracé théorique issu du schéma d'armement.

Ceci est d'ailleurs renforcé par les arguments tirés du rapport d'enquête immédiate n°2015-AS-67 dans lequel est indiqué à la page 12 : « *Hormis le défaut de tracé, au Pk 404+042, attribué au déraillement, il n'est pas constaté visuellement de défaut géométrique de la voie et aucun phénomène de danse des traverses n'est relevé.*

L'examen du dernier enregistrement graphique MAUZIN du 10/09/2015 sur la partie comprise entre les Pk 403+800 et Pk 404+400, incluant la zone du déraillement, est caractéristique d'une voie neuve. Il est notamment constaté une absence de défaut de nivellement, de dressage et de gauche dans la pleine courbe, ainsi que de danse des traverses. Le dressage ne présente pas de défaut remarquable »

Référence	Version	Déraillement TGV d'Eckwersheim	Page
Affaire n° 15-0761 P/CIM CAB3/2016-0155	Version 1 du 15/01/2016	Simulation du comportement dynamique	7/16



5 Paramètres Matériel

Le modèle numérique de la rame TGV 2N en VOM a été employé. Ci-dessous les masses et hauteurs des centres de gravité de chaque véhicule :

		Mot M1	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	Mot M2
Masse	(kg)	54244	29100	21300	21300	26140	20740	20740	20740	27650	54244
H CDG / rail	(m)	1,75	2,014	2,014	2,014	2,014	2,014	2,014	2,014	2,014	1,75

6 Modélisation

6.1 Outils et moyens utilisés

Le logiciel de Simulation des Mécanismes multi-corps VOCODYM, a été employé pour réaliser cette prestation.

VOCODYM est utilisé depuis les années 1990 pour l'analyse des systèmes mécaniques. Développé en collaboration avec l'INRETS, il fut pendant de nombreuses années employé à la Direction du Matériel et chez le constructeur ferroviaire ASTA.

Référence	Version	Déroulement TGV d'Eckwersheim	Page
Affaire n° 15-0761 P/CIM CAB3/2016-0155	Version 1 du 15/01/2016	Simulation du comportement dynamique	8/16

Il permet de créer rapidement des modèles 3D afin de calculer les mouvements, les efforts internes et externes d'un mécanisme comme ici un véhicule ferroviaire, et d'étudier son comportement dynamique global.

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 prédéfinies dans un catalogue qui donnent le nombre de degrés de liberté autorisés entre deux solides. Les éléments d'efforts (ressorts, amortisseurs, butées, articulations, etc.) sont modélisés à l'aide d'éléments également prédéfinis. Les éléments à caractéristiques non linéaires sont pris en compte.

Le logiciel **MATLAB** a été employé pour effectuer le traitement et l'ordonnancement des résultats sous forme graphique.

6.2 Description du modèle numérique

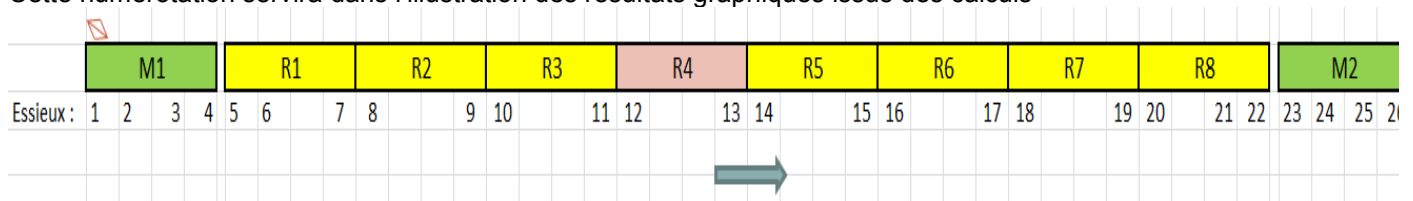
Le modèle numérique du TGV 2N est celui récupéré des projets réalisés pour la problématique des vents traversiers des années 2000.

Ce modèle avait été validé au travers de ces projets, notamment au niveau des coefficients de souplesse et déplacements transversaux de chacune des caisses de la rame.

La rame circulait motrice M2 en tête.

Ci-dessous, la représentation schématique de la rame permettant le positionnement des principaux organes de roulement.

Cette numérotation servira dans l'illustration des résultats graphiques issus des calculs



7 Configurations de calcul

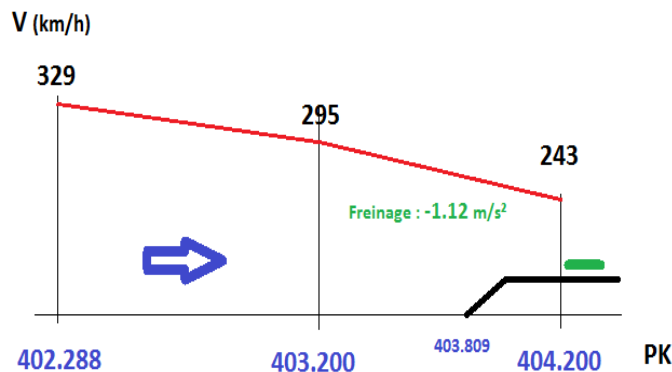
Plusieurs configurations de circulation ont été étudiées :

7.1 Circulation du jour de l'accident

Il a été pris en compte l'analyse de la bande ATESS réalisée par le service Frein (CIM ESF).

Cette analyse résumée sur le graphique ci-dessous indique que sur le dernier kilomètre, entre le PK 403+200 et le PK 404+200, la décélération estimée était de $-1,12 \text{ m/s}^2$

Référence	Version	Déraillement TGV d'Eckwersheim	Page
Affaire n° 15-0761 P/CIM CAB3/2016-0155	Version 1 du 15/01/2016	Simulation du comportement dynamique	9/16



7.2 Circulation avec une réduction de 10km/h (pour info)

Afin d'étudier l'influence de la vitesse, la vitesse a été réduite de 10km/h en tenant compte de la même décélération de -1.12 m/s^2 .

La vitesse au $PK 404+200$, résultat de la simulation, est de 230km/h

7.3 Circulation avec une réduction de 20km/h (pour info)

Même démarche que précédemment en réduisant encore de 10km/h et en conservant la décélération de -1.12 m/s^2

7.4 Circulation à la vitesse constante de 176km/h (pour info)

Vérifier le comportement de la rame circulant à la survitesse prévue à $V + 10\%$

7.5 Circulation à la vitesse constante de 160km/h (pour info)

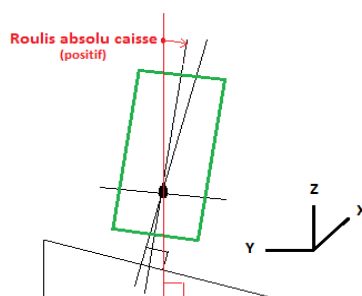
Vérifier le comportement de la rame circulant en vitesse commerciale.

8 Analyse

Pour chaque configuration de circulation définie au paragraphe précédent, ont été représentés en fonction de l'abscisse curviligne c'est à dire du PK :

- L'insuffisance de dévers au niveau des véhicules composant la rame,
- Le roulis absolu des véhicules tel qu'il est défini sur le schéma ci-dessous :

Référence	Version	Déraillement TGV d'Eckwersheim	Page
Affaire n° 15-0761 P/CIM CAB3/2016-0155	Version 1 du 15/01/2016	Simulation du comportement dynamique	10/16



- Le délestage des roues intérieures à la courbe.
La courbe incriminée était à droite donc le paramètre représentant la charge verticale sur les roues droites a été représenté,
- L'effort transversal exercé par les roues sur le rail gauche puisque la force centrifuge, dans le cas précis, a pour effet de plaquer les essieux sur le rail du côté extérieur à la courbe.

Nota : l'emplacement du PRA (début du pont rail au PK 404+218) sera inclus sur les graphiques représentant le dévers en fonction des PK.

Annexe1 :

C'est la configuration de circulation du jour de l'accident, la vitesse de la motrice M2 est bien calculée à 243km/h au niveau du PK404+200.

Les résultats montrent :

- Une insuffisance de dévers de l'ordre de 575mm sur la motrice (calcul avec $V=243\text{km/h}$), à comparer avec les 223mm d'une circulation à $V+10\%$ ou encore aux 156mm pour la vitesse nominale de $V160$.
Il existe une forte variation de cette insuffisance de dévers au passage du point de sortie du raccordement parabolique d'entrée (PK 403+954), en similitude à la réponse à un choc d'accélération transversale très élevé.
- Que le roulis pris par la motrice M2 reste légèrement positif indiquant encore une inclinaison vers l'intérieur de la courbe, par contre toutes les autres remorques ont un angle de roulis négatif important montrant une inclinaison nette et progressive vers l'extérieur de la courbe.
- L'essieu d'attaque du bogie AR de la motrice M2 qui se décharge totalement le premier, mais la tendance générale est que toutes les roues intérieures se déchargent totalement dès la fin du RP d'entrée de courbe au PK 403+954
- Que l'effort transversal sur le rail extérieur augmente quand le déchargement s'opère du côté du rail intérieur.

Annexe2 :

Une simple réduction de vitesse de l'ordre de 10km/h permet de montrer :

- La disparition du pic d'insuffisance de dévers au niveau de la fin du raccordement parabolique de l'entrée de courbe,
- Que tous les véhicules de la rame ont un petit roulis encore positif c'est-à-dire qu'ils restent inclinés légèrement vers l'intérieur de la courbe,

Référence	Version	Déraillement TGV d'Eckwersheim	Page
Affaire n° 15-0761 P/CIM CAB3/2016-0155	Version 1 du 15/01/2016	Simulation du comportement dynamique	11/16

- Les déchargements des roues intérieures à la courbe sont toujours présents mais apparaissent plus ponctuellement qu'au cas précédent,
- Les efforts transversaux sur le rail extérieur diminuent sensiblement.

Annexe3 :

Une réduction de vitesse de l'ordre de 20km/h permet d'atténuer encore mieux les effets constatés à l'annexe 2.
Il n'y a plus de déchargement de roues intérieures à la courbe.

Annexe 4 et 5 :

On peut constater que les insuffisances de dévers sont bien de 223mm et 156mm pour les configurations à vitesse constante respectivement de 176km/h et 160km/h.

9 Conclusion

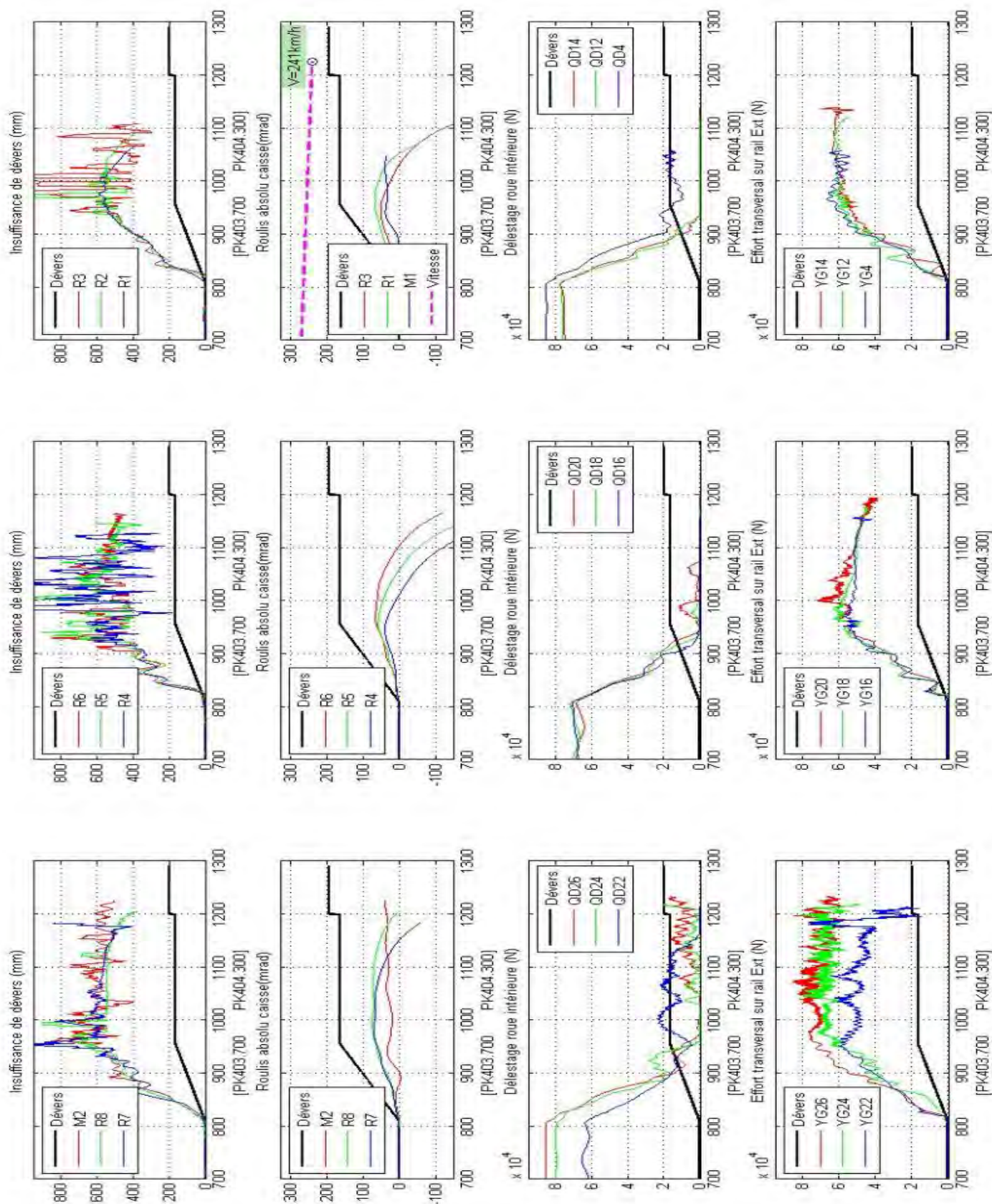
La modélisation plus précise du comportement dynamique de la rame dans la configuration de circulation du 14/11/2015, permet de montrer par la simulation numérique que la vitesse excessive de la rame est sans nul doute la cause de l'accident.

L'augmentation brutale du roulis des remorques entre la fin du raccordement parabolique de l'entrée de courbe et le PRA (pont rail), consécutivement aux déchargements des roues droites et à l'augmentation des efforts transversaux sur les roues gauches, prouvent qu'il y a bien eu renversement à la vitesse estimée de 243km/h à partir du PK403+954 et dès le passage de la motrice M2 (Le bogie AR de la motrice M2 se délestait plus que le bogie AV).

Il faut noter qu'une réduction de vitesse de l'ordre de 15km/h à 20 km/h n'aurait sans doute pas provoqué de déraillement puisque par le calcul, la configuration étudiée en Annexe 3, est limite pour une vitesse finale de 220km/h, mais ne montre aucun déchargement de roue du côté intérieur à la courbe.

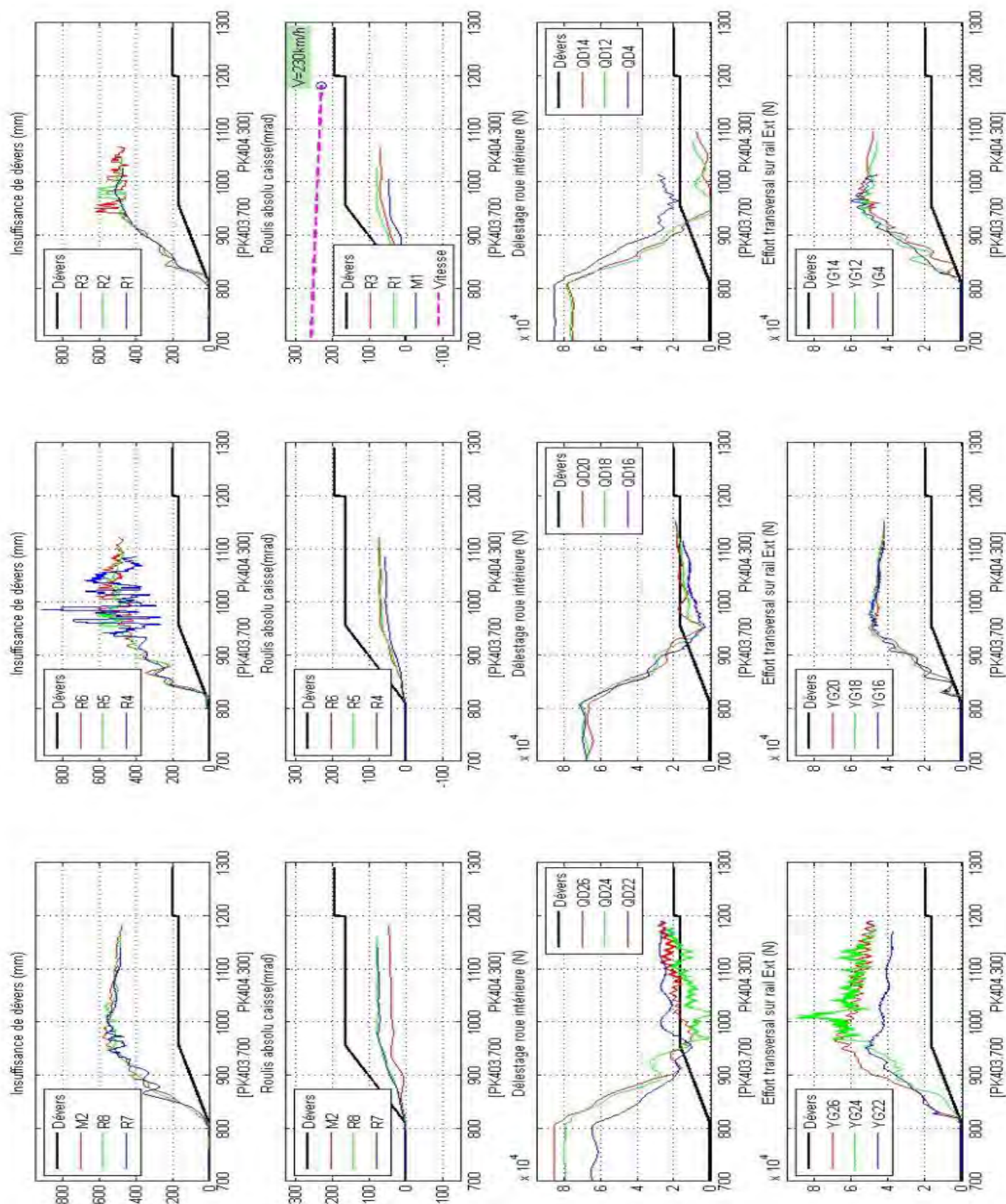
Référence	Version	Déraillement TGV d'Eckwersheim	Page
Affaire n° 15-0761 P/CIM CAB3/2016-0155	Version 1 du 15/01/2016	Simulation du comportement dynamique	12/16

ANNEXE 1 : COMPORTEMENT DANS LA CONFIGURATION DU 14 NOV 2015



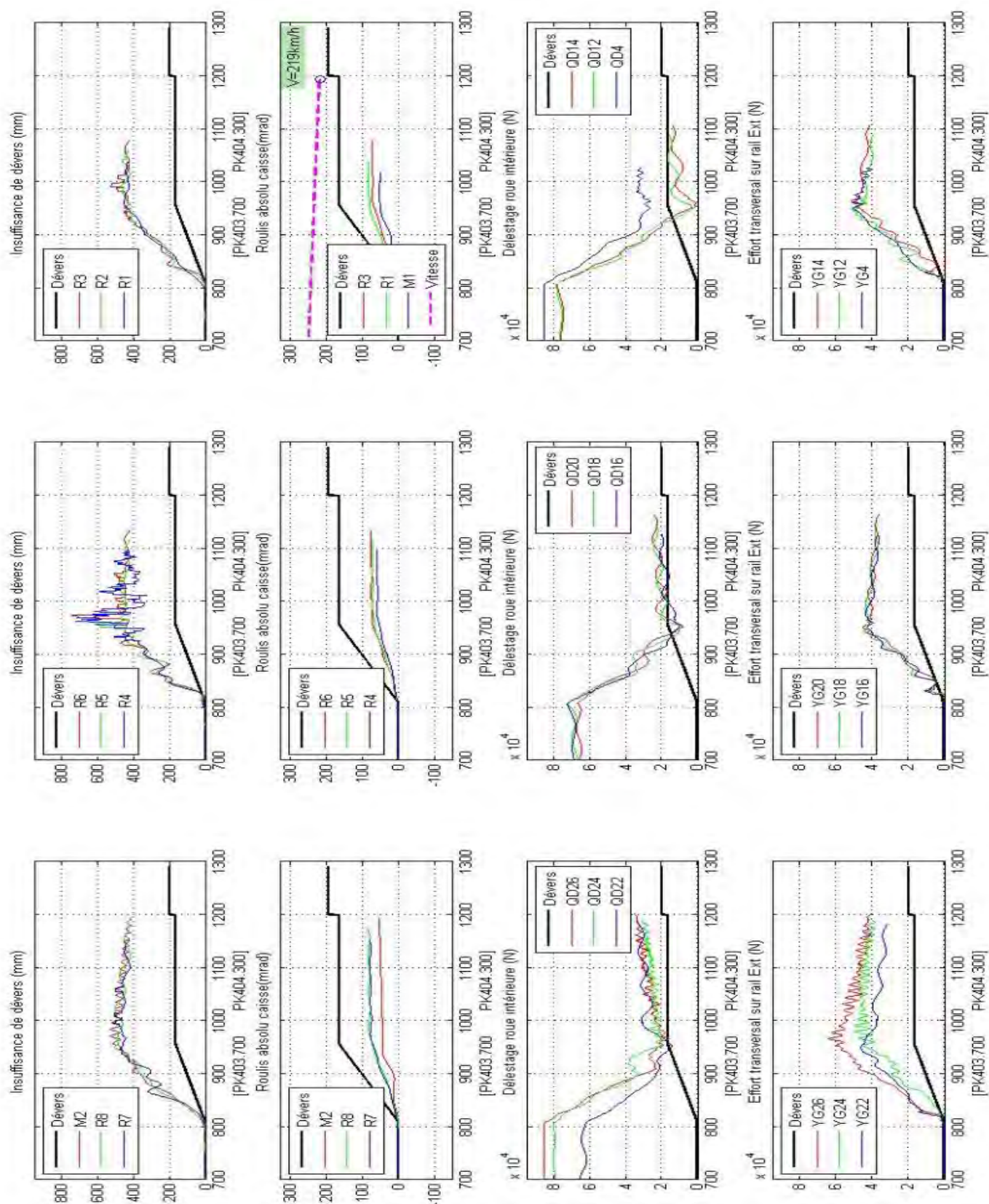
Référence	Version	Déraillement TGV d'Eckwersheim	Page
Affaire n° 15-0761 P/CIM CAB3/2016-0155	Version 1 du 15/01/2016	Simulation du comportement dynamique	13/16

ANNEXE 2 : COMPORTEMENT A VITESSE REDUITE A 230KM/H



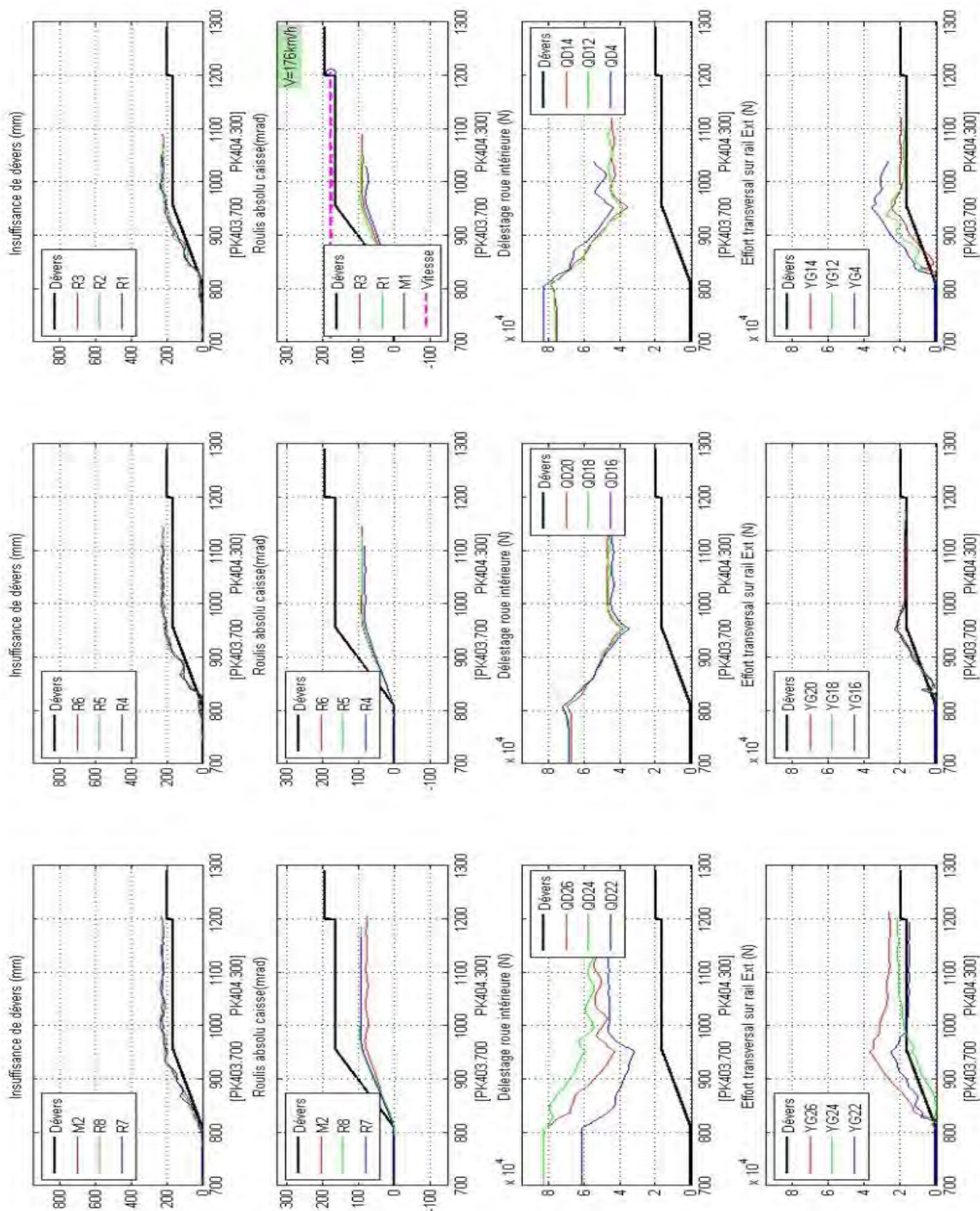
Référence	Version	Déraillement TGV d'Eckwersheim	Page
Affaire n° 15-0761 P/CIM CAB3/2016-0155	Version 1 du 15/01/2016	Simulation du comportement dynamique	14/16

ANNEXE 3 : COMPORTEMENT A VITESSE REDUITE A 220KM/H



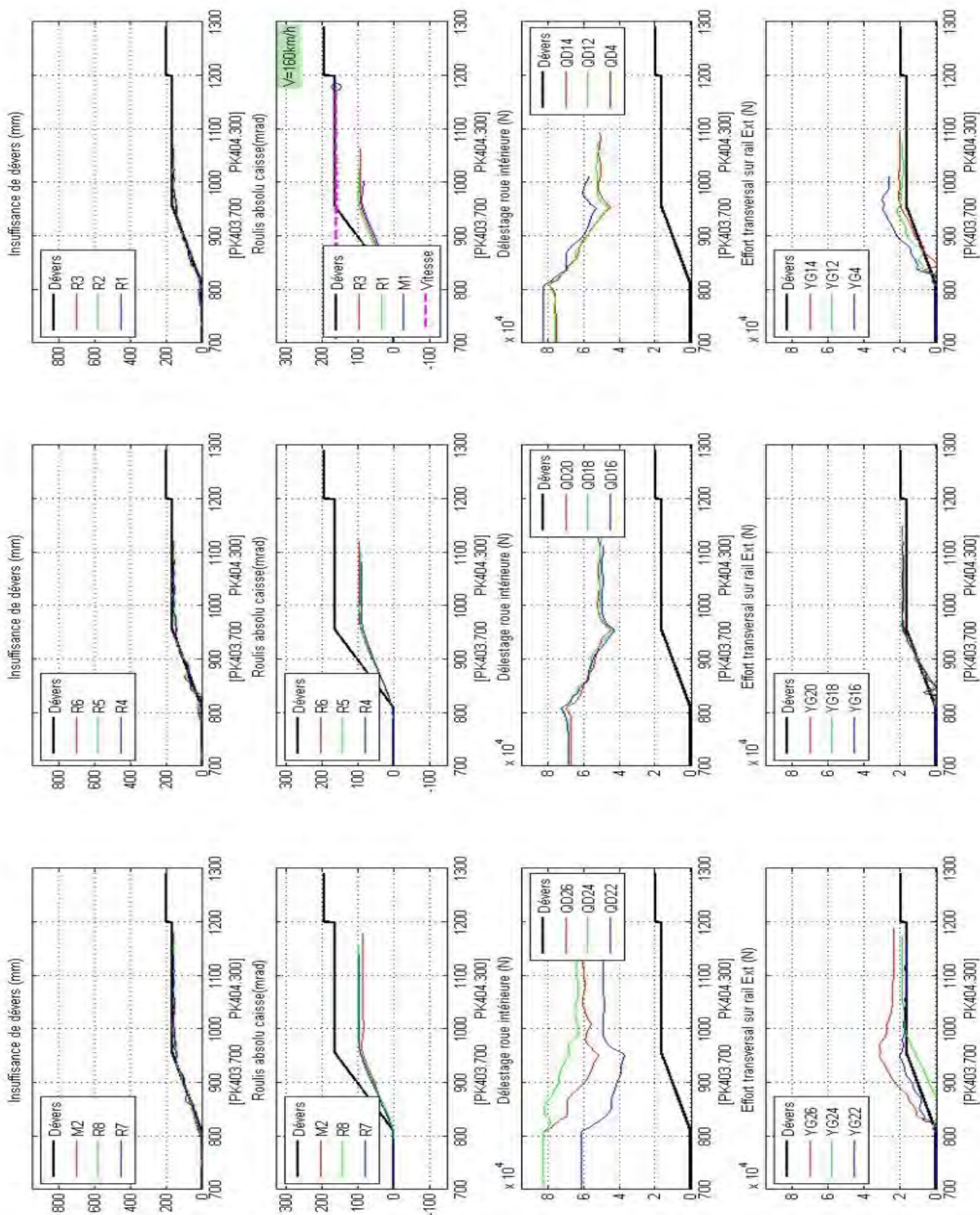
Référence	Version	Déraillement TGV d'Eckwersheim	Page
Affaire n° 15-0761 P/CIM CAB3/2016-0155	Version 1 du 15/01/2016	Simulation du comportement dynamique	15/16

ANNEXE 4 : COMPORTEMENT A VITESSE CONSTANTE V=176KM/H



Référence	Version	Déraillement TGV d'Eckwersheim	Page
Affaire n° 15-0761 P/CIM CAB3/2016-0155	Version 1 du 15/01/2016	Simulation du comportement dynamique	16/16

ANNEXE 5 : COMPORTEMENT A VITESSE CONSTANTE V=160KM/H



Annexe 8 : Mesures prises par la SNCF

LGV Est européenne phase 2

Des essais en ligne prévus, à vitesse limitée et sous contrôle de vitesse automatique

Un programme d'essai limité restant à réaliser.

A la suite de l'accident de la rame d'essais de la Ligne à Grande Vitesse Est Européenne 2eme phase du 14 novembre dernier, SNCF a décidé, dans l'attente des décisions qui seront prises à la lumière des recommandations de la mission confiée à André Claude Lacoste, de suspendre tous les essais en ligne nécessitant d'inhiber les systèmes de sécurité interdisant de circuler au-dessus des vitesses prévues en exploitation normale.

Cette suspension des essais est survenue alors que la plupart des essais de qualification de la voie et de la caténaire étaient réalisés. Les données correspondantes sont disponibles, soit sous forme informatique pour la caténaire, soit sous forme papier pour la voie, même si ces dernières sont encore détenues par la justice et que leur complétude reste à vérifier.

Pour homologuer la ligne, des essais complémentaires sont cependant nécessaires.

Il faut en effet vérifier l'ensemble de l'infrastructure puisque la continuité des circulations a été interrompue après l'accident du 14 novembre. Des circulations d'engins de mesure ont été effectuées au mois de janvier et début février mais aucune circulation à grande vitesse n'est intervenue depuis 3 mois.

Les essais d'endurance du système radio sol-train (GSMR) restent aussi à finaliser.

Vers de nouveaux essais, à vitesse limitée et sous contrôle de vitesse automatique.

Le moratoire appliqué par SNCF immédiatement après l'accident interdit jusqu'à nouvel ordre notamment toute marche d'essai à grande vitesse sur ligne à grande vitesse sans contrôle de vitesse activé et donc les marches dites en survitesse.

SNCF a examiné la possibilité de réaliser les essais restant à faire en respectant strictement ce cadre et donc en réalisant les marches correspondantes en maintenant en permanence en activité le système de contrôle de vitesse (système «TVM 430»), qui assure quotidiennement la sécurité des circulations commerciales.

Cette disposition permet de présenter un dossier d'homologation garantissant une mise en service à 300 km/h début juillet, tout en éliminant tout risque d'accident du type de celui d'Eckwersheim, le contrôle de vitesse arrêtant automatiquement le train en cas de dépassement de la vitesse limite.

Une campagne d'essais anticipant également de nouvelles règles

L'analyse des conditions d'essais de la première campagne réalisée à l'automne 2015 et des pratiques existantes a conduit à élaborer de nouvelles règles pour renforcer la sécurité des circulations d'essai nécessitant d'inhiber des systèmes de contrôle de vitesse normalement actifs.

Même si elles se feront avec ces systèmes de contrôle activés en permanence, SNCF a décidé, après échange avec la mission présidée par André Claude Lacoste, de mettre en œuvre ces nouvelles règles aussi lors des circulations d'essai à venir sur LGV Est européenne phase 2, qui débuteront le 29 février et qui dureront cinq semaines.

On peut ainsi citer la prise en compte des améliorations suivantes :

Un plan de documentation unique

Un plan de documentation, contenant tous les documents relatifs au déroulement opérationnel des essais et à leur sécurité est mis en place de manière commune à tous les acteurs participants aux essais. Ce plan de documentation permet de garantir l'accès rapide aux documents de référence, notamment pendant les phases pré-opérationnelles. Il comporte en particulier le document principal, appelé "procédure autorisant les circulations d'essais" (dit consigne d'essais), qui décrit les conditions de réalisation des essais et qui sera signé par tous les acteurs.

Une phase de préparation pré-opérationnelle renforcée

Chaque semaine les acteurs examinent, à froid, le programme de la semaine suivante et produisent les documents préparatoires nécessaires.

Parmi ces documents, une feuille de marche, émise par le chef d'essais après échange avec les intervenants de la conduite et du laboratoire embarqué, a vu son format amélioré pour mieux exprimer le besoin (notamment vitesse cible, vitesse maximale, zone de freinage, sous forme graphique). Cette feuille de marche est ensuite traduite par l'équipe de traction en fiche train, qui permettra, le jour de l'essai, d'exécuter la circulation conformément au programme.

Un briefing opérationnel renforcé

Le briefing organisé entre l'équipe d'essais et l'équipe de conduite immédiatement avant chaque marche d'essais est le moment de repartager la feuille de marche et la fiche train associée, préparées en phase pré-opérationnelle, et d'y apporter les ajustements éventuels pour tenir compte des essais précédents.

Le temps réservé au briefing a été porté à 40 mn et il peut être allongé tant que chaque acteur n'aura pas l'assurance d'être parfaitement certain des caractéristiques de l'essai suivant et ne les aura pas validées.

Ce briefing est également mieux formalisé entre les acteurs, ceux-ci signant désormais le document examiné en commun.

Un déroulement des marches mieux encadré

De nombreux autres points concernant l'organisation des essais font l'objet d'améliorations.

La présence en cabine a été limitée au strict nécessaire, de même que la présence à bord. L'une comme l'autre font l'objet d'une formalisation accrue. Les personnes n'ayant de mission en lien avec les essais ne seront pas autorisées à accéder à bord.

La consigne d'essai apporte également désormais une meilleure description du rôle de chacun des acteurs, notamment par l'ajout d'éléments graphiques permettant de visualiser les communications et par la réorganisation des échanges entre les acteurs opérationnels pour mieux respecter les missions et les responsabilités de chacun. Elle stipule par ailleurs qu'un certain nombre de comportements sont désormais interdits ou restreints, tel les appels en direction de la cabine en dehors de situation d'urgence ou prévues et la modification d'une marche d'essais en cours de circulation. Le déroulement de la marche ne doit pas multiplier les séquences, en particulier les doubles transitions de vitesse rapprochées sur un raccordement sont interdites.

Une liste des situations dangereuses a été élaborée, celles-ci donnant lieu à des fiches réflexes qui seront mises en commun entre tous les intervenants.

Prise en compte de la zone interdite

Les travaux de remise en état de la voie et du pont sur le canal endommagés à la suite du déraillement n'ont pu encore débiter, la zone étant encore mise sous scellés par la justice aux fins de l'enquête, et elle ne sera pas disponible pour la mise en exploitation du 3 juillet. La consigne d'essai en tient compte et décrit les mesures de protections prises pour en interdire l'accès.

Annexe 9 : Recommandation du rapport « Réflexions sur la sécurité de l'organisation des essais ferroviaires à grande vitesse »

Réflexions sur la sécurité de l'organisation d'essais ferroviaires à grande vitesse

André-Claude LACOSTE
Jean-Luc WYBO

Avec le soutien d'Astrid PARAKENINGS

Version complète
7 juillet 2016

Sommaire

Sommaire	2
Résumé	2
Introduction	3
1. Le processus d'essais ferroviaires.....	4
1.1. Les acteurs de la filière	4
1.2. La spécificité des essais ferroviaires.....	5
2. S'inspirer des pratiques d'essais dans d'autres domaines.....	7
2.1. Pratiques de la RATP	7
2.2. Pratiques de l'aviation civile.....	8
2.3. Pratique dans la marine nationale	11
3. Renforcer la formalisation de la gestion des risques	14
3.1. Réaliser une analyse préalable détaillée des risques liés aux essais	14
3.2. Réaliser une étude des déviations.....	16
3.3. Développer le reporting des incidents et bonnes pratiques	16
3.4. Partager le REX sur les quasi-accidents et accidents	17
3.5. Partager les informations entre acteurs.....	17
3.6. Créer une échelle de criticité des marches d'essai	18
4. Renforcer la documentation d'essais.....	19
4.1. Normer les processus qui relèvent aujourd'hui de l'usage.....	19
4.2. Rédiger des référentiels dédiés aux essais	19
4.3. Structurer la responsabilité de la sécurité des essais	20
5. Préciser l'organisation des essais	21
5.1. Analyser les risques dès la conception des essais	21
5.2. Préciser les conditions de réalisation des essais	21
5.3. Contrôler la charge cognitive induite par le volume d'essais	23
5.4. Accentuer la formation des conducteurs d'essais et des CTT.....	24
6. Résumé des principales préconisations.....	25
6.1. Dispositions techniques	25
6.2. Dispositions organisationnelles.....	26
7. Annexes.....	29
7.1. Fiche de marche d'essais.....	29
7.2. Lettre de mission.....	30

Résumé

Ce rapport répond à une demande des acteurs de la filière ferroviaire à la suite de l'accident d'Eckwersheim sur la LGV Est européenne. Il a pour objet de proposer des préconisations pour la définition et la réalisation en sécurité d'essais ferroviaires à grande vitesse et plus particulièrement de traiter les risques liés à la circulation de trains d'essais sur des lignes nouvelles et leurs raccordements au RFN.

Les documents consultés portent majoritairement sur la LGV EE, mais ce rapport a pour ambition d'être applicable à d'autres situations d'essais de LGV.

6. Résumé des principales préconisations

6.1. Dispositions techniques

6.1.1. Pour la surveillance opérationnelle des essais

Positionner deux caméras dans la cabine de conduite : une orientée sur la voie, l'autre sur le pupitre de commande (grand angle). Ces caméras sont équipées de micros et disposées de manière à ne pas gêner l'équipe de conduite. Les vidéos ainsi enregistrées sont utilisées pour la formation et l'analyse d'éventuels incidents (REX).

Les signaux audio et vidéo de ces caméras sont enregistrés et recopiés en voiture laboratoire sur le poste de travail du chef d'essais.

6.1.2. Pour la communication lors des essais

Fournir au CTT et au chef d'essais un casque-micro avec un seul écouteur pour garder le contact sonore avec l'environnement. Les échanges au travers de ce système audio sont enregistrés. Le système audio permet de relier le chef d'essais dans la voiture laboratoire avec le CTT situé dans la cabine de conduite.

6.1.3. Réserver une voiture du train d'essais pour des personnes extérieures.

Les conditions dans lesquelles d'éventuelles marches de visite sont organisées à l'issue des essais doivent faire l'objet d'un encadrement rigoureux.

Si des personnes extérieures aux équipes d'essais sont invitées à monter à bord du train d'essais, elles doivent être installées dans une voiture réservée à cet effet avec un ou des accompagnants. Les signaux vidéo et audio des caméras de la cabine de conduite sont recopiés sur grands écrans dans cette voiture. Le chef d'essais a la possibilité de couper le son et/ou l'image dans cette voiture si la situation l'exige.

Lors des essais en survitesse, aucune personne extérieure ne doit être autorisée à monter dans le train d'essais.

6.1.4. Contrôle automatique des paramètres sensibles lors des essais

Pour assurer un niveau de protection supplémentaire contre les accidents, il est souhaitable d'équiper le train et l'infrastructure d'un dispositif automatique de contrôle des paramètres jouant un rôle important dans la sécurité, notamment les vitesses maximales au long du parcours d'essai.

Néanmoins, toute technologie étant faillible et les essais étant par définition des conditions très particulières, ce dispositif doit faire l'objet d'un audit ISA afin d'obtenir un avis complémentaire sur le caractère GAME¹⁸ du nouveau système d'exploitation « équipe de conduite + boucle technique de contrôle automatique » par rapport au système d'exploitation de référence « équipe de conduite seule », ceci pour des essais sur une concession non encore intégrée au RFN.

Ce dispositif peut être un dispositif utilisé en exploitation, reprogrammé pour les conditions d'essai ou un dispositif spécialement conçu pour les conditions d'essai.

¹⁸ GAME : globalement au moins équivalent (ici en termes de sécurité)

6.1.5. Limiter les essais à risque par la simulation

Dans de nombreux domaines d'activité présentant de forts risques, il est d'usage de procéder à des simulations plutôt qu'à des essais en vraie grandeur, lorsque ces essais vont au delà des limites d'exploitation, afin de ne pas exposer inutilement des personnes. C'est notamment le cas des essais de sous-marins militaires (voir plus haut).

Dans le cas des essais de LGV, il pourrait être étudié la possibilité de réaliser des simulations numériques pour les essais en survitesse, après avoir validé les modèles de simulation sur les résultats des essais jusqu'aux vitesses d'exploitation.

6.2. Dispositions organisationnelles

6.2.1. Pour la montée en compétence des conducteurs d'essais

Concevoir un **module de formation des conducteurs et des CTT** à la conduite de trains d'essais, donnant lieu à une habilitation spécifique, obligatoire pour conduire des trains d'essais à grande vitesse.

6.2.2. Pour la gestion des risques

Procéder à une **analyse des risques** pour chaque campagne d'essais. Cette analyse doit indiquer les mesures prises pour réduire les risques associés à chaque situation dangereuse identifiée. Cette analyse des risques est réalisée en trois phases :

- **Analyse des modes de défaillance et de leur criticité.** Cette analyse doit passer en revue tous les composants et sous-systèmes (de l'infrastructure et du train d'essais) en détaillant pour chacun les modes de défaillance, leurs causes et conséquences et les mesures de réduction de la criticité. Cette analyse est réalisée lors de la conception et lors de chaque modification d'un ou plusieurs sous-systèmes.
- **Analyse des situations dangereuses** qui peuvent se présenter lors des essais. Pour chaque situation, détailler les causes, les conséquences et les mesures de prévention et de protection à mettre en place. Représenter chaque situation dangereuse sous la forme d'un nœud papillon destiné à faciliter la compréhension par les différents acteurs (notamment l'équipe de conduite) des risques et des mesures de prévention et de protection.
- **analyse des déviations** pour identifier pour toutes les phases d'essais les déviations possibles de paramètres (physiques, contextuels et de commande) pouvant avoir des conséquences sur la sécurité, et choisir les mesures à prendre pour éliminer ces déviations ou en atténuer les effets si elles se produisent.

Formaliser ces analyses de risques dans des documents décrivant toutes les situations de risque identifiées, leurs causes, leurs conséquences potentielles et les mesures prises pour éliminer les causes et protéger contre les conséquences. Ces documents doivent être mis à jour au fur et à mesure des retours d'expérience.

Rédiger des fiches réflexes pour toutes les situations de déviation et d'incident identifiées, les rassembler dans un manuel des situations d'urgence distribué sous une forme adéquate aux principaux acteurs : conducteur, CTT, agent d'accompagnement et chef d'essais.

Si nécessaire, affiner les analyses des situations dangereuses et des déviations pour des marches d'essais particulières (vitesses, particularités de la voie, complexité de l'essai, ...). Cette analyse doit associer l'équipe d'ingénierie et l'équipe de conduite.

Définir une échelle de criticité pour les marches d'essais ; en fonction de ce niveau de criticité (sur le modèle des essais dans le domaine aéronautique), des mesures particulières pourraient être prises, notamment quant aux personnes autorisées à monter dans le train et au contenu et la durée des briefings avant marche (chef d'essai et CTT puis CTT, conducteur et ADC2).

6.2.3. Pour la gestion des vitesses de marche

L'organisateur de l'essai (celui qui pour le compte du maître d'ouvrage organise et fait réaliser l'essai en vue de démontrer le niveau de sécurité du système ou sous-système concerné) doit établir l'enveloppe des vitesses en tout point du parcours d'essai :

- d'une part la vitesse minimale souhaitable pour que l'essai soit utile ;
- d'autre part la vitesse maximale permettant sa réalisation en sécurité compte tenu des caractéristiques de la rame, de l'infrastructure et du résultat des essais précédents.

Il lui appartient de s'entourer des expertises nécessaires pour ce faire.

Le CTT détermine le profil précis de la marche s'inscrivant dans cette enveloppe, avec les pk des points de freinage et les autres éléments nécessaires à la conduite qui seront repris sur la feuille de marche d'essai, avec l'appui des expertises nécessaires de l'AEF ou du CIM. Ces éléments sont présentés au conducteur et à l'ADC2 lors du briefing en cabine avant chaque marche.

Un regard croisé sur les caractéristiques précises de chaque marche est nécessaire ; si le CTT estime ne pas pouvoir réaliser la marche dans cette enveloppe en sécurité, il lui appartient de revenir vers le chef d'essais pour redéfinir les conditions permettant la réalisation de l'essai en sécurité.

6.2.4. Poste de travail du chef d'essais

Il est souhaitable de créer un poste de travail pour le chef d'essais dans la voiture laboratoire, qui lui permette de surveiller dans de bonnes conditions le déroulement de la marche d'essais et d'assurer une boucle de sécurité supplémentaire. Ce poste de travail pourrait être composé de :

- Casque audio pour la liaison avec le CTT en cabine de conduite ;
- Le ou les écrans de recopie des caméras de cabine ;
- Place disponible suffisante pour étaler des documents papier ;
- L'écran de suivi de la conduite : Pk et vitesse en fonction du temps et/ou indications d'un éventuel système de sécurité supplémentaire de contrôle de la vitesse en fonction du parcours d'essai ;
- Diagramme complet de la ligne à essayer, avec indication claire des **zones de danger** (courbes, appareils de voie) ;
- Le livret des fiches réflexes ;
- Un bouton de freinage d'urgence.

6.2.5. Pour le partage des informations entre tous les acteurs concernés

Concevoir une « fiche de marche d'essais » (pour la cabine de conduite) spécifique pour une marche d'essais donnée. Ce document (de format A4) est préparé à l'avance et discuté lors du briefing précédant la marche d'essais (voir annexe).

Rendre obligatoire le briefing avant chaque marche. Ce briefing doit réunir à minima le chef d'essais et le CTT. Les participants discutent de la marche à réaliser sur la base de la fiche de marche d'essais préalablement imprimée/renseignée et signent ce document pour certifier qu'ils en ont bien pris connaissance.

Prévoir un temps de préparation minimal avant chaque marche. Ce temps de préparation est destiné à permettre au CTT de préparer la marche suivante, de participer au briefing, puis de présenter au conducteur et à l'ADC2 les conditions particulières de la marche et le rôle précis de chacun (CTT, conducteur et ADC2) au cours de la marche.

Instaurer un débriefing après chaque marche d'essais. Au cours de ce débriefing qui réunit l'équipe de conduite, l'agent d'accompagnement et le chef d'essais, le document de conduite est finalisé en renseignant la zone de commentaires (incidents, signaux faibles, bonnes pratiques).

6.2.6. Pour la maîtrise du nombre de personne en cabine

Le nombre de personnes en cabine est strictement limité à 4 : le conducteur (ADC1), le second conducteur (ADC2), le CTT et l'agent d'accompagnement. En dehors de ces 4 personnes, aucune personne ne peut pénétrer dans la cabine pendant les marches d'essais en survitesse.

Sur décision du chef d'essais et à l'issue d'une analyse de risque conjointe avec le CTT intégrant notamment l'organisation du placement et les rôles en cabine, une personne supplémentaire dont la présence est strictement nécessaire dans l'intérêt de la conduite (encadrant, auditeur, ...) peut ponctuellement participer en cabine à une marche d'essais sans survitesse, en plus de ces 4 personnes.

6.2.7. Pour l'amélioration continue des conditions d'essais

Rendre obligatoire la réalisation d'un retour d'expérience lorsqu'une situation non prévue dans l'essai et couverte ou non par une fiche réflexe se produit. Ce retour d'expérience doit aboutir à la mise à jour des analyses de risques, à des préconisations, à la création d'une nouvelle fiche réflexe si nécessaire et éventuellement à la modification des procédures d'essais.

Stocker les données des caméras vidéo en cabine et des échanges par le système audio sur un support mobile (clé USB) pour la formation et pour une analyse lors du retour d'expérience, si des situations non prévues ont été rencontrées lors de la marche.

Archiver toutes les données techniques et les données des caméras vidéo en fin de journée sur un serveur sécurisé hors de la rame d'essais.



Bureau d'Enquêtes sur les Accidents de Transport Terrestre



Tour Pascal B

92055 La Défense cedex

Téléphone : 01 40 81 21 83

Télécopie : 01 40 81 21 50

bea-tt@developpement-durable.gouv.fr

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

