

**RAPPORT
D'ENQUÊTE TECHNIQUE**
**sur le déraillement d'un TGV
sur la ligne à grande vitesse
Est européenne
le 5 mars 2020
à Ingenheim (Bas-Rhin)**

Janvier 2022

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. Sans préjudice, le cas échéant, de l'enquête judiciaire qui peut être ouverte, elle consiste à collecter et analyser les informations utiles, à déterminer les circonstances et les causes certaines ou possibles de l'évènement, de l'accident ou de l'incident et, s'il y a lieu, à établir des recommandations de sécurité. 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.

Glossaire

- **ATESS** : acquisition et traitement des évènements de sécurité en statique
- **Cerema** : Centre d'études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement
- **COS** : centre opérationnel des services aux clients
- **DB 537** : numérotation abrégée du déblai de Lupflenmatt situé sur la ligne à grande vitesse Est européenne, au droit des communes d'Ingenheim et de Duntzenheim
- **DBC** : détecteur de boîte chaude
- **DOE** : dossier des ouvrages exécutés
- **ERTMS** : European Rail Traffic Management System, système de signalisation européen de gestion du trafic ferroviaire
- **GSM-R** : Global System for Mobile communications – Railways, dernière génération de radio sol-train
- **LGV** : ligne à grande vitesse
- **LGV EE** : ligne à grande vitesse Est Européenne reliant Paris et Strasbourg
- **PK** : point kilométrique
- **RFF** : Réseau Ferré de France, ancienne dénomination du gestionnaire d'infrastructure, désormais SNCF Réseau
- **SNCF** : Société Nationale des Chemins de fer Français
- **SNCF Voyageurs** : Entreprise ferroviaire de transport de voyageurs du groupe SNCF
- **SNCF Réseau** : Gestionnaire d'infrastructure du groupe SNCF
- **TVM** : transmission voie-machine, système de signalisation d'un TGV

Bordereau documentaire

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

Titre du document : Rapport d'enquête technique sur le déraillement d'un TGV sur la ligne à grande vitesse Est européenne survenu le 5 mars 2020 à Ingenheim (67)

Affaire n° BEATT-2020-03

N° ISRN : EQ-BEAT--22-1--FR

Proposition de mots-clés : déraillement, TGV, glissement de talus, déblai

Synthèse

Jeudi 5 mars 2020 à 7 h 32, le TGV 2350 en provenance de Colmar et à destination de Paris parcourt la ligne à grande vitesse Est Européenne. Empruntant une zone de la ligne en déblai au droit de la commune de Duntzenheim, il heurte à 284 km/h un monticule de terre recouvrant la voie.

Sous le choc, le TGV déraile. La motrice avant se déporte et traverse la plate-forme. Elle vient se positionner à cheval sur la voie opposée. Les trois premières remorques déraillent également restant à cheval sur la voie initiale. Les éléments articulés de la rame restent solidaires et continuent leur course sans dévier de la plateforme ferroviaire jusqu'à leur immobilisation complète, 1 635 mètres après le choc initial, sur le territoire de la commune d'Ingenheim. Les roues qui avaient déraillé sont restées guidées en butée par les rails.

Le monticule de terre heurté initialement provenait de l'effondrement par glissement, quelques minutes avant le passage du TGV, d'un talus de déblai adjacent à la voie.

Le bilan humain de cet accident est de un blessé grave, le conducteur du train, et de 21 blessés légers parmi les 307 personnes qui étaient à bord. Le bilan matériel est important. La motrice avant et les trois premières remorques ont subi des dommages conséquents. Les deux voies ont été mises hors d'usage sur les 1 635 mètres parcourus par les roues qui ont déraillé. Le talus du déblai situé au lieu origine du déraillement est effondré sur toute sa hauteur et sur une largeur d'une soixantaine de mètres.

La cause immédiate du déraillement du TGV est le heurt du dépôt de matériau sur la voie provenant du glissement du talus adjacent.

La cause du glissement du talus est l'instabilité de celui-ci en raison de la faible résistance d'une formation géologique particulière le constituant : des argiles du Domérien. La résistance de cette formation avait été surestimée lors de la justification de la stabilité à l'époque de la conception.

Un comportement évolutif dans le temps des argiles, qui est caractéristique de ce matériau, ou des apports d'eau potentiellement élevés peuvent expliquer que l'instabilité ne se soit révélée qu'après quatre années d'exploitation de la ligne.

Plusieurs facteurs ont été identifiés comme ayant pu concourir à cette situation :

- > la faiblesse des reconnaissances des sols en ce qui concerne la détermination des paramètres géomécaniques utilisés pour la justification de la stabilité en conception ;
- > la non-vérification du choix de ces paramètres malgré plusieurs effondrements survenus en cours du chantier de terrassement ;
- > la non-détection de ces deux insuffisances par les acteurs impliqués dans le projet, aucun n'ayant joué, au niveau de contrôle le concernant, le rôle de boucle de rattrapage pourtant permise par son intervention.

Le bilan humain atténué de l'accident, malgré l'ampleur des dommages, s'explique par l'excellent comportement de la rame dans son interaction avec la voie après le déraillement. Des chocs sur le matériel roulant ont pour autant provoqué un endommagement de circuits électriques de la motrice de tête et la perte d'une fonction importante de sécurité, celle de l'alerte radio, sans toutefois prêter à conséquence.

Le BEA-TT émet quatre recommandations et trois invitations pour prévenir ce type d'accident dans les domaines suivants :

- le parachèvement de la mise en sécurité du talus et des talus présentant le même risque sur la ligne à grande vitesse Est Européenne ;
- les prescriptions concernant les campagnes géotechniques de reconnaissance des ouvrages en terre des lignes nouvelles ;
- les pratiques de justification de la stabilité des ouvrages en terre par les concepteurs ;
- l'amélioration des méthodes de surveillance des déblais ;
- l'amélioration des règles de surveillance des ouvrages de drainage ;
- le renforcement de la robustesse de l'alerte radio.

SOMMAIRE

SYNTHÈSE.....	3
1 - CONSTATS IMMÉDIATS ET ENGAGEMENT DE L'ENQUÊTE.....	8
1.1 - Les circonstances de l'accident.....	8
1.2 - Le bilan de l'accident.....	10
1.3 - Les mesures prises après l'accident.....	10
1.4 - L'engagement et l'organisation de l'enquête.....	11
2 - LE CONTEXTE DE L'ACCIDENT.....	12
2.1 - La ligne à grande vitesse Est Européenne.....	12
2.2 - Le TGV 2350.....	13
2.3 - Les caractéristiques de la ligne dans la zone de l'accident.....	14
2.4 - Le déblai DB 537 de Lupflenmatt.....	16
2.5 - La construction du déblai.....	18
2.5.1 - Les intervenants ayant contribué à la construction du déblai.....	18
2.5.2 - Le calendrier.....	19
2.6 - La météorologie.....	20
2.7 - La sismologie.....	21
3 - LES INVESTIGATIONS SUR LES CIRCONSTANCES DE L'ACCIDENT.....	23
3.1 - Les résumés des déclarations.....	23
3.1.1 - Le conducteur du TGV 2350.....	23
3.1.2 - Le contrôleur présent dans la rame.....	23
3.1.3 - L'un des conducteurs de train voyageant dans la rame.....	24
3.1.4 - L'autre conducteur de train présent dans la rame.....	25
3.1.5 - Le coordonnateur régional des circulations pour l'Alsace.....	25
3.1.6 - Le chef circulation du poste de commande à distance.....	26
3.2 - L'examen de l'enregistrement des paramètres de conduite.....	27
3.3 - L'analyse des enregistrements au sol.....	29
3.3.1 - Le graphique de circulation des trains.....	29
3.3.2 - Le désarchivage du poste de signalisation.....	30
3.4 - Les premiers constats sur le talus effondré.....	31
3.5 - Les dommages sur la rame accidentée.....	33
3.5.1 - Les dommages à la motrice avant.....	33
3.5.2 - Les dommages à la liaison motrice M1 - remorque R1.....	34
3.5.3 - Les dommages aux remorques et à la motrice de queue.....	35
3.6 - Les dommages à la voie et la cinématique du déraillement.....	36
3.7 - L'analyse de la non-transmission de l'alerte radio.....	40

3.7.1 - L'analyse de l'installation de radio au « sol ».....	40
3.7.2 - L'analyse de l'installation de radio à « bord ».....	41
3.8 - Conclusion intermédiaire sur la cause du déraillement.....	43
4 - LES INVESTIGATIONS SUR LE GLISSEMENT DE TALUS.....	44
4.1 - Notions générales sur l'évaluation de la stabilité des talus au glissement.....	44
4.2 - Les sols en présence.....	46
4.3 - Les investigations sur site postérieures au glissement.....	49
4.3.1 - Le levé topographique du glissement.....	49
4.3.2 - Les constats sur les circulations d'eau lors du déblaiement.....	49
4.3.3 - L'inspection des réseaux de drainage.....	51
4.3.4 - La campagne géotechnique complémentaire.....	53
4.4 - Les choix de conception des ouvrages de drainage.....	55
4.5 - L'évaluation de la stabilité lors des études.....	58
4.5.1 - Les caractéristiques géomécaniques des sols.....	58
4.5.2 - La validation de la conception.....	60
4.5.3 - Le point de vue réglementaire sur la consistance de la campagne géotechnique.....	61
4.6 - Les désordres survenus en cours de travaux.....	62
4.7 - Les enseignements de la surveillance du déblai.....	65
4.8 - L'interprétation des causes du glissement.....	66
4.8.1 - La stabilité à long terme du glissement.....	66
4.8.2 - L'évolution de la stabilité au cours du temps.....	67
4.8.3 - Les résultats de l'interférométrie radar.....	68
4.8.4 - Conclusion sur la cause du glissement.....	69
4.9 - Le retour d'expérience national des déraillements sur ligne à grande vitesse.....	70
4.10 - Le retour d'expérience national sur les incidents d'ouvrage en terre.....	72
4.11 - Les actions mises en œuvre postérieurement à l'accident.....	72
5 - ANALYSE DU DÉROULEMENT DE L'ACCIDENT ET DES SECOURS.....	74
6 - ANALYSE DES CAUSES ET FACTEURS ASSOCIÉS, ORIENTATIONS PRÉVENTIVES.	76
6.1 - L'arbre des causes.....	76
6.2 - Les causes de l'accident.....	77
6.3 - La consistance des reconnaissances géotechniques pour la justification en stabilité des talus de déblai sur LGV.....	78
6.4 - Le traitement du risque d'instabilité sur les talus de la LGV EE.....	79
6.5 - La surveillance des ouvrages en terre sur ligne à grande vitesse.....	79
6.6 - La disponibilité de la radio sol-train.....	80
7 - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	82
7.1 - Conclusions.....	82
7.2 - Recommandations.....	83

ANNEXES.....	84
Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête.....	85
Annexe 2 : Schéma de signalisation dans le secteur de l'accident.....	86
Annexe 3 : Plan de génie civil conforme à l'exécution dans la zone de glissement.....	87
Annexe 4 : Informations sur le risque sismique.....	88
Annexe 5 : Trains en circulation avant et juste après le TGV 2350.....	89
Annexe 6 : Description et analyse des dommages à la voie.....	90
Annexe 7 : Description des opérations de surveillance.....	94

1 - Constats immédiats et engagement de l'enquête

1.1 - Les circonstances de l'accident

Jeudi 5 mars 2020 à 7 h 32, le TGV 2350 en provenance de Colmar et à destination de Paris parcourt la ligne à grande vitesse Est Européenne (LGV EE). Empruntant une zone de la ligne en déblai au droit de la commune de Duntzenheim, il heurte à 284 km/h un monticule de terre recouvrant la voie et provenant du glissement du talus adjacent à la voie.

Le choc se produit au point kilométrique (PK) **390,980**. Sous le choc, la motrice se déporte, traverse la plate-forme et se positionne à cheval sur la voie opposée. Les trois premières remorques déraillent aussi, restant toutefois à cheval sur la voie initiale. Les éléments articulés de la rame restent solidaires. Ils ne dévient pas de la plateforme ferroviaire, les roues qui ont déraillé étant guidées en butée contre les rails. Le TGV, dont le conducteur a actionné le freinage d'urgence, s'immobilise au **PK 389,345**. Il a parcouru très exactement **1 635 mètres** en 40 secondes après le choc avant de s'arrêter.



Figure 1 : le talus de déblai effondré quelques heures après l'accident



Figure 2 : Le TGV vu de l'avant après son immobilisation

Dès l'immobilisation du train, le contrôleur à bord donne l'alerte. Le conducteur, jeté au sol dans sa cabine, est grièvement blessé.

Prévenus, les personnels au sol en charge de la gestion des circulations arrêtent les circulations en cours. Aucun train n'arrive en sens inverse au moment de l'accident. Un autre TGV s'apprêtait à suivre le TGV 2350 sur la ligne. Il est, au moment de l'accident, en partance de Strasbourg, à une distance de 25 km. Il est retenu à Vendenheim, à l'entrée de la ligne à grande vitesse.

Les services de secours sont prévenus. Des médecins, présents à bord du TGV, assurent les premiers gestes. Les pompiers arrivent sur place à 8 h 05. Ils évacuent le conducteur blessé et portent assistance aux passagers.

Le lieu d'arrêt du TGV est situé dans une zone en remblai. Les secours peuvent y accéder par un point d'accès à la voie, raccordé à la route départementale 667 et situé à une distance de 150 mètres de la queue du train après son arrêt. L'évacuation des voyageurs débute vers 10 h 45 et se termine à 11 h 45.



Figure 3 : le site d'évacuation vu de la RD 667



Figure 4 : le point d'accès (à gauche) du gestionnaire d'infrastructure à proximité

1.2 - Le bilan de l'accident

Le bilan humain de l'accident est de un blessé grave, le conducteur du TGV, et de 21 blessés légers parmi les 307 personnes qui étaient à bord.

Le blessé grave a été évacué en hélicoptère vers un service hospitalier d'urgence. Il est resté hospitalisé durant 12 jours. Il a ensuite eu une convalescence de quelques mois, puis a pu reprendre la conduite des trains normalement.

Le bilan humain, que nous pouvons considérer comme mesuré pour une catastrophe de cette ampleur, s'accompagne d'un bilan matériel lourd.

Les deux voies de la ligne à grande vitesse (LGV) sont hors d'usage sur les 1 635 mètres de ligne parcourues par le train une fois déraillé. Quelques installations de signalisation situées en voie (détecteurs, balises) sont détruites. La caténaire d'alimentation électrique est, elle, peu touchée. Le talus du déblai situé au lieu origine du déraillement, au PK 390, 985, est effondré sur une hauteur de 17 mètres et sur une largeur d'une soixantaine de mètres.

Les dommages sur la rame de TGV, composée d'une unité simple, sont conséquents. Les bogies et les bas de caisse de la motrice avant, et ceux des trois premières remorques qui ont déraillé, sont touchés. La majorité des vitres du train sont fendues par les projections de ballast sans avoir toutefois volé en éclat.

1.3 - Les mesures prises après l'accident

À la suite de l'accident, la section de la ligne à grande vitesse comprise entre Baudrecourt et Eckwersheim est fermée à la circulation. Les trains commerciaux en direction et en provenance de Strasbourg sont détournés sur la ligne « classique » par les deux raccordements entre la ligne à grande vitesse et la ligne classique situés à Baudrecourt, à l'ouest, et à Vendenheim à l'est. Ce détournement entraîne un allongement de parcours de 32 minutes.

L'opération de relevage de la rame a débuté le lendemain de l'accident. L'évacuation complète de la rame s'est achevée cinq jours plus tard, le 11 mars 2020.

Les opérations de mise en sécurité et de déblaiement du talus effondré ont commencé le lendemain de l'accident. Toutefois, dix jours plus tard, la mise en confinement général de la population française afin de ralentir la progression de la pandémie Covid-19 est venue compliquer ces opérations. Les travaux sur le talus ont aussi été temporairement arrêtés à la demande du tribunal de Strasbourg pour les besoins de l'enquête judiciaire.

Les travaux de réparation du talus ont duré 3 mois, auxquels se sont ajoutés 3,5 mois supplémentaires pour prendre les mesures de précaution de suivi en continu des talus nécessaires pour faire circuler les trains en sécurité. L'exploitation a repris le 27 septembre 2020 avec toutefois une vitesse limitée à 80 km/h sur tout le secteur de l'accident, dans l'attente d'une mise en sécurité définitive de la zone.

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

Au vu des circonstances et du contexte de l'accident, le directeur du bureau d'enquêtes sur les accidents de transport terrestre (BEA-TT) a ouvert le jour de l'accident, 5 mars 2020, une enquête technique en application des articles L.1621-1 à L.1622-2 du code des transports.

L'accident entre dans la catégorie des accidents « graves » qui doivent faire l'objet d'une enquête obligatoire selon le Code des transports s'agissant d'un déraillement ayant entraîné des dégâts matériels importants¹. Le montant des dommages de l'accident a en effet été évalué en analyse immédiate par le BEA-TT comme supérieur à 40 M€ (10 M€ pour le matériel roulant et 30 M€ pour l'infrastructure) hors pertes d'exploitation.

Les enquêteurs techniques du BEA-TT se sont rendus sur place immédiatement après l'accident. Ils ont rencontré les représentants de SNCF Réseau, gestionnaire d'infrastructure, et de SNCF Voyageurs, entreprise ferroviaire. Ils ont recueilli les témoignages ou déclarations écrites des opérateurs impliqués. Ils ont rencontré le directeur d'enquête en charge de l'enquête de flagrance diligentée par le parquet de Strasbourg. Ils ont par la suite rencontré les représentants de l'entreprise de travaux qui avait réalisé l'ouvrage effondré, ainsi que le maître d'œuvre de ces travaux. Les enquêteurs ont eu communication de l'ensemble des pièces, documents et rapports d'analyse de ces entités, demandés pour leur enquête.

Pour les investigations et analyses concernant la rupture de l'ouvrage en terre, ils ont eu à leur disposition les éléments de procédure recueillis dans le cadre d'une procédure instruite par le tribunal administratif de Paris sur saisine venant de SNCF Réseau. Ils ont à ce titre reçu plusieurs contributions d'experts missionnés par les parties sur l'analyse de l'évènement, notamment un rapport d'experts mandatés par SNCF Réseau, et un autre d'experts mandatés par le maître d'œuvre de la construction. Les enquêteurs ont également eu à leur disposition le rapport de l'expert judiciaire missionné par le procureur de la République de Strasbourg dans le cadre de la procédure pénale. Le BEA-TT s'est enfin adjoint le concours d'experts du Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (Cerema)², organisme indépendant des parties prenantes rencontrées dans le cadre de l'enquête.

Les conclusions des expertises sont contrastées et divergent notablement dans l'interprétation des causes de l'accident. Les enquêteurs du BEA-TT ont donc établi leurs conclusions sur la base des éléments factuels recueillis, transcrits dans ce rapport, en se limitant à l'interprétation de ces seuls éléments, et en prenant leur distance par rapport à certaines interprétations insuffisamment étayées. Les résultats saillants de leur propre analyse ont semblé suffisants au BEA-TT pour comprendre les raisons principales de l'accident et émettre des recommandations de sécurité, qui sont les objectifs de l'enquête de sécurité.

1 Il s'agit en effet, selon l'article L.1621-2 du Code des transports, d'un « déraillement de train faisant [...] d'importants dommages au matériel roulant, à l'infrastructure ou à l'environnement [...], sachant que l'on entend par « dommages importants » des dommages qui peuvent être immédiatement estimés par l'organisme d'enquête à un total d'au moins deux millions d'euros. »

2 Le Cerema est un établissement public à caractère administratif. Au niveau national et territorial, il constitue le centre de ressources et d'expertises techniques et scientifiques du ministère des transports, en appui aux services de l'État et aux collectivités locales. Créé en 2014, il a réuni divers organismes du réseau scientifique et technique de l'État.

2 - Le contexte de l'accident

2.1 - La ligne à grande vitesse Est Européenne

La ligne à grande vitesse Est Européenne (LGV EE) est une ligne « nouvelle » permettant de relier Paris, gare de l'Est, à Strasbourg. Elle a été construite en deux phases. La première phase s'est achevée mi-2007. Longue de 300 km, elle s'étend de Vaires-sur-Marne, près de Paris, à Baudrecourt dans le département de la Moselle. Elle a permis de relier Paris à Strasbourg en 2 h 20 (au lieu de 4 heures). La seconde phase a été mise en service à l'été 2016. Longue de 106 km, elle s'étend de Baudrecourt à Vendenheim près de Strasbourg. Cette phase a permis de gagner 32 minutes supplémentaires sur les trajets Paris-Strasbourg (1 h 48 au lieu de 2 h 20). L'accident est localisé sur le tracé de cette seconde phase (voir figure ci-dessous).

La ligne porte le numéro 005 000 du réseau ferré national. Parcourue à 320 km/h, elle était, à sa mise en service, la ligne ferroviaire possédant la vitesse commerciale la plus élevée au monde. C'est également sur la première phase de la ligne que fut battu, en 2007, le record du monde absolu de vitesse sur rail, à 574,8 km/h.

La ligne est électrifiée en courant alternatif 25 000 volts. Comme les autres LGV françaises, elle est équipée d'un système de signalisation qui s'affiche en cabine de conduite, dit par transmission voie-machine (TVM), dans sa dernière version dite TVM 430. S'y juxtapose le système de signalisation européen de gestion du trafic ferroviaire (ERTMS pour European Rail Traffic Management System), faisant de la LGV EE la première ligne à grande vitesse française « interopérable », c'est-à-dire apte à la circulation de trains à grande vitesse européens. C'est ainsi qu'y circulent les rames automotrices à grande vitesse allemandes, Intercity-Express de 3^e génération (ICE 3). Le TGV accidenté circulait toutefois sous système de signalisation TVM 430, le conducteur n'étant habilité qu'à ce système.

Les circulations sur la ligne sont gérées depuis le poste de commande à distance (PCD) qui est situé à Pagny-sur-Moselle. Les liaisons radio entre le poste et le train s'effectuent par le système GSM-R (Global System for Mobile communications – Railways).

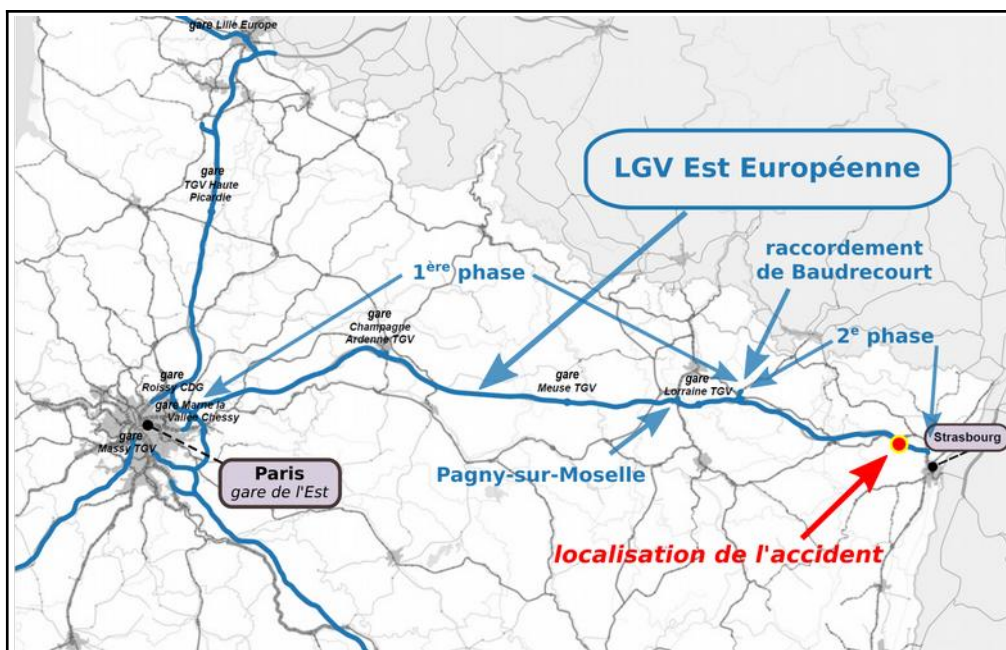


Figure 5 : le plan de situation de la ligne

La construction de la deuxième phase de la ligne a connu un dramatique accident ferroviaire, le 14 novembre 2015. Alors que la ligne était en essai en vue de son homologation, la rame procédant aux essais a intégralement déraillé près de la commune d'Eckwersheim, provoquant le décès de 11 personnes³.

Le trafic commercial de la LGV EE est constitué de TGV nationaux desservant notamment Metz, Nancy et Strasbourg, ainsi que de TGV internationaux desservant le Luxembourg, l'Allemagne et la Suisse depuis Paris. Sur la section de ligne de deuxième phase, le jeudi de l'accident, il aurait dû circuler sur la journée 45 trains en cumul des deux sens de circulation. Les trains circulent entre 5 h 45 et 22 h 10, la ligne étant fermée la nuit pour permettre les travaux de maintenance.

2.2 - Le TGV 2350

Le TGV 2350 est un TGV reliant Colmar à Paris-Est ayant un départ à 6 h 38 et une arrivée prévue à 9 h 05. Il fait deux arrêts en Alsace : Sélestat à 6 h 52 et Strasbourg à 7 h 19. Il est ensuite sans arrêt jusqu'à Paris-Est. Le jour de l'accident, le service était assuré par une rame automotrice Euroduplex simple, de numéro de série 4707.

Les rames TGV Euroduplex appartiennent à la 3^e génération de TGV à deux niveaux construits par Alstom. Ces rames ont la caractéristique d'être « interopérables », c'est-à-dire d'être aptes à circuler dans plusieurs pays européens aux alimentations électriques et aux signalisations variées (notamment ERTMS). D'une longueur de 200 m et d'une masse totale de 399 tonnes, les rames comportent 509 places de voyageurs.

La rame Euroduplex 4707 a été mise en service commercial le 16 novembre 2011. Elle était entretenue au Technicentre Est Européen, centre de maintenance de SNCF Voyageurs situé à Pantin près de Paris. Au jour de l'accident, la rame avait parcouru un cumul de 2,92 millions de kilomètres.

La rame est constituée de deux motrices encadrantes, numérotées M1 et M2, et de huit remorques intermédiaires, numérotées de R1 à R8. Chaque motrice repose sur deux bogies moteurs à deux essieux. Les remorques s'appuient sur des bogies porteurs communs à deux caisses adjacentes. Les remorques sont ainsi solidaires entre elles et forment un tronçon articulé. Comme le montre le diagramme ci-dessous, la rame comporte au total 13 bogies de deux essieux, soit 26 essieux. Les cinq premiers bogies ont déraillé, c'est-à-dire dans l'ordre depuis l'avant du train, les bogies A, B, 1, 2 et 3.

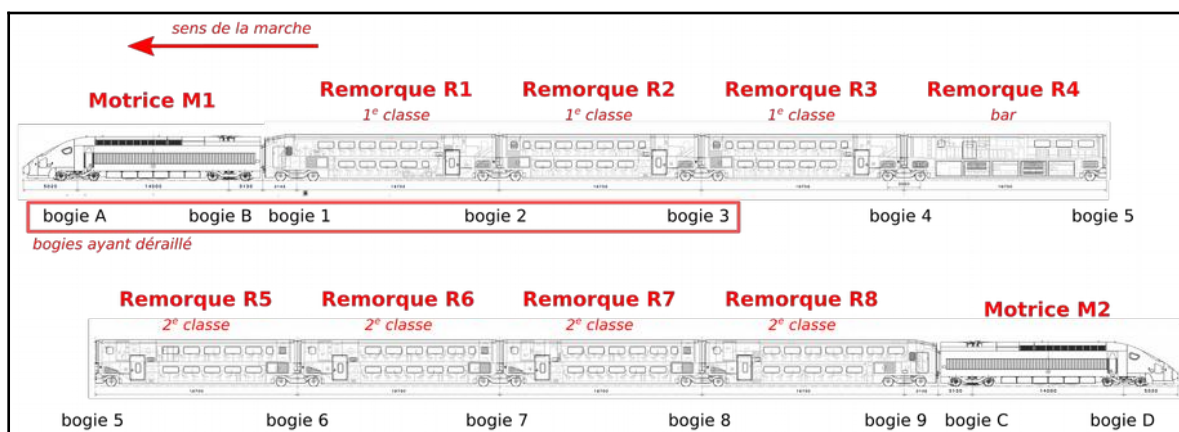


Figure 6 : diagramme du TGV Euroduplex

3 L'accident d'Eckwersheim a fait l'objet d'un rapport d'enquête technique du BEA-TT, consultable sur le site <http://www.bea-tt.developpement-durable.gouv.fr/>

Au moment de l'accident, le système de signalisation actif était la transmission voie-machine 430 habituellement utilisée sur la ligne. Le système interopérable ERTMS, plus exceptionnellement utilisé, n'était pas actif. Le captage du courant s'effectuait selon le mode nominal par le pantographe de la motrice de queue. La rame était à jour de son entretien et n'avait aucune restriction d'utilisation.

2.3 - Les caractéristiques de la ligne dans la zone de l'accident

La ligne, lors de sa construction, a été segmentée en huit tronçons opérationnels. La zone où a eu lieu l'accident fait partie du dernier tronçon, le **tronçon** numéroté **H**. Sur ce tronçon, le tracé de la ligne traverse une zone géologique appelée le « champ de fractures de Saverne ». Il s'agit d'une zone de transition entre, à l'est, le fossé Rhénan (plaine d'Alsace), et à l'ouest, le massif granitique Vosgien. Le paysage est constitué de collines.

Le tracé de la LGV entaille assez naturellement les collines en déblai et traverse les vallées intermédiaires en remblai. La vue ci-dessous schématise le profil en long de la ligne sur un secteur couvrant approximativement le département du Bas-Rhin. La vallée la plus importante est celle de la rivière Zorn franchie, à l'ouest de la commune d'Ingenheim, par un ouvrage d'art (à gauche sur la figure).

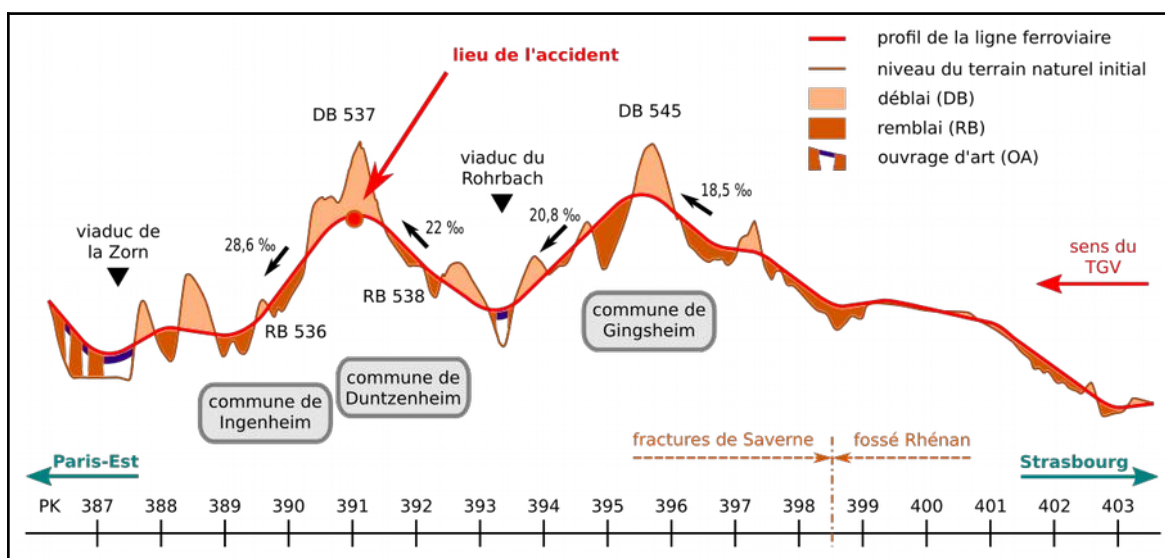


Figure 7 : profil en long sur le 16 derniers kilomètres de ligne (est du tronçon H)

Le tracé de la ligne en provenance de Strasbourg (à droite sur la figure) débute au PK 403. En allant vers Paris (PK décroissants), la ligne monte dans un premier temps vers une colline située sur la commune de Gingsheim. La rampe atteint un maximum de 18,5 ‰. Cette colline est franchie au PK 395,5 par un déblai portant la numérotation DB 545 dans la liste des ouvrages en terre de la ligne, d'un décaissé de 17 mètres. Puis la ligne redescend avec une pente de 20,8 ‰ dans le vallon du ruisseau Rohrbach qu'elle franchit par un viaduc. Elle remonte ensuite avec une rampe de 22 ‰ vers une autre colline située sur la commune de Duntzenheim. Cette colline est franchie au **PK 391** par le **déblai de Lupflenmatt**, numéroté **DB 537**, d'un décaissé de 25,5 mètres qui est le plus haut déblai de la section. Il s'agit du lieu du déraillement. La ligne poursuit vers l'ouest en redescendant dans la vallée de la Zorn avec une pente 28,6 ‰. Elle franchit plus loin le massif vosgien dans sa partie la plus étroite, par le tunnel de Saverne.

L'examen de la carte topographique rapprochée du lieu de l'accident (voir figure ci-après) montre que, dans la zone du déblai DB 537, la ligne s'inscrit dans une large courbe de rayon 6 000 mètres incurvée vers le nord. La ligne est traversée par la route départementale D 67 au PK 391,2 au moyen d'un pont-route franchissant les voies ainsi que le DB 537. Au PK 389,2, près du lieu où s'est immobilisé le TGV, la ligne franchit la route départementale D 667 par un pont-rail.

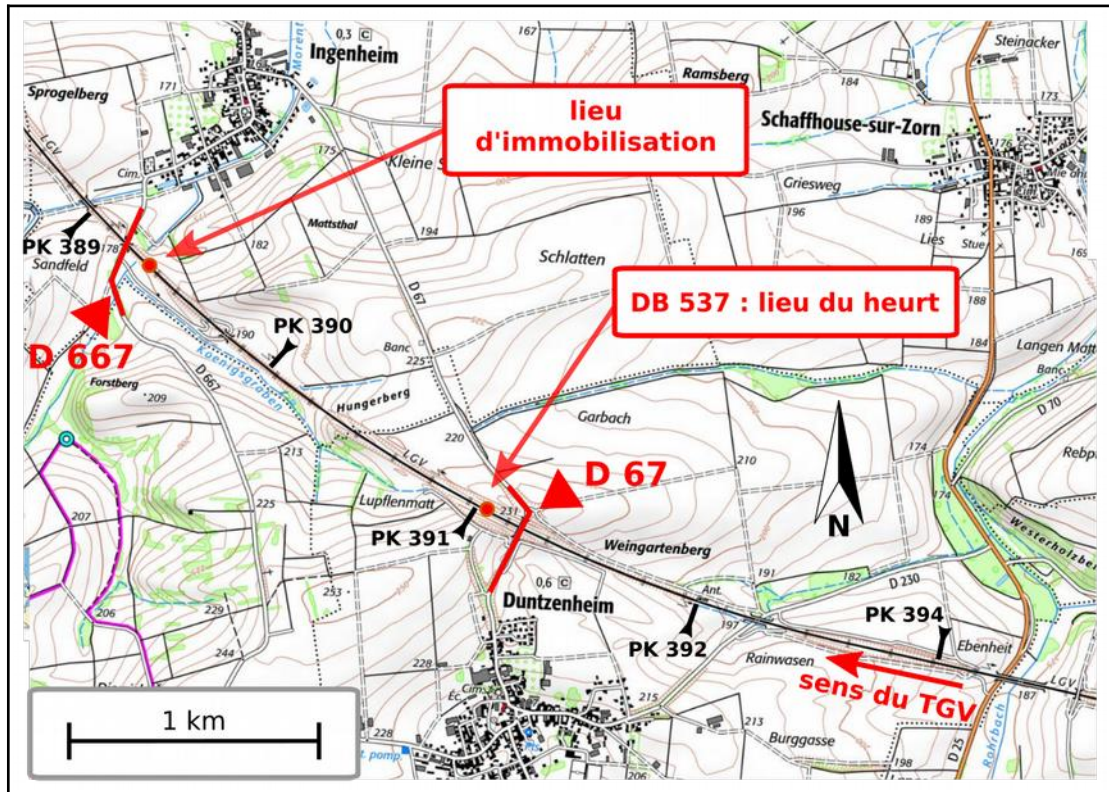


Figure 8 : carte topographique (source géoportail)

La vitesse limite de l'ensemble de la ligne est de 320 km/h. Le profil en travers, dans la zone de déblai, est représenté sur la figure ci-après. La largeur de la plate-forme des voies est de 13 m. L'entraxe des voies est de 4,50 m. La distance entre les files de poteaux caténaires est de 10,70 m. La ligne est à circulation à gauche.

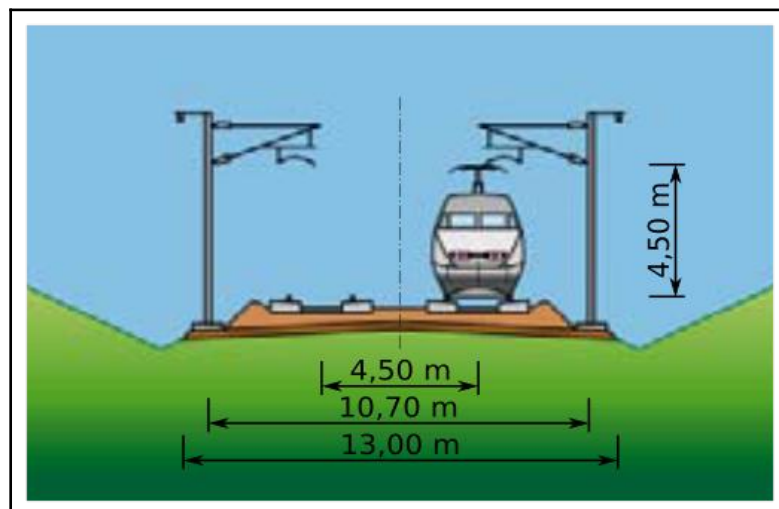


Figure 9 : profil en travers en zone de déblai

L'armement de chacune des voies est constitué de traverses béton monobloc au pas de 1666 unités au kilomètre. Sur ces traverses sont posés des longs rails soudés de profil UIC 60, d'un poids de 60,3 kg/m, fixés au moyen d'attaches élastiques de type « Fastclip ». L'écartement des rails est au standard européen de 1 435 mm.

La voie repose sur 35 centimètres de ballast surmontant une structure d'assise innovante comprenant une grave-bitume. Cette technique, issue de la construction routière, substitue une épaisseur de 12 cm de grave-bitume à 65 cm de grave non traitée présents dans une plate-forme ferroviaire classique. Selon les promoteurs de cette technique, elle permet une réduction des matériaux d'assise employés, mais aussi une réduction de la maintenance dans le temps en raison d'une moindre usure du ballast et de moindres déformations géométriques de la voie qui seraient obtenues avec cette technique.

Le schéma de signalisation dans la zone de l'accident est donné en annexe 2. Au PK 390,932, 50 m après le point de heurt du talus par le TGV, un **détecteur de boîte chaude** (DBC) est installé. Il s'agit d'un appareil disposé sur l'infrastructure pour détecter, sur un train, un éventuel échauffement des boîtes d'essieux contenant les roulements des essieux. En cas d'échauffement, une alerte est transmise aux agents en charge de la gestion des circulations et ceux-ci prennent les mesures pour ralentir, voire arrêter le train. Il existe 27 DBC répartis sur la LGV EE, sur chacune des voies de circulation. Celui du PK 390,932 est nommé « DBC 32 ».



Figure 10 : détecteurs de boîte chaude sur LGV

2.4 - Le déblai DB 537 de Lupflenmatt

Le déblai de Lupflenmatt, numéroté DB 537, s'étend sur une longueur de 1 230 mètres, du PK 390,266 au PK 391,496. La hauteur de ses talus atteint 24 mètres dans sa partie Est qui est aussi la zone où a eu lieu l'accident. Un pont-route portant la RD 67 franchit le déblai à cet endroit.

Le déblai de Lupflenmatt, de par son décaissement important, peut être considéré comme étant un ouvrage exceptionnel.

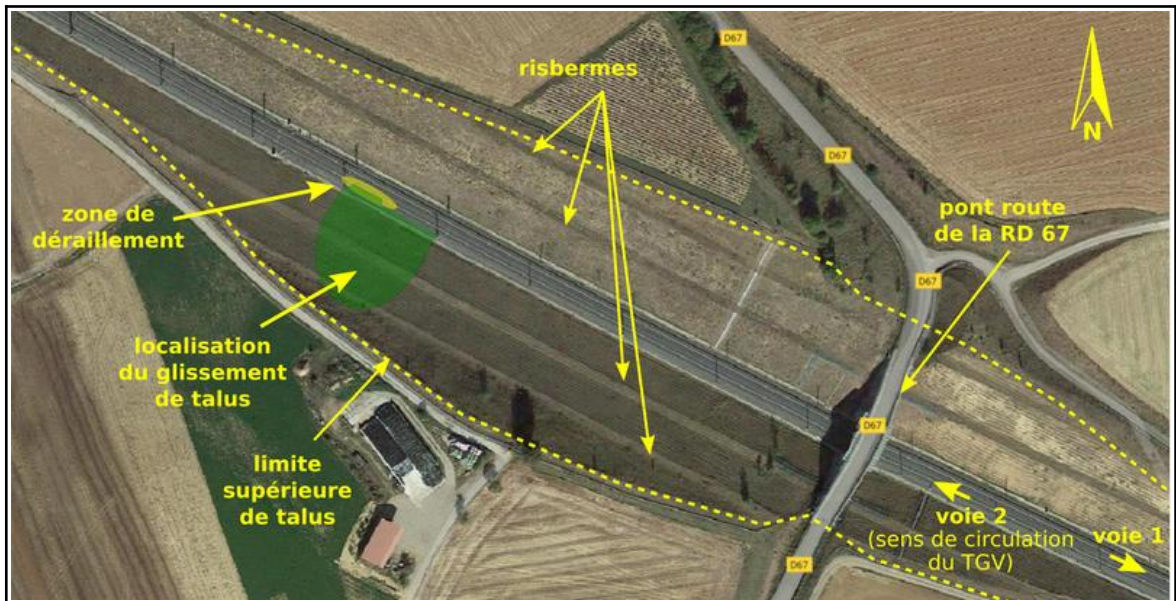


Figure 11 : vue aérienne de la partie Est du déblai DB 537 avant le glissement

Les talus latéraux ont une pente de 2 H / 1 V (deux distances horizontales pour une distance verticale). Dans chaque pente, deux risbermes (i.e. plateformes horizontales) de 4 m de largeur sont aménagées à 8 m et à 16 m de hauteur par rapport au fond de déblai. Le plan de génie civil du déblai, conforme à l'exécution, est donné en annexe 3.

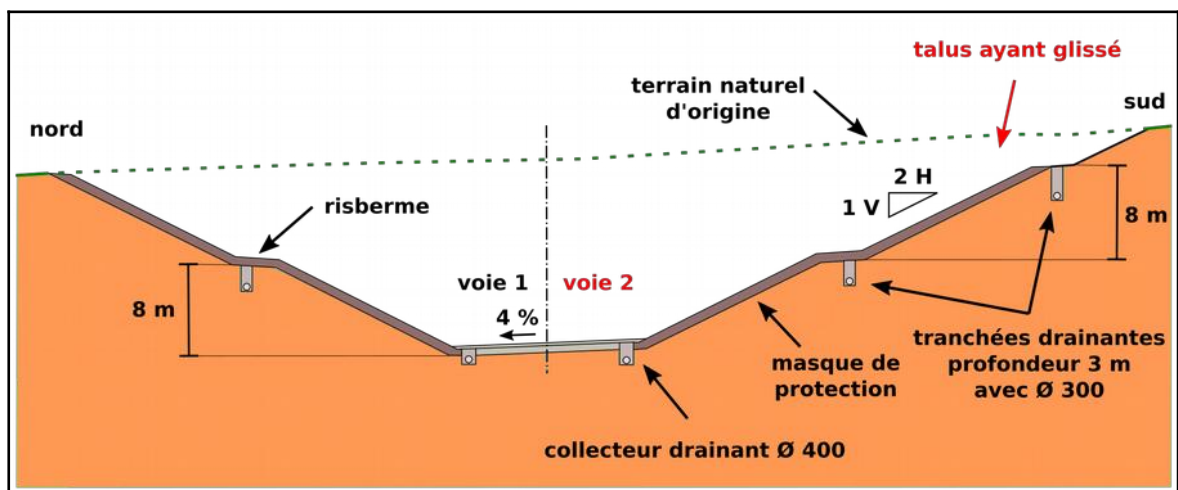


Figure 12 : profil en travers du déblai au droit du glissement

Un dispositif de drainage recueille les circulations d'eau. Il comporte pour chaque talus (voir le profil en travers sur la figure ci-dessus) :

- > des tranchées drainantes d'une profondeur de 3 m disposées sous chaque risberme intégrant des drains Ø 300 (300 mm de diamètre) ;
- > un collecteur drainant Ø 400 enfoui à chacun des pieds de talus ;
- > et, un masque général de protection en matériau graveleux recouvrant la surface de chacun des talus jusqu'au niveau de la risberme supérieure d'une épaisseur de 0,75 m.

Le déblai DB 537 est classé comme « ouvrage en terre sensible » au titre de la politique de maintenance du gestionnaire d'infrastructure, SNCF Réseau. La classification mise en œuvre par SNCF Réseau distingue trois catégories d'ouvrage selon le risque de

détérioration et les conséquences pour l'exploitation d'une défaillance de l'ouvrage. Les catégories sont celle des « ouvrages en terre courants », celle des « ouvrages en terre particuliers » et celle des « ouvrages en terre sensibles ». Ces catégories déterminent la nature des opérations de surveillance. Les ouvrages sensibles comportent un risque d'incident grave (heurt, déraillement).

Le classement du DB 537 comme ouvrage sensible résultait de l'identification de désordres localisés à la fois en cours de construction et postérieurement à celle-ci. Nous reviendrons plus en détail sur ces aspects.

2.5 - La construction du déblai

Le déblai DB 537 a été construit dans le cadre des travaux de génie civil de construction du tronçon **H**, huitième tronçon opérationnel de la ligne à grande vitesse et tronçon alsacien. Les travaux de génie civil comprenaient : les terrassements, la construction des ouvrages d'art et le rétablissement des communications. Le déblai DB 537 faisait partie d'un lot de travaux numéroté **43B** qui s'étendait de la localité de Steinbourg à 10 km à l'ouest d'Ingenheim, là où la LGV effectue un franchissement de la ligne ferroviaire classique, à Vendenheim à l'entrée de Strasbourg.

2.5.1 - Les intervenants ayant contribué à la construction du déblai

La réalisation des travaux a mis à contribution de nombreux intervenants aux missions différentes. Les quatre principaux intervenants étaient les suivants :

- **SNCF Réseau**, à l'époque **Réseau Ferré de France (RFF)**⁴, le **maître d'ouvrage (MOA)** : il est la personne morale pour le compte de laquelle l'ouvrage est réalisé. Il est le commanditaire des travaux et celui qui en a géré le financement. Il a conclu avec le maître d'œuvre et les entrepreneurs qu'il a choisis, les contrats qui avaient pour objet la réalisation de la construction.
- **SETEC**⁵, le **maître d'œuvre (MOE)** du génie civil : il a pour mission la conduite opérationnelle de la construction dans des conditions de délais, de qualité et de coût fixées par le maître d'ouvrage. La mission portait sur la conception générale, les études et le suivi des travaux.
- **RAZEL-BEC, COLAS EST et Roger Poncin et compagnie**⁶, les **entreprises de travaux** : elles exécutent le marché de travaux dans le cadre d'un groupement d'entreprise dont le mandataire est RAZEL-BEC.
- **Tractebel**⁷, l'**assistant technique à maîtrise d'ouvrage (AMO)** : sa mission est d'assurer la cohérence des études, de vérifier l'optimisation globale du projet et de contrôler le respect des référentiels techniques et réglementaires de conception.

4 SNCF réseau est le gestionnaire d'infrastructure ferroviaire. Sa dénomination à l'époque des travaux était Réseau Ferré de France (RFF)

5 Le groupe SETEC, acronyme de Société d'Études Techniques et Économiques, est un groupe d'ingénierie français créé en 1957 dont le siège social est à Paris. Les compétences du groupe s'étendent dans de nombreux domaines couvrant le bâtiment et les travaux publics et industriels.

6 Razel-Bec est une entreprise française fondée en 1880 dont le siège est à Saclay. Spécialisée dans les terrassements et le génie civil, elle est une filiale du groupe Fayat.

Colas Est est la succursale nancéienne de l'entreprise française de travaux publics Colas, filiale du groupe Bouygues.

Les ateliers Roger Poncin et c^{ie} sont une entreprise de construction métallique belge.

7 Tractebel est une société d'ingénierie d'origine belge, fondée en 1986 et appartenant au groupe Engie.

La mission de MOE a été dévolue à SETEC en trois contrats, le premier en date du 19 avril 1999 pour les études de conception, le deuxième en date du 1^{er} octobre 2008 pour le complément de ces études, et, le troisième en date du 25 juin 2010 pour la réalisation des travaux. La mission de l'AMO Tractebel a débuté en mai 2008. Le marché avec les entreprises de travaux a été signé par le maître d'ouvrage le 24 novembre 2010.

2.5.2 - Le calendrier

Plusieurs phases d'études ont permis de mettre au point la conception technique de la ligne à grande vitesse, en partant de la conception générale du tracé et en allant, au fur et à mesure de l'avancée des études, vers la conception plus détaillée des ouvrages dont le déblai DB 537.

Concernant le tronçon H terminal de la ligne, les différentes dates des phases d'étude et de construction ont été :

- > avant 1993, les études de l'Avant-Projet Sommaire (APS) : réalisées par la SNCF⁸, elles portaient sur l'ensemble du linéaire de la LGV EE et ont abouti à une déclaration d'utilité publique en date du 14 mai 1996 ;
- > de 1999 à 2003, les études d'Avant-Projet Préliminaire (APP), d'Avant-Projet Détaillé (APD) et de Projet (PRO) : réalisées par SETEC en ce qui concerne le tronçon H, elles ont conduit au dossier de Projet (PRO) validé par le Maître d'Ouvrage le 27 janvier 2004, ensuite mis en attente de la décision de construction du tronçon de la ligne ;
- > de 2009 à 2010 : suite à la prise de la décision de construction du tronçon H, le projet a été mis à jour par SETEC (nouveau dossier appelé PRO+). Ce dossier a été validé par le Maître d'Ouvrage le 11 janvier 2011 ;
- > de juillet 2011 à août 2012 : les travaux de construction sont réalisés. L'entreprise titulaire des travaux, RAZEL-BEC, effectue alors les études d'exécution permettant la définition précise et finale des ouvrages, qui sont soumises au visa du maître d'œuvre ;
- > 3 juillet 2016 : la ligne (deuxième phase) est mise en service commercial.

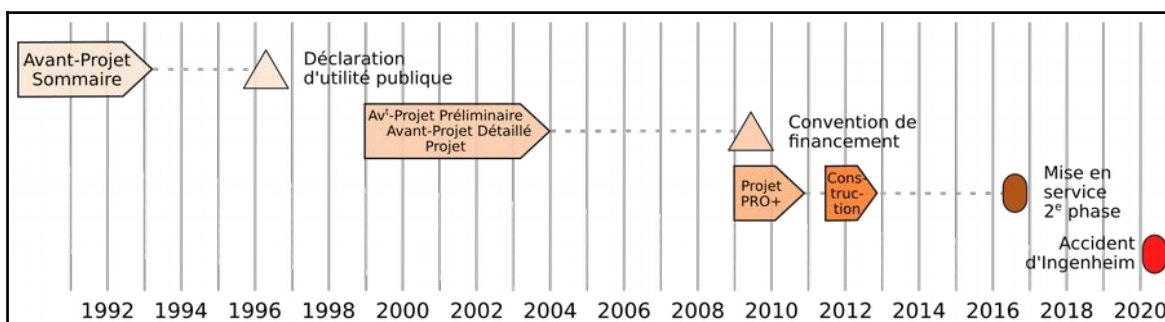


Figure 13 : le calendrier du projet

⁸ Réseau Ferré de France a été créé en 1997. Antérieurement à cette date, c'est la SNCF qui réalisait la maîtrise d'ouvrage des constructions de ligne nouvelles sur le réseau ferré national.

2.6 - La météorologie

Le jeudi 5 mars 2020, le soleil s'est levé à Ingenheim à 7 h 00 heure locale, soit 32 minutes avant l'accident. La température était alors de 5 °C. Le temps était couvert avec une pluie légère. Il soufflait un vent faible de moins de 10 km/h venant du sud.

Le climat du mois précédent l'accident avait été marqué par une exceptionnelle douceur et par le défilé de plusieurs perturbations accompagnées de vents violents dont la tempête Ciara, passée le 10 février. Selon Météo France, la pluviométrie a été, globalement sur la région Grand Est et pour le mois de février 2020, supérieure à deux fois la normale de saison. Météo France positionne ce mois de février 2020, au **3^e rang** des mois de février les plus arrosés pour la région depuis 1959. Des records mensuels de précipitations pour le mois de février ont été localement battus mais les cumuls de précipitations sont assez hétérogènes selon les emplacements.

À la station météorologique de Saverne située à 13 km d'Ingenheim qui n'est pas la plus proche mais qui a connu la plus forte pluviométrie parmi les stations environnantes, le cumul des précipitations mesurées au mois de février 2020 a été de 195 mm (source Météo France). La moyenne saisonnière régionale est de 69,8 mm. Le graphique ci-après donne la répartition des précipitations mesurées dans cette station, sur les six semaines précédant l'accident.

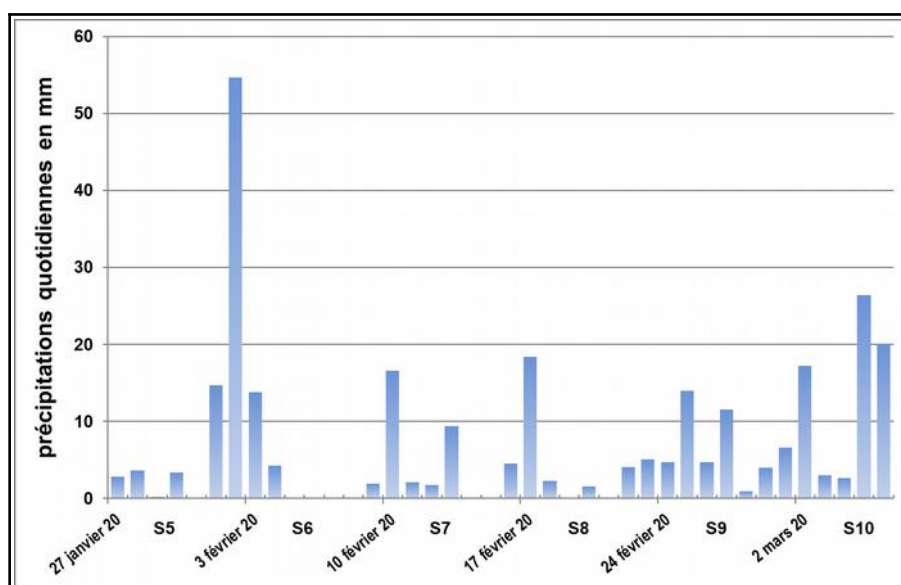


Figure 14 : relevé des précipitations à la station Météo France de Saverne

L'avant-dernier événement pluvieux donné sur le graphique correspond à la journée du jeudi 5 mars 2020, jour de l'accident, et cumule 26,4 mm de précipitations journalières. Ces fortes pluies se sont toutefois déroulées de 10 h 30 à 17 h, c'est-à-dire après l'accident, qui a eu lieu à 7 h 32, et donc pendant les opérations de secours.

Si l'on remonte sur une période plus longue que le seul mois de février, la pluviométrie du mois de janvier 2020 avait été faible. Un seul événement significatif modéré s'est produit sur ce mois, les 27 et 28 janvier. La pluviométrie du mois de décembre 2019 avait été proche de la normale de saison.

Le graphique ci-après récapitule les cumuls mensuels des précipitations mesurées à Strasbourg (à 25 km) depuis dix ans. Il apparaît que la section terminale de la ligne à grande vitesse a connu de nombreuses occurrences de précipitations mensuelles supérieures à celles de février 2020, précisément 12 fois depuis août 2012, date de la

construction du déblai DB 537, et 6 fois depuis la mise en service de la ligne en juillet 2016. Les mois de juillet 2014 et juillet 2016 auraient eu des précipitations deux fois plus importantes qu'en février 2020. Il n'est malgré tout pas exclu que des conditions locales modifient ces constatations générales.

Il est à noter toutefois que le mois de juillet correspond à la période d'étiage en Alsace, si bien que le niveau des nappes s'y trouve bien plus bas qu'au mois de février qui représente la période de hautes eaux. Les précipitations sont plus drues en juillet et ruissellent plutôt que de recharger les nappes. Les conséquences possibles de fortes précipitations vis-à-vis de la stabilité des pentes et des talus ne sont ainsi pas équivalentes selon la période de l'année où elles se produisent.

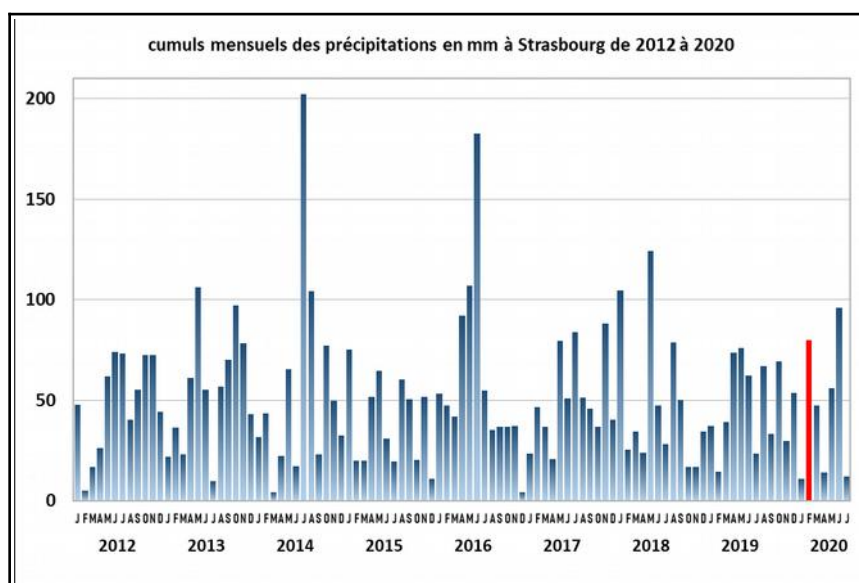


Figure 15 : précipitations à Strasbourg de 2011 à 2020 (source Infoclimat)

Du côté des températures, lors de la nuit du 4 au 5 mars, la température est descendue très légèrement en dessous de 0 °C (station météo de Strasbourg). Les nuits précédentes avaient été sans gel.

Nous retiendrons de ce bilan que la forte pluviométrie du mois précédent l'accident a pu impacter à la hausse la charge hydraulique des terrains avoisinant la LGV.

2.7 - La sismologie

Les séismes peuvent endommager ou détruire les constructions humaines, comme les bâtiments, les ouvrages d'art, et aussi les ouvrages en terre comme les déblais. L'annexe 4 fournit quelques informations de compréhension sur ce sujet.

Selon les données du Bureau Central Sismologique Français⁹, aucun séisme n'a affecté la région d'Alsace le 5 mars 2020, ni dans les trois mois précédant l'accident. Les derniers événements régionaux répertoriés sur l'année 2019 sont récapitulés dans le tableau ci-après.

⁹ Le Bureau Central Sismologique Français est un organisme public placé auprès de l'Université de Strasbourg ayant pour mission de collecter les observations sismologiques relatives à la France et de faciliter leur diffusion.

Épicentre du séisme	Date et heure	Magnitude	Distance d'Ingenheim
Strasbourg (Bas-Rhin)	13/11/19, 23 h 42	2,6	25 km
Schiltigheim (Bas-Rhin)	12/11/19, 14 h 38	3,1	25 km
Ban-de-Laveline (Vosges)	10/06/19, 11 h 54	3,3	70 km

Les experts missionnés par le maître d'œuvre ont souligné que des opérations de forage et de mise en activité de la centrale de géothermie profonde de Vendenheim se déroulaient depuis 2018 et se sont achevées fin 2020, couvrant la période de février 2020. Ils ont fait état que des chercheurs avaient supposé qu'il existait un lien entre la secousse du 12 novembre 2019 et ces opérations. Les chercheurs ont identifié des centaines de micro-séismes liés, de faibles magnitudes, créant un « essaim sismique ».

Tous ces évènements (séismes du tableau ci-dessus et micro-séismes) sont d'intensité très inférieure au séisme nominal pour lequel le talus a été conçu.

Les ouvrages ferroviaires sont par ailleurs conçus avec des coefficients de sécurité importants, les mettant à l'abri des faibles vibrations que ne manquent d'ailleurs pas d'apporter les trains à grande vitesse circulant à proximité. Il ne peut ainsi être établi de relation directe entre une quelconque activité micro-sismique et l'accident.

3 - Les investigations sur les circonstances de l'accident

3.1 - Les résumés des déclarations

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

3.1.1 - Le conducteur du TGV 2350

Le conducteur du TGV a accédé à la conduite de TGV fin 2016. Il conduisait des trains depuis 1998. Il a acquis, avec la conduite TGV, la connaissance de la LGV Est européenne ainsi que celle du matériel Euroduplex. Il réside à Strasbourg.

Jeudi 5 mars 2020, il a pris son service à 4 h 45 à Strasbourg pour assurer la conduite du TGV 703101 sans voyageur entre Strasbourg et Colmar. Puis, il a enchaîné avec la conduite du TGV 2350 de Colmar à Paris-Est. La fin de son service était prévue à 13 h 12. Il s'agissait de sa 5^e journée de service consécutive après un repos hebdomadaire.

Le train est parti à l'heure de Colmar à 6 h 38. La circulation était assurée en unité simple par la rame numérotée 4707. De Colmar à Strasbourg, le trajet a été normal, avec cependant plusieurs limitations de vitesse à 160 km/h pour travaux et la rencontre d'un signal d'avertissement (feu orange) aux abords de Matzenheim qui a retardé l'arrivée à Strasbourg. Le TGV est parti avec une minute de retard de Strasbourg.

À l'entrée sur la LGV, la vitesse limite passe à 320 km/h. Le conducteur n'étant pas habilité à la conduite sous ERTMS, il circule avec la signalisation TVM.

Peu avant la localité de Steinbourg, là où la LGV croise la ligne classique, le conducteur aperçoit de la terre sur la voie. Elle recouvre les deux files de rails. Il estime avoir constaté la présence de cette terre environ 200 mètres en amont, car la visibilité est réduite par une courbe à droite. Il estime être à environ 280 km/h.

Apercevant l'obstacle, il commande alors un freinage d'urgence. Avec le choc, il est projeté dans tous les sens dans la cabine. À l'arrêt, il se retrouve au sol. Il a des douleurs à l'épaule, au dos et à la poitrine l'empêchant de se mouvoir. Il saigne. Il parvient à se relever et à appuyer sur le bouton du signal d'alerte radio (SAR).

Se sentant très mal, il tente d'appeler le 112 sans résultat. Des collègues conducteurs arrivent ensuite en cabine. Un médecin présent dans le train les rejoint. Les pompiers arrivent alors et l'évacuent en hélicoptère vers le centre hospitalier où il sera opéré.

3.1.2 - Le contrôleur présent dans la rame

À Colmar, la rame est arrivée vide de Strasbourg et ne présentait aucun défaut. Le contrôleur était seul en service commercial à bord. Le départ s'est effectué à l'heure prévue de 6 h 38.

À l'arrêt de Strasbourg, trois agents se sont présentés à lui pour l'accompagner jusqu'à Paris pour le service commercial. L'un est dit « agent B » et les autres « EA » (pour

équipe d'assistance). Le départ s'est effectué presque à l'heure prévue de 7 h 19, sans rien d'anormal.

Le contrôleur a effectué l'annonce de bienvenue depuis la sono de la remorque 3, à l'étage bas. Il a rejoint ses collègues en haut de la remorque 4 pour organiser le travail. L'« EA » commençait la ronde par la 2^{de} classe et la remorque 8 vers l'arrière, l'« agent B » et lui-même s'occupait des 1^{re} classe en commençant par la remorque 3 et en allant vers l'avant.

Au moment de l'accident, il se trouvait au niveau de la porte d'entrée de la première remorque à l'étage haut et contrôlait les titres de transports des personnes se trouvant dans le carré adjacent. Une voyageuse présente s'est levée et il y a eu un violent choc. Lui et la voyageuse se sont retrouvés au sol. Le TGV sautait dans un bruit assourdissant. En levant la tête, il a constaté que les vitres se fendaient et qu'il y avait un brouillard de poussière dehors. La voyageuse était blessée au nez, et lui-même après l'arrêt du train n'a pu se relever du fait d'une douleur au dos. Un médecin présent à bord l'a aidé à se rasseoir.

À 7 h 34, il a appelé le conducteur avec son téléphone portable, en vain. Il a alors appelé le centre opérationnel des services aux clients (COS) du secteur Est pour signaler qu'il s'était produit un accident. Celui-ci l'a assuré que les circulations étaient arrêtées.

Il a essayé de rappeler le conducteur, toujours en vain. Deux conducteurs de train, qui étaient présents dans la rame, sont venus dans la remorque 1. Ils se sont ensuite rendus auprès du conducteur et le médecin les a rejoints.

À 7 h 40, il a été informé par le COS Est que les secours étaient en route. Immobilisé, il a demandé aux agents l'accompagnant, avec l'aide de quelques cheminots présents dans le train comme voyageurs, de gérer les voyageurs et l'évacuation. Il a lui-même été évacué vers 11 h 30 et a été hospitalisé.

3.1.3 - L'un des conducteurs de train voyageant dans la rame

Ce conducteur se rendait à Paris pour raison professionnelle. Il est monté en voyageur dans le TGV 2350 à Strasbourg. Sur le quai, il a rencontré un autre collègue conducteur. Ils se sont installés à l'étage de la voiture 3.

À 7 h 31, il a ressenti un choc violent, comme si le train avait heurté un bloc de béton, suivi d'un freinage fort et de grandes vibrations. Des projections de ballast fissuraient les vitres une par une. Il a immédiatement compris que le train avait déraillé. Jusqu'à l'arrêt qui a duré environ une minute (ndr : 40 s), il s'est retenu aux accoudoirs. Dès l'arrêt, il s'est levé avec son collègue et ils ont mis leurs gilets orange. Il a dit aux voyageurs de rester calmes et assis, la rame étant restée droite, il n'y avait pas lieu de paniquer.

En regardant par la fenêtre, il a vu que la rame engageait la voie voisine. Un risque de heurt était possible. Il a pris son téléphone pour alerter le poste d'aiguillage de la gare de Strasbourg et son collègue a fait de même avec le centre opérationnel des services aux clients. Il était 7 h 35. L'agent du poste d'aiguillage appelé lui a dit faire le nécessaire pour arrêter toutes les circulations.

Il est alors allé vers la cabine de conduite voir si le conducteur allait bien car il ne répondait pas à l'interphonie. Arrivé à l'extrémité de la première voiture, il a ouvert la porte donnant accès à la motrice, et là, il a compris que la motrice était complètement décalée sur la droite et qu'il ne pouvait pas y accéder.

Son collègue l'a rejoint en ayant eu l'assurance que toutes les circulations étaient arrêtées. Ils ont débloqué la porte latérale de sortie de la voiture à coups de pieds, puis

une fois à l'extérieur, ils ont accédé à la cabine de conduite par la porte latérale de la motrice. Le conducteur était à terre, sévèrement touché. Il y avait du sang sur son épaule et sa poitrine et il se plaignait d'avoir extrêmement mal au dos. Un autre cheminot présent à bord, encadrant de conducteurs, est venu les assister. Un médecin les a rejoints dans la cabine.

Le conducteur a alors appelé les secours, d'abord le 112 qui ne répondait pas, puis le 15. Il était 7 h 49. Le SAMU lui a dit envoyer un hélicoptère de sauvetage et il a ensuite passé la ligne au médecin qui était en train de s'occuper du conducteur blessé. Puis, il a attendu les pompiers avec son autre collègue conducteur. À leur arrivée, il les a aidés à atteindre le train et à porter leur matériel.

3.1.4 - L'autre conducteur de train présent dans la rame

Ce conducteur, monté en voyageur à Strasbourg pour rejoindre Paris où il devait conduire un autre train, était assis en face du collègue dont le témoignage est donné ci-dessus.

Alors que le train roulait, vers 7 h 30, il a ressenti un très gros choc puis constaté que le train avait déraillé. Il a contacté, à 7 h 33, le COS Est. Il a avisé son correspondant que le TGV 2350 avait déraillé, qu'il engageait le gabarit de la voie voisine et il a demandé si les trains du secteur étaient arrêtés, n'en ayant pas encore l'assurance à ce moment-là.

Il s'est ensuite rendu vers la tête du train. Le centre opérationnel l'a rappelé pour lui dire qu'il n'y avait pas de nouvelle du conducteur du TGV. Il a donc décidé d'aller en cabine de conduite avec son autre collègue conducteur. Le passage par l'intérieur de la rame n'étant pas possible, il devait s'y rendre par l'extérieur en descendant côté piste.

Un nouveau contact avec le centre opérationnel l'informe que l'arrêt des trains a été effectué par le poste. Il accède alors à la cabine de conduite avec son collègue. Le conducteur, blessé mais conscient, lui dit qu'il a rencontré de la terre sur la voie. Il est alors retourné dans la rame solliciter l'aide d'un médecin qu'il a accompagné en cabine.

3.1.5 - Le coordonnateur régional des circulations pour l'Alsace

Le coordonnateur régional des circulations pour l'Alsace est le responsable de la gestion opérationnelle des circulations sur cette région pour le compte du gestionnaire d'infrastructure. Situé à Strasbourg, il encadre des régulateurs de secteurs géographiques et travaille en lien avec les représentants des entreprises ferroviaires. Sa mission consiste à réduire au minimum les conséquences des aléas d'exploitation sur la circulation des trains.

À 7 h 38, un représentant de SNCF Voyageurs se présente à lui pour lui demander la position géographique du TGV 2350, suite à un avis téléphonique reçu d'un agent du COS Est. Ce TGV s'étant engagé sur la LGV à 7 h 28, il aurait dû se situer théoriquement à proximité du raccordement de Réding, après le tunnel de Saverne.

Il effectue alors un contrôle du graphique de circulation de la LGV sans constater d'anomalie particulière concernant le TGV 2350¹⁰, puis il demande immédiatement au régulateur du secteur nord d'appeler, par radio, le conducteur. Les tentatives d'appel sont restées sans réponse.

Le coordonnateur régional des circulations est alors informé par les représentants de SNCF Voyageurs que le TGV 2350 aurait déraillé. Il leur demande le numéro de téléphone d'un contrôleur du train.

¹⁰ Le graphique de circulation affiché aux régulateurs est rafraîchi régulièrement avec la position réelle des trains alimentée cependant par des balises qui sont relativement très espacées sur le trajet du train.

À 7 h 39, il entre en contact avec le chef circulation de Pagny-sur-Moselle qui commande les installations de signalisation de la LGV EE. Il lui donne l'information du possible déraillement, lui demande la position géographique précise du TGV et l'interroge s'il a une information concernant un éventuel incident. Le chef circulation lui dit constater que l'intervalle voie 2 entre Vendeheim et Steinbourg est occupé et que l'intervalle voie 1 l'est aussi, bien que celui-ci aurait dû être libre. Le chef circulation lui confirme alors prendre les mesures de protection d'obstacle pour suspicion de déraillement.

Le coordonnateur régional des circulations fait ensuite arrêter par appel radio le TGV 5470 qui suit le TGV 2350.

À 7 h 42, ayant récupéré son numéro, il appelle le contrôleur du TGV 2350. Celui-ci lui confirme le déraillement de la rame avec engagement de la voie 1. Le contrôleur lui donne la position de la rame au PK 389,442 et il lui indique un bilan provisoire d'un blessé grave, le conducteur, et d'une évaluation de cinq blessés légers.

Le coordonnateur régional des circulations transmet alors ces informations au chef circulation et il contacte les services de secours (CODIS 67) et les forces de l'ordre. Les premiers secours seront présents sur les lieux vers 8 h 05 et la Gendarmerie vers 8 h 15.

3.1.6 - Le chef circulation du poste de commande à distance

Le chef circulation gère la circulation des trains sur la LGV EE depuis le poste de commande à distance situé à Pagny-sur-Moselle. Il est le garant de la fluidité et de la sécurité du trafic. Il encadre deux agents circulation LGV qui commandent chacun les installations sur un secteur défini de la ligne, l'ouest pour l'agent circulation n° 1, et l'est pour l'agent circulation n° 2.

Ce matin du 5 mars 2020, le chef circulation est en fonction depuis 4 h 45.

À 7 h 32, l'écran du système affiche une alerte « demande de mise hors service du DBC 32 » (détecteur de boîtes chaudes). L'agent circulation n° 2 sort alors la consigne pour mise en application des mesures correspondantes. L'une des mesures est de limiter la vitesse de circulation des trains à 230 km/h, ces trains ne pouvant plus être surveillés par le détecteur de boîte chaude.

Le chef circulation tente par deux fois de joindre le conducteur du TGV 2350 par la radio sol-train pour lui passer la consigne, sans résultat. Il reçoit à cet instant un appel du coordonnateur régional des circulations pour l'Alsace, situé à Strasbourg, lui annonçant une suspicion de déraillement du TGV. Il est 7 h 39. Il ordonne immédiatement à l'agent circulation n° 2 la mise en protection de la voie 1 et de la voie 2 par fermeture des signaux, ainsi que l'arrêt d'urgence du TGV 5470 qui suivait le TGV 2350. Il demande à l'agent circulation n° 1 de faire procéder à une coupure d'urgence de l'alimentation électrique des deux voies sur le secteur de l'accident.

À 7 h 45, il reçoit du coordonnateur régional circulation pour l'Alsace la confirmation du déraillement du TGV 2350. Il se consacre alors à l'alerte des astreintes de crise SNCF et à la réorganisation des circulations déjà en cours sur la LGV sur l'itinéraire de substitution par la ligne classique, en lien avec les différents centres de gestion opérationnels concernés.

3.2 - L'examen de l'enregistrement des paramètres de conduite

L'enregistreur ATESS¹¹ sauvegarde les paramètres de conduite du train. L'extraction des enregistrements des deux cabines a été analysée.

Précisons préalablement que, à l'examen visuel de la cabine de conduite immédiatement après l'accident, il a été constaté par les enquêteurs que :

- > le bouton-poussoir de freinage d'urgence n'était pas enfoncé mais le manipulateur de traction/freinage était sur la position extrême de freinage d'urgence ;
- > le bouton-poussoir d'abaissement du pantographe était enfoncé ;
- > l'opercule du bouton d'alerte radio était enfoncé et le signal d'alerte lumineux n'était pas enclenché ;
- > le régulateur de vitesse était réglé sur 294 Km/h.

L'exploitation de l'enregistrement ATESS du TGV conduit au graphique et au tableau de reconstitution des événements donnés ci-dessous.

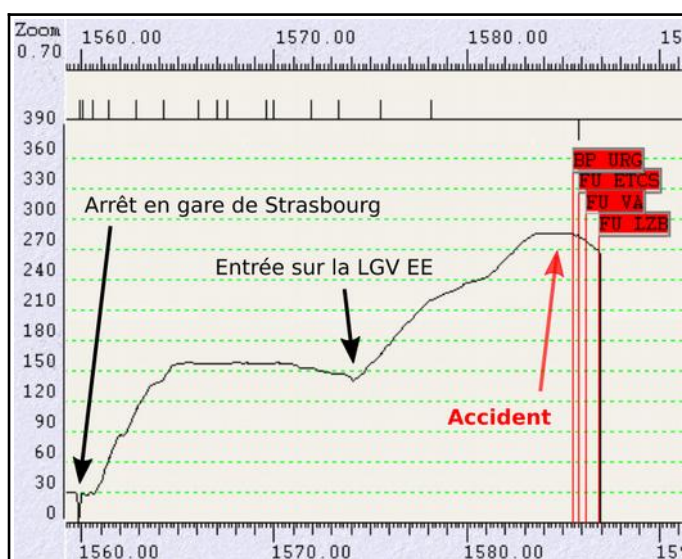


Figure 16 : visualisation des données de vitesse ATESS

Datation et vitesse	Événement et interprétation
7h32min04s 285 km/h	Commande d'un arrêt d'urgence. <i>Selon les constats faits en cabine, l'arrêt a été commandé par action du conducteur sur le manipulateur de traction en position de freinage d'urgence.</i>
7h32min06s 284 km/h	Commande de l'abaissement du pantographe. <i>Cette action a été commandée par action du conducteur sur le bouton poussoir d'urgence. Elle a pour résultat la coupure de l'alimentation haute tension.</i>
<i>L'impact sur le monticule de terre peut être présumé juste après cet instant.</i>	
7h32min08s Impact + ~2 s	Anomalie de l'European Vital Computer. Avarie de la tripode. Défaut de réception continue de la TVM (L'« European Vital Computer » (EVC) est le calculateur de sécurité central de la motrice. La tripode est, sur les bogies moteurs, un arbre d'entraînement propre à chaque essieu). Ces défauts sont des conséquences immédiates d'un choc violent de la motrice sur la voie faisant suite à l'impact sur le monticule de terre. Les défauts commandent un freinage d'urgence qui double celui du conducteur.

11 ATESS : Acquisition et Traitement des Évènements de Sécurité en Statique.

Datation et vitesse	Événement et interprétation
<i>7h32min10s Impact + ~4 s</i>	Détection de boîte chaude. Ce défaut résulte de l'endommagement du circuit de détection sur un bogie.
<i>7h32min12s Impact + ~6 s</i>	Déclenchement de la veille automatique à contrôle de maintien d'appui (VACMA - La VACMA, appelé aussi « homme mort », se déclenche 5 secondes après une sonnerie d'alerte lorsque le conducteur ne manifeste pas d'activité.) Ce défaut délivre à nouveau une commande de freinage d'urgence.
<i>7h32min22s Impact + ~16 s</i>	Anomalie de contrôle de vitesse LZB. Ce défaut délivre à nouveau une commande de freinage d'urgence.
<i>7h32min28s Impact + ~22 s</i>	Signalisation de la cabine désarmée. Ce défaut s'analyse comme la conséquence d'une coupure de la basse tension dans la motrice avant, alors qu'elle est normalement alimentée par batterie.
<i>7h32min46s Impact + ~40 s</i>	Arrêt. L'arrêt est donné par l'indication de vitesse nulle sur l'enregistrement de la cabine arrière. Le train a parcouru 1 580 mètres depuis l'abaissement du pantographe (commande de l'abaissement à 7h32min06s).
<i>7h33min02s Impact + ~56 s</i>	Ré-apparition de la basse tension en cabine avant. Détection d'un signal d'alarme.
<i>7h37min04s Impact + ~5 min</i>	Acquittement d'une alarme Voyageurs.

Les données ATESS de la motrice de tête concernant la vitesse et les distances sont incohérentes immédiatement après l'accident en raison du déraillement de la motrice et de la perte d'adhérence des roues. Elles ne sont pas reprises dans le tableau ci-dessus.

L'analyse des données permet de conclure que :

- le TGV avait atteint 285 km/h avant la rencontre avec le monticule de terre. Sa vitesse était de 284 km/h au moment du choc ;
- le conducteur a accompli deux actions avant le choc : l'arrêt d'urgence et l'abaissement du pantographe ;
- trois autres ordres d'arrêt d'urgence ont été successivement délivrés automatiquement par le bord par suite de défauts survenus après le choc et entraînant une mise en sécurité ;
- l'arrêt s'est produit en 40 secondes. La décélération de la rame sur le linéaire a été d'environ 2 m/s² ;
- un défaut d'alimentation en basse tension a affecté la motrice de tête peu avant l'immobilisation et a duré 34 s ;
- l'acquittement d'une alarme voyageur dans la cabine, 5 min après l'accident, atteste de l'arrivée en cabine dans ce délai des conducteurs passagers venus porter assistance au conducteur blessé grièvement.

3.3 - L'analyse des enregistrements au sol

3.3.1 - Le graphique de circulation des trains

La position des trains circulant sur le réseau est enregistrée en temps réel au moyen de balises disposées en ligne. La figure ci-après donne le graphique espace-temps des trains de la LGV EE entre Vaires-sur-Marne et Vendenheim, tel qu'enregistré le 5 mars 2020 sur la période entre 6 h et 9 h.

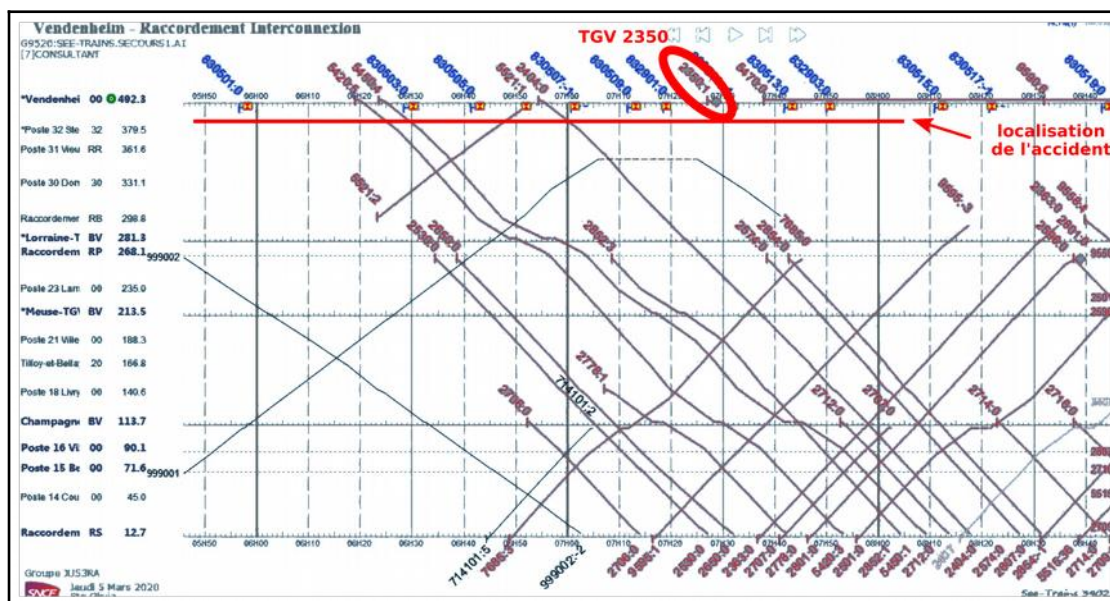


Figure 17 : graphique espace-temps réel des trains sur la LGV le 5 mars 2020

L'annexe 5 récapitule la liste des trains ayant circulé sur le tronçon terminal entre Baudrecourt (PK 298,8) et Vendenheim (PK 492,3), c'est-à-dire ceux tracés dans la partie haute du graphique. Sur la voie 2 en direction de Paris, quatre TGV ont circulé avant le TGV 2350. Le premier est le TGV 999002 de reconnaissance, qui ouvre la ligne chaque matin à une vitesse réduite de 220 km/h après l'interruption nocturne de circulation (le début du trajet avant 6 h n'est pas apparent sur le graphique de la figure 18). Ce TGV a été suivi des TGV 5420 et 5450. Le quatrième TGV, le TGV 2404, est passé 32 minutes avant le TGV 2350 accidenté. Ces TGV n'ont fait aucun signalement de problème sur la ligne.

Sur la voie 1, en sens inverse de circulation, un TGV est passé sans encombre 49 minutes avant le TGV 2350. Il s'agissait du TGV 5521 de reconnaissance pour cette voie. Le TGV 2363, qui circulait après, était prévu 1 h 20 min après le passage du TGV 2350.

Au total, cinq TGV sont donc passés dans des conditions normales le matin, avant le TGV 2350, le dernier 32 min avant l'accident.

3.3.2 - Le désarchivage du poste de signalisation

Le poste de signalisation de la LGV EE bénéficie d'une technologie informatique qui assure un archivage complet de tous les changements d'état en cours d'utilisation.

La figure ci-après donne une représentation graphique de l'état d'occupation des zones de circuit de voie lors du passage du TGV 2350 sur le site du déraillement. Le temps est en abscisse, avec en correspondance les instants d'activation des circuits de voie. Les distances sont en ordonnée, la partie gauche correspondant aux zones d'action des circuits de la voie 2 (celle de circulation du TGV), et la partie droite à celles de la voie 1 (pour rappel, la numérotation et le repérage des zones figurent sur le plan de signalisation donné en annexe 2). Les zones, sur la voie 2 comme sur la voie 1, ont été occupées au fur et à mesure de l'avancement du train. La décélération du train calculée graphiquement est de 2,2 m/s².

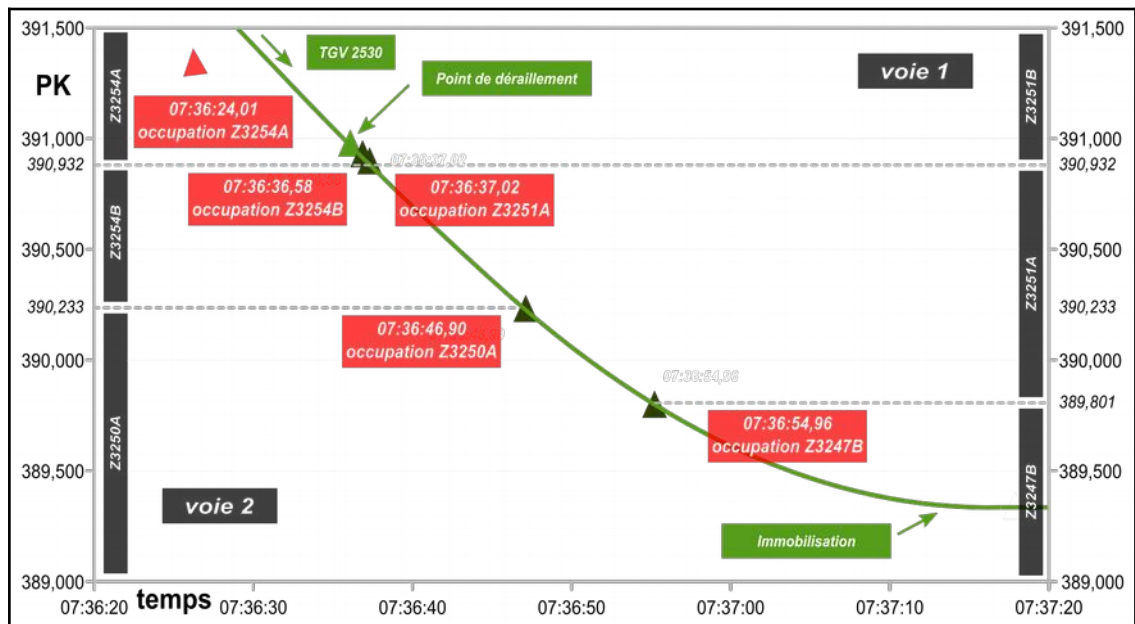


Figure 18 : graphique espace-temps des zones occupées au passage du TGV 2350

En définitive, les divers enregistrements au sol confirment que le glissement de terrain a eu lieu entre 7 h et 7 h 32 le matin du 5 mars 2020. Le déraillement du TGV à l'endroit du glissement a aussi immédiatement conduit à la chute des zones des circuits de la voie 1 adjacente. La signalisation de cette voie s'est donc instantanément, mise au rouge, assurant, sans qu'il n'y ait d'intervention humaine, une protection immédiate de la zone d'accident.

3.4 - Les premiers constats sur le talus effondré

L'origine du déraillement est un bourrelet de terre situé au PK 390,980, constituant le pied de l'effondrement du talus latéral à la voie. Le monticule de terre recouvrant la voie n'est qu'une fraction de l'effondrement général du talus. Sa longueur est de 15 mètres, localisée à l'extrémité ouest de l'effondrement (vers Paris), précisément du **PK 390,986** au **PK 390,971**. Le volume de matériau ayant encombré la voie avant le passage du TGV 2350 peut être estimé à 15 m³, soit une masse d'environ 25 tonnes.

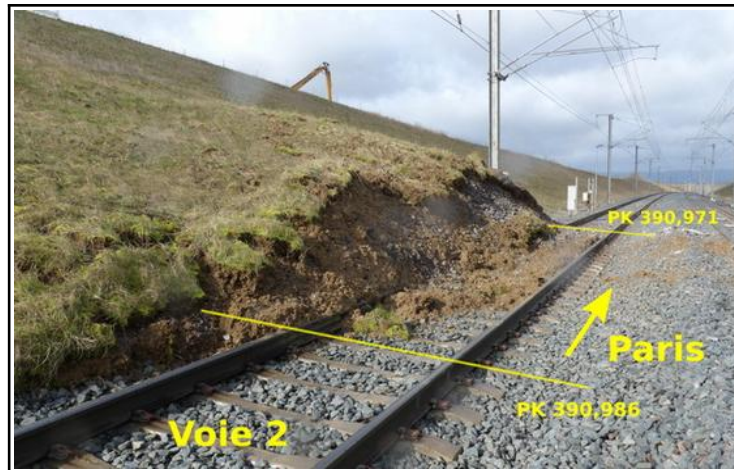


Figure 19 : vue rapprochée du dépôt encombrant la voie

L'effondrement du talus de déblai a une longueur de 60 mètres et s'étend en bordure de la voie 2 du **PK 390,965** au **PK 391,025**. La physionomie générale de l'effondrement est celle d'un glissement de terrain. Ce type de mouvement affecte des pentes en apparence stables, constituées de matériaux meubles plus ou moins argileux, sensibles à l'eau. Le glissement englobe les deux risbermes du talus, la risberme inférieure à 8 m de hauteur et la risberme supérieure à 16 m. Le volume glissé peut être estimé à 11 000 m³, soit 22 000 tonnes.



Figure 20 : vue aérienne du glissement du talus

Le décrochement en tête de glissement mesure environ 7 m de hauteur. Il s'est produit à l'aplomb de la risberme supérieure. Le drain enterré de la tranchée drainante qui est sous la risberme supérieure a été emporté. Le géotextile qui enveloppait le matériau drainant de la tranchée est apparent. Un regard de visite disposé à cet endroit a été mis à nu et a basculé dans le glissement.

Lors des premières constatations, le lendemain du glissement, aucune arrivée d'eau significative n'est apparente à la surface du décrochement qui a mis à nu le sol en place. Aucun écoulement n'est observé dans le drain à cet endroit. Lorsque l'on se déporte aux débouchés des drains de part et d'autre du déblai, aucune arrivée d'eau n'est visible pour les deux risbermes (inférieure et supérieure) du côté de Strasbourg. Des circulations d'eau sont observables pour les débouchés du côté de Paris.



Figure 21 : vue du sommet du glissement

Nous reviendrons ultérieurement en partie 4 de façon très approfondie sur les constats détaillés effectués sur le talus et les analyses entreprises afin de déterminer les raisons du glissement.

Dans les heures qui ont suivi l'accident, le glissement a continué une lente progression vers les voies, observée par les enquêteurs. Mi-avril, cette progression atteignait la voie 1 (voir figure ci-dessous). Toutefois à cette date, les travaux de terrassement du talus étaient en cours et ont pu contribuer à des mouvements de terre conduisant à cette situation.



Figure 22 : progression du glissement mi-avril

3.5 - Les dommages sur la rame accidentée

Le présent paragraphe fait l'état des lieux synthétique des dommages à la rame de TGV. L'ensemble des cinq premiers bogies, à savoir les deux bogies A et B de la motrice et les trois bogies 1 à 3 des remorques, ont déraillé. Les dommages à la rame ont été constatés dans un premier temps sur le lieu d'immobilisation. Ils ont ensuite été relevés de manière complète en atelier par les experts de SNCF Voyageurs. Les dommages lourds concernent la motrice de tête et la liaison avec la première remorque. La liste des dommages et l'interprétation que l'on peut en faire sont récapitulées ci-après.

3.5.1 - Les dommages à la motrice avant

Les dommages principaux sont les suivants :

- > déchirement du carénage de nez et de trappes escamotables à l'avant gauche ;
- > arrachement des câblages présents sur l'avant ;
- > chasse-obstacle disloqué et reculé vers l'arrière ; le caisson déformable et les éléments fusibles sur la traverse en tête de motrice, pour la protection aux grands chocs frontaux, sont en revanche non touchés ;
- > importantes traces de chocs et de frottements sur les deux bogies ;
- > recul des deux bogies par rapport à la caisse avec arrachement de la rotule centrale d'entraînement reliant bogie et caisse (sur la traverse centrale des bogies) ; conjointement, rupture ou plastification des pièces de fixation des moteurs sur la caisse (rotules, oreilles de fixation) ;
- > déformation générale de la structure de caisse (châssis inférieur et poutres supérieures appelées battants de pavillon) et de l'ossature métallique secondaire (bas de caisse, plusieurs couples de fosse) ;
- > arrachement des trois premières trappes de coffre des deux côtés.

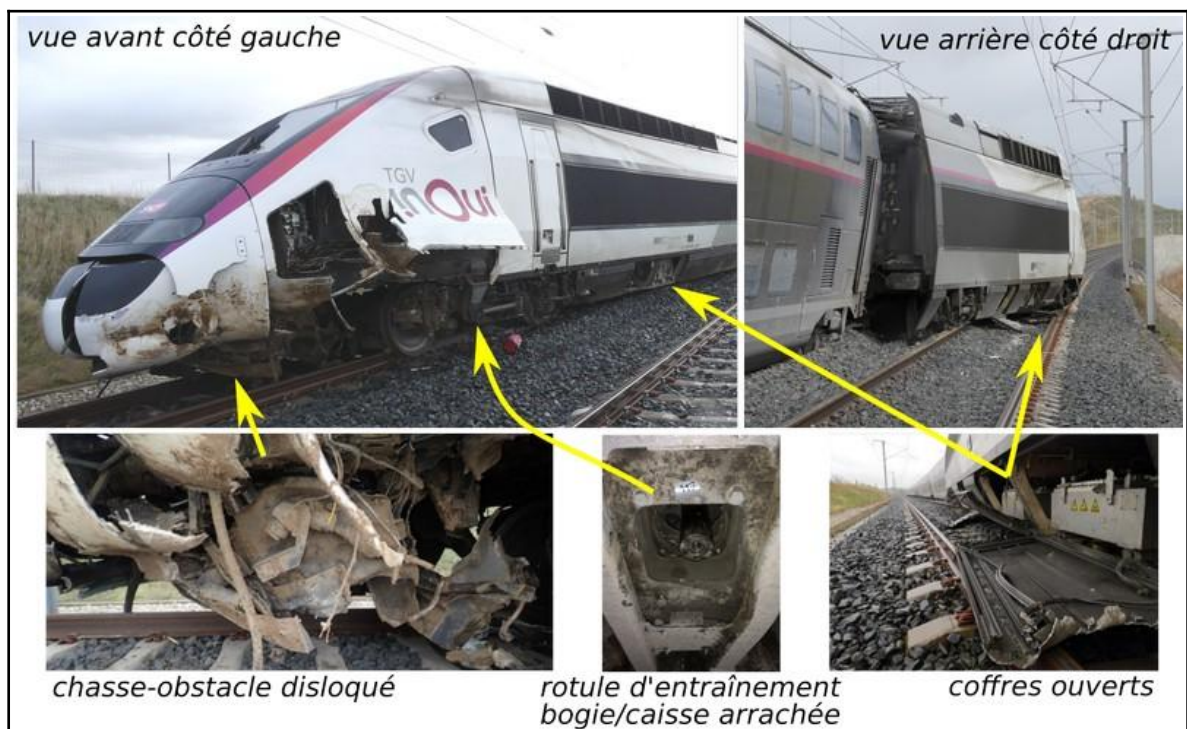


Figure 23 : dommages à la motrice avant

Analyse :

La motrice de tête a été le siège de chocs et d'efforts violents.

Le choc initial a provoqué l'enfoncement du chasse-obstacle de la motrice avant M1 et l'arrachement de tôles de carénage sur le côté gauche. Des trappes de coffre ont été arrachées. À la vue des traces, la hauteur du bourrelet de terre heurté peut être située entre 1,30 et 1,50 mètres. Les éléments structuraux de sécurité passive de la caisse, comprimables lors de grands chocs frontaux, n'ont pas travaillé.

Les bogies de la motrice ont reculé de quelques centimètres par rapport à la caisse, avec un endommagement des éléments de liaison, témoignant de l'importance des efforts entre l'infrastructure et les bogies lors du déraillement.

3.5.2 - Les dommages à la liaison motrice M1 - remorque R1

Les dommages principaux sont les suivants :

- > enfoncement léger, sur le côté droit seulement, des deux tampons de choc compressibles de la motrice et de la rame (perte de l'indicateur fusible et sectionnement de rivets) ;
- > enfoncements localisés du cadre de fixation des bourrelets de la motrice ;
- > rupture du crochet d'attelage ;
- > passerelle d'intercirculation hors service.

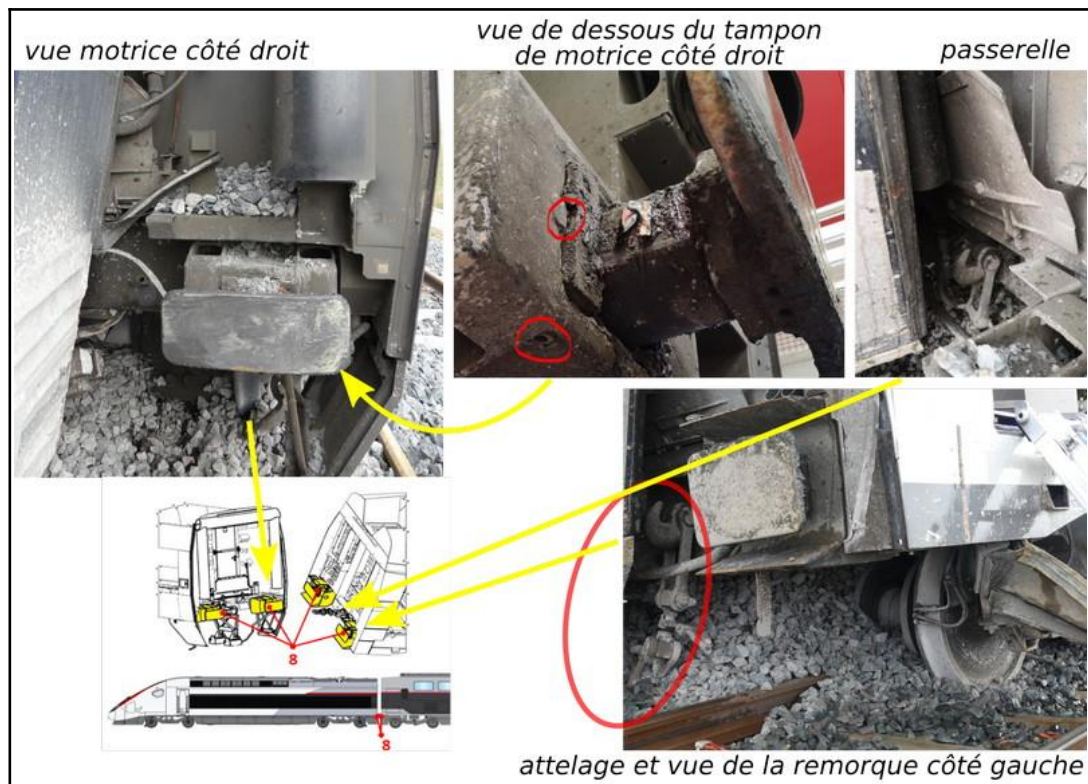


Figure 24 : dommages à la liaison motrice M1 – remorque R1

Analyse :

Il s'est produit un placage de la motrice contre la première remorque R1, principalement retenu par les tampons anti-chocs situés du côté droit, puis une rupture d'attelage par décalage transversal entre la motrice et la remorque.

3.5.3 - Les dommages aux remorques et à la motrice de queue

Les dommages principaux sont les suivants :

- butées entre caisses R1/R2, R2/R3 et R3/R4 enfoncées et vis de la liaison entre remorques (ensemble berceau/glissière) cisailées ;
- arrachement de câblages et de capteurs des bogies, et arrachement de voyants indicateurs de frein sur le côté gauche ;
- martellement d'élément par le ballast (supports d'amortisseur) ;
- frottement de la peinture sur le côté gauche et déformations des tôles localisées ;
- nombreuses vitres des salles hautes et basses étoilées, des deux côtés (129 baies endommagées, soit 75 %).

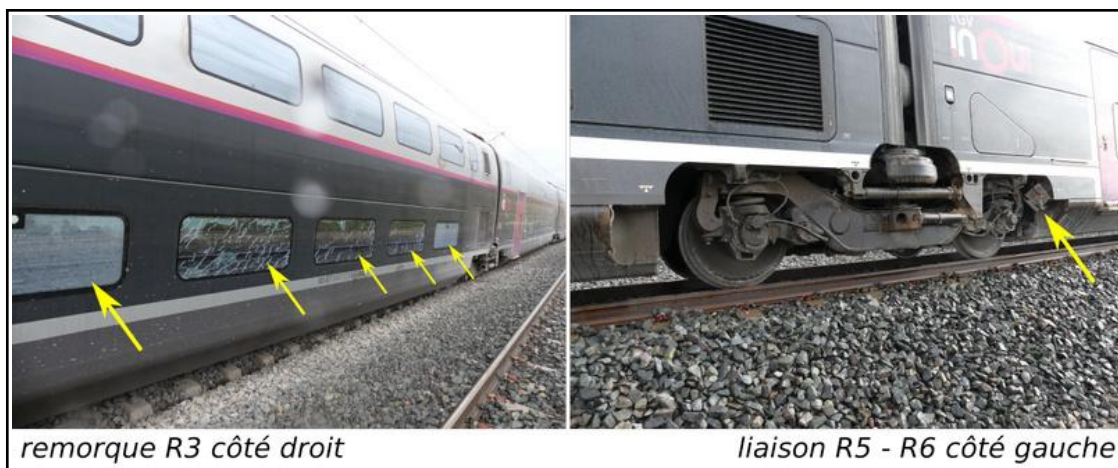


Figure 25 : dommages en partie courante et en queue

Analyse :

Les projections de terre lors du choc initial puis de ballast tout au long du déraillement ont provoqué des traces, des martellements et des arrachements d'organe sur toute la longueur de la rame, principalement sur le côté gauche.

Les projections de ballast par les roues ayant déraillé ont fissuré 75 % des vitres, réparties sur les deux côtés et sur les deux étages. Aucune perforation de caisse n'est survenue en direction de l'intérieur de l'habitacle voyageur, aucune baie n'a éclaté, préservant les voyageurs de toute projection.

3.6 - Les dommages à la voie et la cinématique du déraillement

Nous reprenons ci-après les principaux constats effectués sur la voie lorsqu'on la parcourt dans le sens du train, en commençant par le lieu d'origine du déraillement et en allant vers le lieu d'immobilisation de la rame. L'annexe 6 décrit les constats plus détaillés non repris ici.

État de la voie 2 au point de déraillement (PK 390,980)

Le dépôt de terre entravant la voie 2 empruntée par le train, estimé à 15 m³, a été projeté et pulvérisé aux alentours par le nez du TGV. Des traces de terre sont observables jusqu'à la file extérieure de rail de la voie 1. Sur la voie 2, immédiatement après le dépôt de terre, des traces d'éclatement des traverses et l'absence des attaches sur le côté droit des rails intérieur et extérieur confirment le déraillement de roues par la droite.



Figure 26 : attaches ôtées et traverses éclatées par le passage de roues (à gauche) et projections de terre (à droite)

Le « détecteur de boîte chaude » (PK 390,932)

Au PK 390,932, 50 mètres après le point de déraillement, une installation de signalisation de type « détecteur de boîtes chaudes » (DBC) est endommagée. Il s'agit du détecteur qui a déclenché l'alarme « mise hors service du DBC 32 » dans le poste d'aiguillage concomitamment à l'accident.

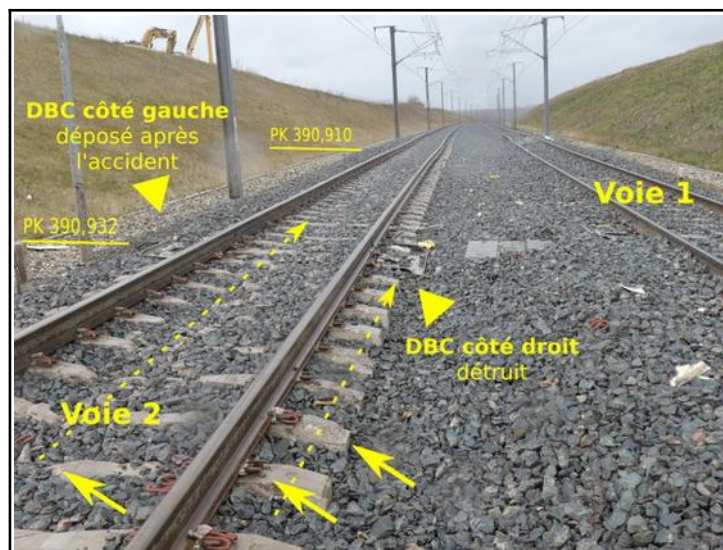


Figure 27 : l'emplacement du DBC et les traces de passage de roues

Le détecteur sur le côté droit est détruit (expliquant l'alarme dans le poste). Certaines roues ont roulé dessus. Il s'agit en toute vraisemblance des roues droites des bogies 1, 2 et 3 des remorques. Les traces de passages de roue sur les traverses confirment le positionnement à droite des bogies qui ont déraillé au droit du monticule.

La cinématique de la rame immédiatement après le déraillement

Quatre déformations de voie sont repérables au total, situées dans la zone immédiate du point de déraillement. Deux sont sur la voie 1, et deux sur la voie 2. Elles sont visualisées sur la vue suivante. Elles correspondent chacune d'elles à des phases de choc du train sur la voie.

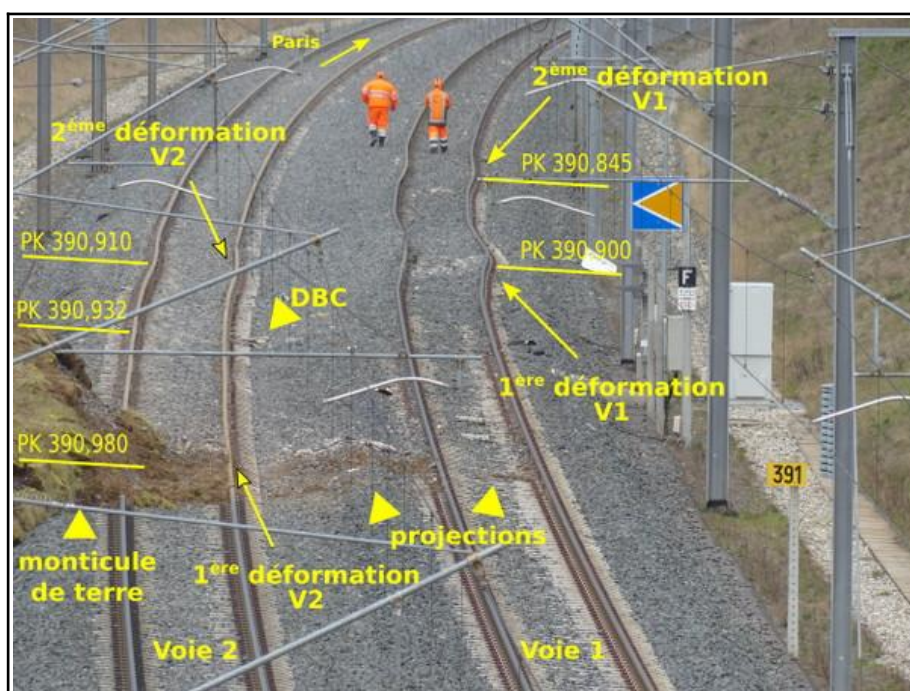


Figure 28 : vue d'ensemble de la zone de début de déraillement

L'interprétation de l'agencement des déformations et des traces de passage de roue sur la voie conduit le BEA-TT à esquisser le scénario suivant des premiers instants du déraillement (la justification de ce scénario est donné en annexe 6) :

- Lors du choc de l'avant de la motrice sur le monticule de terre, le bogie avant de la motrice (bogie A) s'est soulevé et déporté vers la voie 1.
- Les quatre bogies suivants, poussés latéralement ont également déraillé mais en restant à cheval sur la voie 2. Leur poussée latérale a imprimé une première déformation à la voie 2.
- Le bogie avant de la motrice (bogie A) a traversé l'espace entre les deux voies. Ses roues de gauche sont venues chevaucher et traverser la première file de rail de la voie 1, là où des marques de passage de roue sur le rail et les traverses sont visibles (PK 390,910). L'action se situe 70 m et 0,9 seconde après le déraillement (la vitesse était de 284 km/h, soit 79 m/s). Le bogie A, une fois à cheval sur la voie 1, est venu buter sur les rails de la voie 1 par sa droite. Sous le choc, la voie s'est déportée, produisant la première déformation de la voie 1, mais rectifiant la trajectoire du bogie.
- Le choc du bogie A sur la voie 1 a imprimé un mouvement de rotation de la motrice autour de l'axe vertical. Le bogie arrière de la motrice (bogie B) s'est déporté sur la droite. Il a franchi le rail intérieur de la voie 2, imprimant la seconde déformation à la voie 2, puis est venu rouler dans l'entrevoie. Il a alors heurté la voie 1 imprimant la

deuxième déformation à cette voie, ce qui a eu pour effet de redresser sa trajectoire. Il a poursuivi ensuite sa course dans l'entrevoie en butée sur la voie 1.

Cette cinématique d'événements s'est déroulée en moins de deux secondes.

Le positionnement du train en voie par la suite

La configuration du train sur la plateforme, prise deux secondes après l'accident, s'est maintenue jusqu'à l'arrêt complet, environ 1 500 mètres et 40 secondes plus tard. Elle est visualisée sur la figure suivante, après l'arrêt.



Figure 29 : vue générale de la rame après son immobilisation

Le bogie A de la motrice a glissé maintenu en butée sur sa droite par les rails de la voie 1. Le bogie B est resté dans l'entrevoie, plaqué au rail intérieur de la voie 1. Les bogies 1, 2 et 3 sont restés à cheval sur la voie 2.

La figure en page suivante récapitule la cinématique complète du déraillement telle qu'elle a pu être reconstituée. Il est à noter que c'est possiblement lors du choc du bogie A contre la voie 1, 0,9 s après le déraillement, que le conducteur présent en cabine de conduite a pu être projeté vers sa droite au bas de son siège, où il a été grièvement blessé.

Cette cinématique démontre un excellent comportement du matériel et une très bonne interaction en sécurité passive entre le matériel et l'infrastructure.

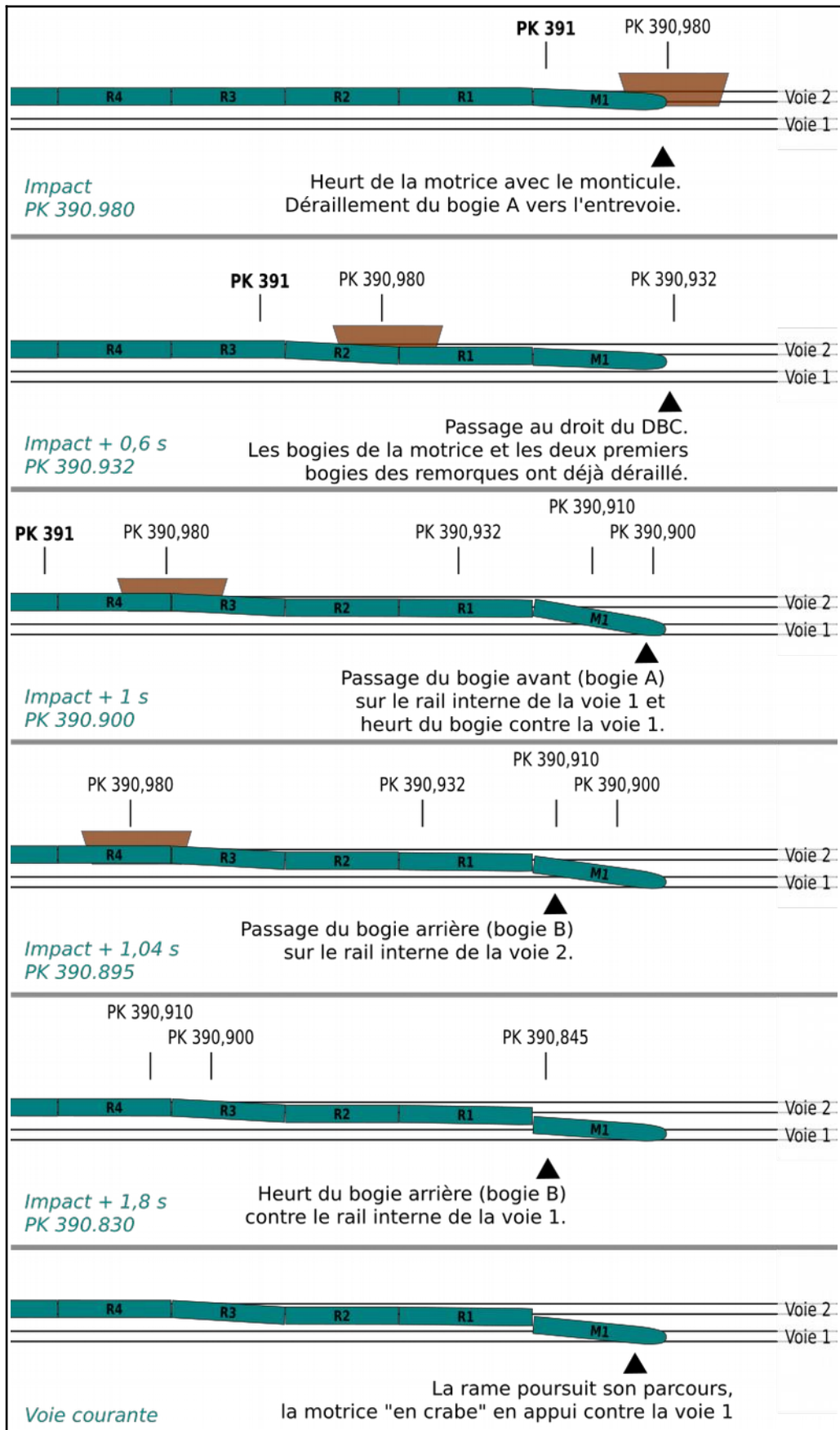


Figure 30 : cinématique de déraillement

3.7 - L'analyse de la non-transmission de l'alerte radio

L'alerte radio est un signal de danger envoyé par radio à l'ensemble des trains du secteur ainsi qu'aux agents en charge de gérer les circulations. Elle est déclenchée lors de situations d'urgence nécessitant une interruption immédiate du trafic. À sa réception, les conducteurs arrêtent leur train et les opérateurs des postes d'aiguillage ferment les signaux donnant accès au secteur.

Les témoignages relatés plus haut présentent une contradiction sur le sujet de l'activation de l'alerte-radio lors du déraillement du TGV 2350 :

- Vu du bord, le conducteur malgré ses blessures s'est relevé après l'arrêt du train et a déclenché une alerte radio en appuyant sur le bouton poussoir prévu à cet effet. La perforation de l'opercule en atteste. Ce déclenchement était adéquat compte tenu de l'engagement de la voie contiguë par la motrice qui avait déraillé.
- Au poste d'aiguillage, les opérateurs ne témoignent pas avoir reçu cette alerte.

L'enquête technique a approfondi ce dysfonctionnement de sécurité qui n'a pas eu de conséquence mais qui aurait pu en avoir si un train croiseur avait été à proximité.

Une première vérification faite sur les enregistrements de télé-surveillance du réseau radio sol-train au centre de supervision national du réseau confirme que le matin du 5 mars 2020, aucune alerte radio en provenance du TGV 2350 n'a été répertoriée. Aucune anomalie ni dysfonctionnement n'ont non plus été observés par la supervision sur l'installation au sol de GSM-R ce jour-là.

Il existe donc bien une incohérence entre, d'un côté, l'absence d'activité radio vue du sol, et de l'autre, l'activation de l'alerte en cabine par le conducteur. Afin de comprendre les raisons de cette situation, nous avons procédé à une double analyse, l'une concernant les installations au sol et l'autre concernant celles du bord.

3.7.1 - L'analyse de l'installation de radio au « sol »

La couverture radio par le système GSM-R sur la zone de l'accident est réalisée par une double couche à partir des deux antennes de Lupstein et de Duntzenheim (voir figure ci-dessous).

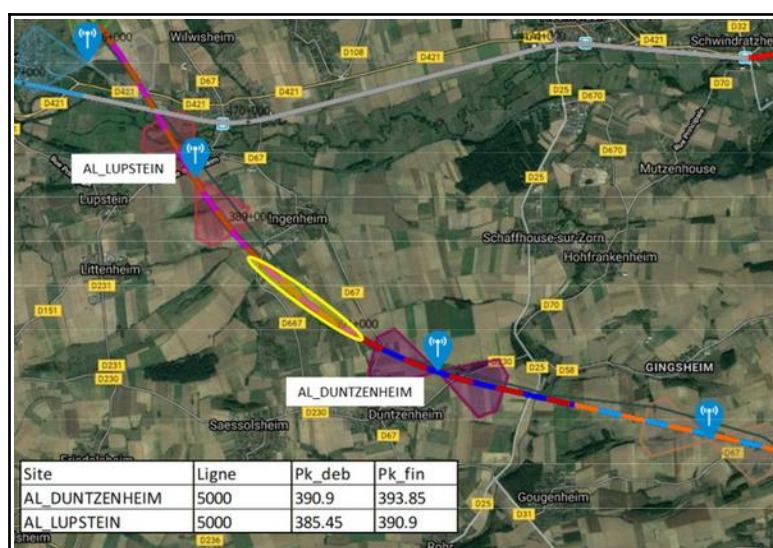


Figure 31 : couverture GSM-R sur le site de l'accident
(la distance parcourue par le TGV une fois déraillé est cerclée en jaune)

Le 3 mars 2020, avant-veille de l'accident, le TGV IRIS 320 qui réalise les inspections rapides des lignes à grande vitesse est passé sur la ligne. Cette circulation mesure notamment la couverture radio GSM-R. La figure ci-après retranscrit la mesure relevée par la rame. Le niveau de champ radio mesuré est supérieur au minimum attendu qui est de -92 dBm¹². Le niveau le plus faible est d'environ -86 dBm au PK 390,73.

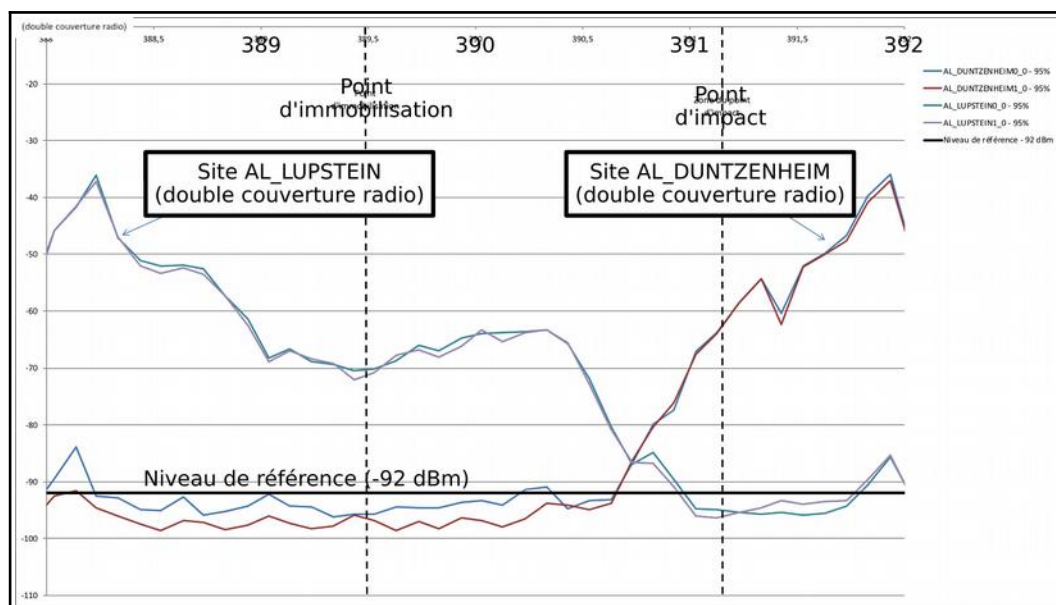


Figure 32 : relevé de mesure de la couverture GSM-R en dBm entre le PK 388 et le PK 392 (chaque paire de courbe correspond à un site d'antenne)

3.7.2 - L'analyse de l'installation de radio à « bord »

Le TGV est doté d'un système informatique embarqué (SIE). Ce système permet de coordonner l'ensemble des fonctions de sécurité sur le train. Le logiciel gère la détection de certains dysfonctionnements, leur signalement en cabine et les traitements appropriés. Il bénéficie d'un enregistrement permanent des actions effectuées.

Le tableau suivant donne la chronologie des événements enregistrés dans le journal de bord du système, qui peuvent être mis en relation avec le fonctionnement du GSM-R.

datation	événement
7h32min47,3s Impact + 40 s	Détection d'un verrouillage de la boîte à levier de la motrice de tête, par la motrice de queue. <i>Cette action est interprétable comme une conséquence d'une perte d'alimentation basse tension en motrice de tête.</i>
Entre 7h32min48,2s et 7h32min54,2s	Plusieurs défauts de communication entre les unités des deux motrices.
7h32min53,5s Impact + 46 s	Indication de redémarrage des calculateurs de la motrice de tête. <i>Cette action est interprétable comme une conséquence d'une reprise d'alimentation basse tension en motrice de tête.</i>
7h32min55,0s Impact + 48 s	Déverrouillage de la boîte à levier de la motrice de tête. <i>Cette action confirme une reprise d'alimentation.</i>

¹² Le dBm est l'unité de mesure de la puissance apparente rayonnée des ondes radioélectriques émises par une antenne. Un niveau de -92 dBm correspond à celui attendu pour une ligne ferroviaire sur laquelle la vitesse de circulation est supérieure à 280 km/h et sur laquelle le système de signalisation est de type ETCS Niveau 2, selon les normes EIRENE (System Requirements Specification Version 16.0.0).

Ce relevé montre ainsi plusieurs anomalies affectant l'alimentation basse tension (72 volts) de la motrice avant.

L'alimentation basse tension est propre à chaque motrice. Elle délivre le courant aux appareillages et calculateurs embarqués de la motrice dont l'équipement électronique de l'alerte radio à bord, appelé le « tiroir radio ». Pour chaque motrice, l'alimentation est fournie par deux batteries situées dans un coffre en bas côté droit. Chaque batterie est connectée à un chargeur qui l'alimente. Les chargeurs sont installés côte-à-côte dans le troisième coffre en bas côté gauche de la motrice. Il est à noter que la connexion de chaque batterie s'effectue par un circuit dont les deux pôles transitent par le chargeur de la batterie correspondante. En raison de ce montage, une déconnexion du chargeur d'une batterie entraîne une déconnexion de la batterie et la perte d'alimentation des équipements par cette batterie.

Lors du choc avec le monticule de terre, la trappe d'accès au 3^e coffre a été arrachée. Cela a permis des projections de terre et de ballast à l'intérieur. Une poignée qui verrouille la fixation des chargeurs sur leurs rails supports a été arrachée (voir figure ci-après). En l'absence de ce verrou, les chargeurs, qui sont montés sur des glissières de manutention, ont pu alors se déplacer au gré des ballottements de la motrice. Par ces mouvements, les broches de connexion électrique des deux chargeurs, dont la partie mâle est fixée sur le châssis de caisse, se sont débranchées. Ceci a conduit à la coupure d'alimentation par les deux batteries et à la perte de tous les équipements électroniques de la motrice.

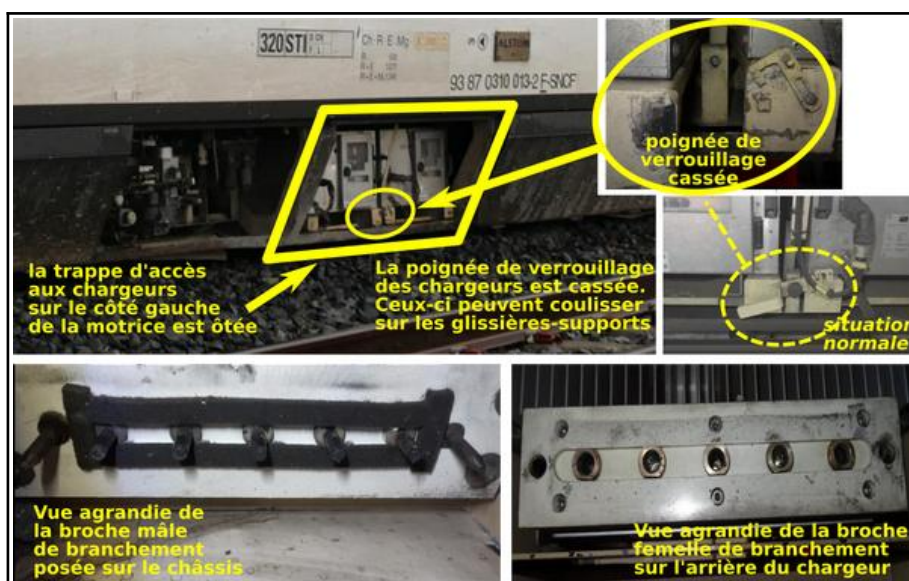


Figure 33 : montage des chargeurs radio

L'un des chargeurs, le n° 1, s'est déconnecté de façon définitive conduisant à la perte complète de certaines fonctions alimentées uniquement par la batterie n° 1 correspondante (le feu avant gauche par exemple). L'autre chargeur, le n° 2, au prix d'une ultime secousse avant l'arrêt de la rame, a vu sa broche de connexion électrique se reconnecter, amenant au rebranchement de la batterie n° 2 et à la réalimentation d'une grande partie des équipements électroniques de la motrice. La remise en service des équipements tracée sur le relevé ATESS (et celui du SEI) en atteste. La coupure d'alimentation n'a ainsi été que temporaire.

Le tiroir radio, a ainsi vu son alimentation disparaître un temps, puis réapparaître. L'action sur le bouton d'alerte radio par le conducteur s'est produite malencontreusement à un moment où le tiroir réinitialisait la remise en marche. De ce fait, le déclenchement de

l'alerte n'a pas été suivi d'effet. On peut le situer entre l'impact + 40 s, moment de l'arrêt du train, et l'impact + 56 s.

Il ressort de ces analyses que l'alimentation électrique des équipements électroniques de la motrice a été perdue lors du déraillement et que cette alimentation ne s'est rétablie que de façon hasardeuse après. Cette perte d'alimentation a produit la perte de fonctions de sécurité dont l'alerte radio, mais aussi d'autres qui ont pu par la suite être identifiées comme le déclenchement de l'alerte lumineuse suite au déclenchement de la veille automatique à contrôle de maintien d'appui (VACMA à impact + 6 s).

La perte d'alimentation a été produite par les chocs et vibrations lors du déraillement. Les conséquences ont été notablement aggravées par la sensibilité de certains composants (verrou des chargeurs) et la vulnérabilité du montage électrique. Il est permis de se demander si la robustesse ou la sûreté de fonctionnement¹³ de cette alimentation indispensable à la sécurité est suffisante en cas de collision à grande vitesse.

En synthèse, il peut être conclu que le conducteur a bien déclenché l'alerte mais que celle-ci n'a pas été émise par le bord en raison d'une perte de l'alimentation basse tension (72 volts) de la motrice. Le sol n'a pas eu d'alerte à retransmettre aux opérateurs.

3.8 - Conclusion intermédiaire sur la cause du déraillement

La cause du déraillement du TGV 2350 est son heurt avec le monticule de terre entravant la voie au PK 390,980. Le monticule provenait de l'effondrement par glissement, quelques minutes plus tôt, du talus de déblai adjacent à la voie.

Sous le choc, la motrice s'est déportée et a traversé la plate-forme, venant se positionner à cheval sur la voie opposée. Les trois premières remorques ont également déraillé, restant toutefois à cheval sur la voie initiale. Continuant leur course, les éléments articulés de la rame sont restés solidaires jusqu'à l'immobilisation complète. Les roues qui avaient déraillé sont restées guidées en butée par les rails et les traverses.

Le comportement en sécurité passive de la rame a été satisfaisant, permettant d'éviter toute conséquence grave pour les voyageurs.

Les actions effectuées par les opérateurs dès la survenue de l'accident ont permis d'assurer une mise en protection rapide du train déraillé et d'éviter les risques de sur-accident. L'alerte-radio ne s'est pas transmise révélant une vulnérabilité de celle-ci mais sans prêter à conséquence, d'autres boucles de rattrapage ayant bien fonctionné.

Le déclenchement des secours et leur déroulement ont été satisfaisants.

¹³ La sûreté de fonctionnement d'un système électrotechnique traduit le niveau de confiance que l'on peut avoir dans le bon fonctionnement en toute situation de ce système. Cette notion fait l'objet d'une norme européenne NF EN 50126, intitulée « Applications ferroviaires - Spécification et démonstration de la fiabilité, de la disponibilité, de la maintenabilité et de la sécurité ».

4 - Les investigations sur le glissement de talus

La cause originelle de l'accident étant le glissement du talus au PK 391, le BEA-TT a été amené à concentrer l'enquête sur l'exploration des raisons du glissement. Les interrogations ont successivement porté sur :

- la détermination de la résistance de l'ouvrage à partir de reconnaissances effectuées sur site après l'accident ;
- l'examen des justifications apportées à la stabilité lors de la construction ;
- l'examen des conditions de surveillance de l'ouvrage en vue d'identifier les signes avant-coureurs de la rupture.

Ces investigations sont restituées dans le présent chapitre.

4.1 - Notions générales sur l'évaluation de la stabilité des talus au glissement

La science de la mécanique des sols a depuis longtemps cherché à évaluer la stabilité au glissement des talus pentus.

Les principales méthodes de calcul de stabilité utilisées se basent sur l'évaluation de l'équilibre des efforts moteurs et des efforts résistants qui s'exercent sur une masse de sol délimitée par une surface potentielle de glissement, interne au talus, de forme plane ou plus généralement circulaire. La stabilité dépend alors de la résistance au cisaillement du sol le long de cette surface, laquelle est liée à la pression de l'eau dans le sol qui influence sur l'interaction entre les particules solides contenues dans ce sol.

D'un côté, le poids du talus exerce sur la surface un cisaillement de glissement moteur τ_{moteur} (voir figure ci-dessous). De l'autre côté, la cohésion du sol exerce un cisaillement résistant $\tau_{\text{résistant}}$ lequel tient compte dans les formules de l'influence de la présence d'eau. Le rapport de la résistance au cisaillement maximale mobilisable sur l'effet moteur donne un coefficient de sécurité F vis-à-vis de la stabilité du talus.

Afin de garantir la stabilité, il est recherché à ce que ce coefficient de sécurité prenne une valeur supérieure à 1. Dans le cas d'un talus de ligne à grande vitesse ferroviaire, un minimum de 1,5 est imposé.

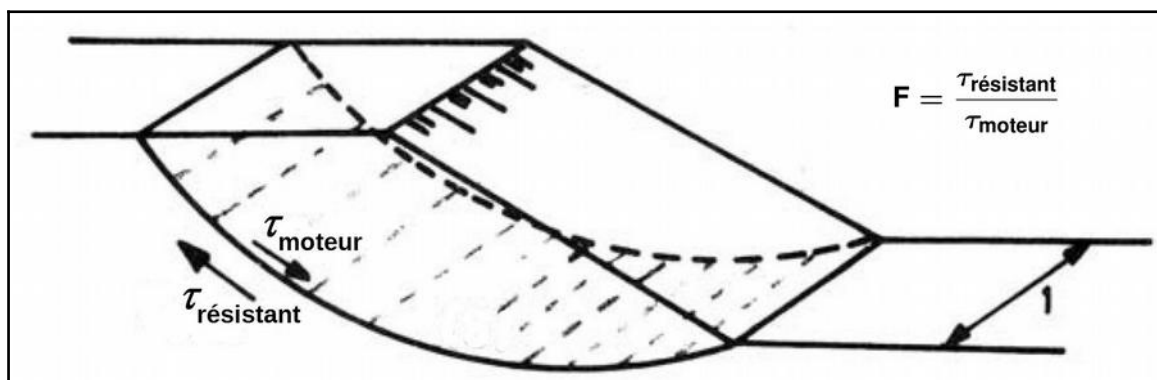


Figure 34 : principe de calcul de la stabilité d'une pente

Le cisaillement maximum $\tau_{\text{résistant}}$ auquel peut résister un sol s'évalue à partir d'essais mécaniques en laboratoire. Éventuellement, pour les sols dits grenus (sables ou graves, non présents ici), il peut être estimé par corrélation empirique avec des essais sur site. Le cisaillement résistant est généralement quantifié à l'aide d'un critère physique, dit de « Mohr-Coulomb », qui s'exprime ainsi en tout point :

$$\tau_{\text{résistant}} = (\sigma - u) \tan(\varphi') + c' \quad \text{où :}$$

- σ est la contrainte normale perpendiculaire à la surface de glissement au point de calcul
- u est la pression de l'eau interstitielle en ce point
- c' est la cohésion interne du sol
- φ' est l'angle de frottement interne du sol

Les paramètres c' et φ' sont dépendants de la nature du sol, ainsi que de son état (densité...). La contrainte perpendiculaire à la surface de glissement potentielle (σ) varie selon le poids des terres situées au-dessus de la surface de glissement.

Les méthodes de calcul s'attachent à explorer plusieurs surfaces de glissement potentielles pour déterminer celle ayant un coefficient de sécurité minimal, correspondant au coefficient de sécurité de la pente. Le calcul est effectué par ordinateur. Les ingénieurs concepteurs utilisent par exemple le logiciel « TALREN », développé et commercialisé par la société TERRASOL¹⁴, ce qui fut le cas pour les études de vérification du déblai.

Au-delà de ces considérations sur l'évaluation de la résistance, la science de la mécanique des sols s'est également attachée à comprendre la cinématique des phénomènes de glissement lorsqu'ils se produisent. La figure ci-dessous, que nous décrivons en page suivante, schématise les différentes phases d'évolution telles qu'on peut les décrire dans la littérature scientifique.

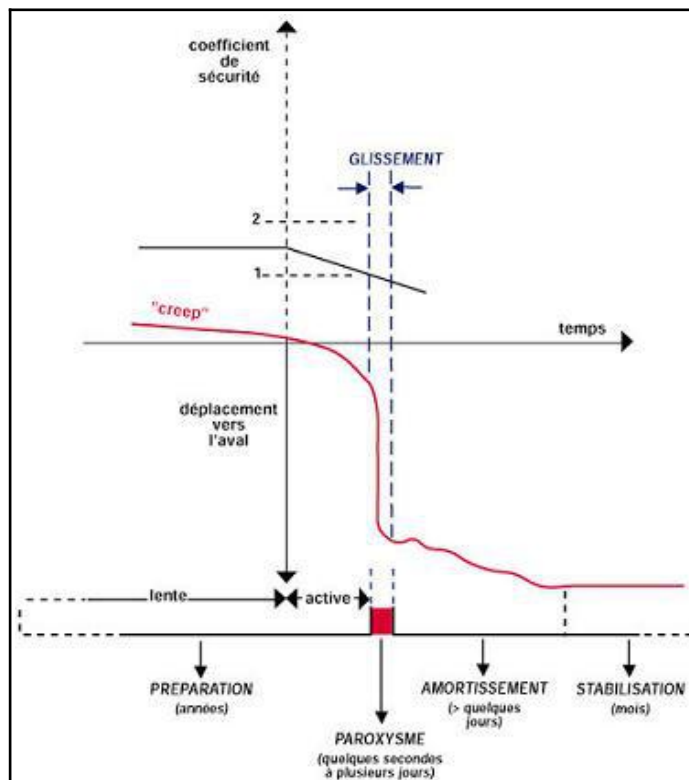


Figure 35 : mécanisme du glissement (source : laboratoire des ponts et chaussées, 2003)

14 TERRASOL est une société française d'ingénierie géotechnique, filiale du groupe SETEC.

Les phases du mécanisme de glissement sont les suivantes :

- > Le phénomène s'initie par une phase active, dite de « fluage » (en anglais « creep »)¹⁵, et d'équilibrage des pressions de l'eau interstitielle. Les pressions de l'eau vont lentement passer de valeurs produites par la déformation des sols pendant les travaux (conditions dites « de court terme ») à des valeurs établies après travaux (conditions dites « à long terme »). Pendant cette phase, généralement, le coefficient de sécurité diminue progressivement.
- > Puis, le phénomène se poursuit par une phase active de « glissement » avec des déplacements significatifs. Lorsque les sols sont meubles (faible cohésion), il est souvent possible d'observer les premiers déplacements de faible ampleur (fissures, bourrelets). De tels déplacements n'ont pas été repérés sur le DB 537 par les agents en charge de la surveillance de l'ouvrage, mais ils sembleraient avoir été vérifiés grâce à une analyse d'images par satellite conduite à posteriori que nous évoquerons plus loin. L'accélération des déplacements, avec des mouvements qui peuvent être soudains, est le plus souvent liée aux mauvaises conditions météorologiques, qui accroissent les pressions de l'eau contenue dans le sol. Ces mauvaises conditions étaient présentes avant le 5 mars 2020.
- > Enfin, les matériaux écroulés subissent quelques déplacements résiduels (phase « amortissement ») avant de se restabiliser (phase « stabilisation »). Dans notre cas, la phase « amortissement » a pu être observée avec la progression du pied de glissement qui s'est effectuée sur les voies les jours suivants l'accident (voir figure 22).

4.2 - Les sols en présence

Le maître d'ouvrage SNCF Réseau, le maître d'œuvre SETEC et l'entreprise de construction RAZEL-BEC ont mis en place, tout au long du projet et des travaux de construction du déblai, un important dispositif de suivi et de conservation des documents. Cette base documentaire est très appréciable et a permis d'avoir accès, lors de l'enquête, à l'historique complet des données sur l'ouvrage. Les enquêteurs ont pu déceler quelques erreurs ponctuelles dans l'important volume de données conservées, mais ces erreurs ont pu être rectifiées sans grande difficulté.

La consistance des terrains du sous-sol terrassé a été décrite au travers d'une maquette géotechnique qui s'est précisée tout au long du projet et que nous reprenons ici. Dans la zone de grande hauteur de la butte, là où s'est produit le glissement, le sol est constitué du haut vers le bas des couches détaillées ci-après et visualisées sur la figure en page suivante qui est extraite du « dossier des ouvrages exécutés » (DOE).

Ces couches sont :

- > en partie supérieure, une couverture limoneuse loessique¹⁶ formée à l'ère quaternaire (notée OE) qui atteint 15 mètres d'épaisseur à son maximum (en jaune sur la figure) ;
- > en partie inférieure, une succession de formations du Jurassique inférieur de l'ère tertiaire (autrefois nommé Lias) qualifiées dans le DOE de « marneuses » et constituées selon le DOE, du haut vers le bas, de la série Domérien (notée L6, en bleu) et Carixien (L5 en violet).

Le « loess » est un matériau homogène meuble, constitué de grains de la taille des limons déposés par transport éolien. Les « marnes » sont des matériaux sédimentaires formés par un mélange de calcaire (ou carbonate de chaux CaCO_3) et de minéraux argileux. Le

15 Le fluage est un phénomène physique qui produit une déformation irréversible progressive d'un matériau lorsque celui-ci est soumis à une contrainte prolongée.

16 Les sols sont classifiés selon le degré de finesse des grains qui les composent, qui traduit aussi leur degré d'imperméabilité. On trouve de façon schématique, du plus gros et perméable au plus fin et imperméable : les sables, les limons (dont les loess) et les argiles (dont les marnes).

calcaire joue un rôle de ciment qui apporte de la cohésion au matériau en proportion de sa fraction.

Il faut toutefois remarquer que la qualification de « marnes » donnée par le DOE dans le cas de la formation L6 du Domérien nous semble impropre. La fraction de calcaire présente dans la partie supérieure de cette formation, révélée par les analyses en laboratoire, est très faible et inférieure à 5 %. C'est ainsi que, selon ces mêmes analyses, le matériau ne réagit pas à l'acide. Il s'agit donc majoritairement d'argiles que nous désignerons donc par la suite comme « argiles du Domérien ».

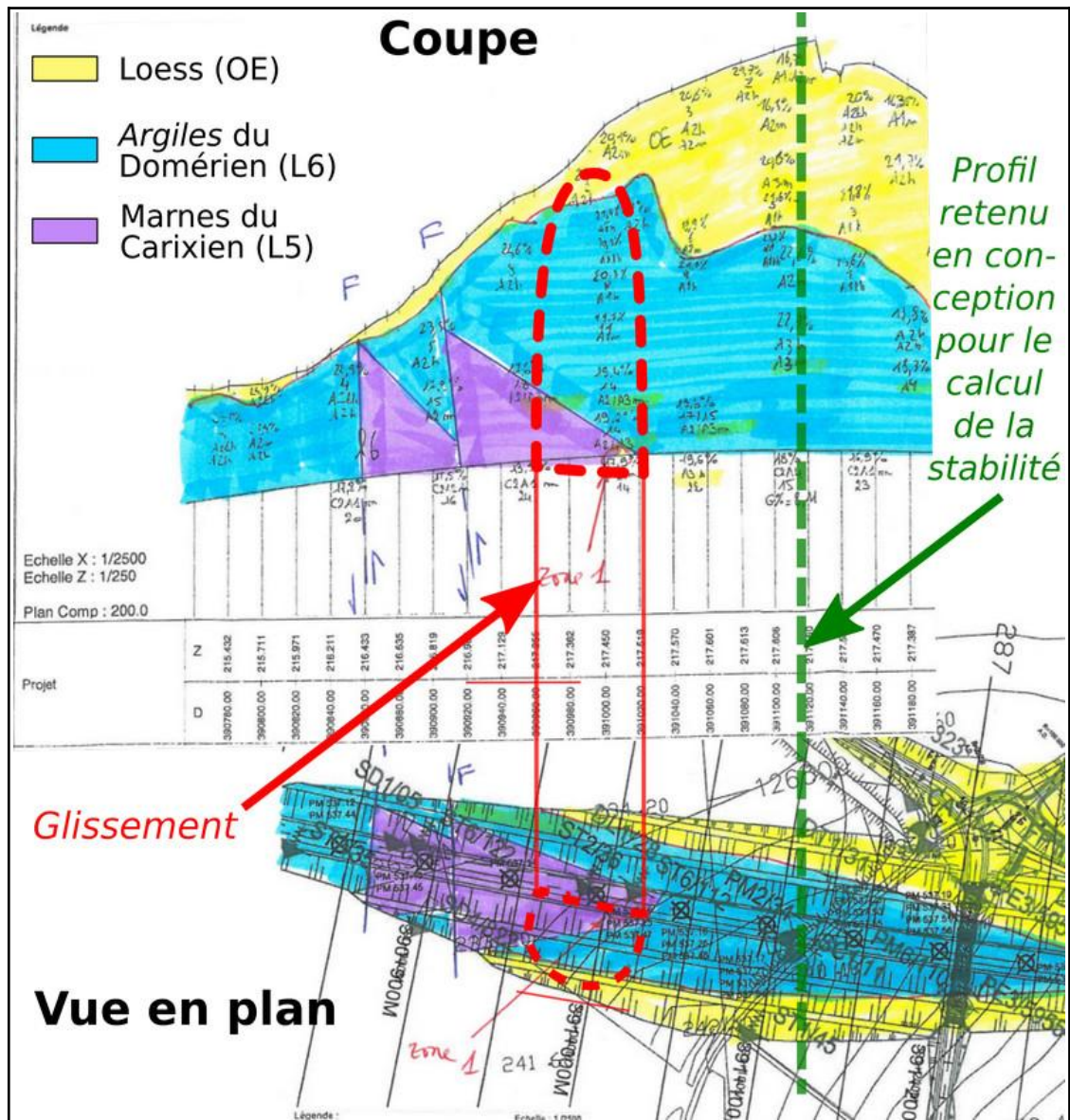


Figure 36 : maquette géologique au droit du DB 537, en coupe et en vue en plan

Comme nous pouvons l'apercevoir sur les photographies de la figure ci-après, prises lors du déblaiement du glissement après l'accident, les matériaux des formations ont des teintes assez différenciées. Les loess de la partie supérieure sont de couleur brun-orangé, avec des hétérogénéités comme une zone claire au sommet ainsi qu'en partie basse. Les argiles du Domérien sont de couleur plus claire, beige clair, jaunâtre. En partie inférieure se situent des marnes, de couleur sombre grisâtre.

Les photographies montrent qu'au droit de la zone de glissement, la limite entre les loess et les argiles du Domérien se situe à peu près à mi-hauteur des risbermes supérieure et inférieure. La couche de loess est un peu plus importante que représentée sur la maquette. Elle atteint presque une dizaine de mètres. Les argiles du Domérien constituent la part prépondérante en hauteur avec une douzaine de mètres. Des marnes, de couleur grisâtre, affleurent à la toute base du talus, côté ouest (en bas à droite de la figure 37). Cette formation est plus stable que les autres ; elle fut terrassée au moyen de brise-roches. Sa présence dissymétrique explique aussi l'existence de la dissymétrie du glissement avec le bourrelet de terre venu se déposer jusque sur la voie vers l'ouest : les terres glissées ont chevauché la couche dure.

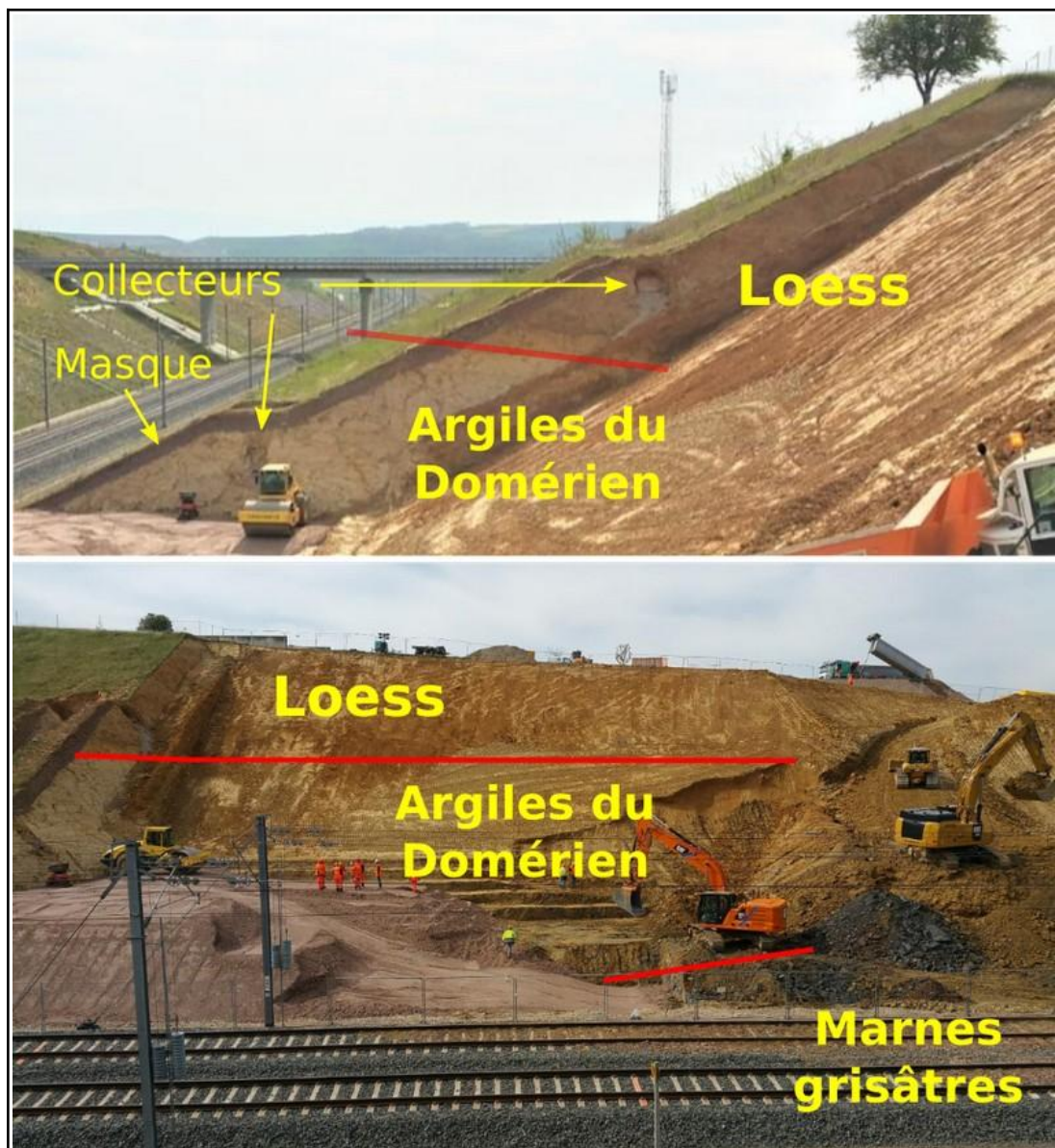


Figure 37 : images du terrain en coupe

4.3 - Les investigations sur site postérieures au glissement

Cette partie restitue les observations faites sur le site lors du déblaiement du glissement, ainsi que les résultats de la campagne de reconnaissance géotechnique complémentaire organisée par le gestionnaire d'infrastructure après l'accident.

4.3.1 - Le levé topographique du glissement

Le levé topographique du glissement est donné en coupe sur la figure suivante. Il permet de reconstituer le cercle de glissement supposé.

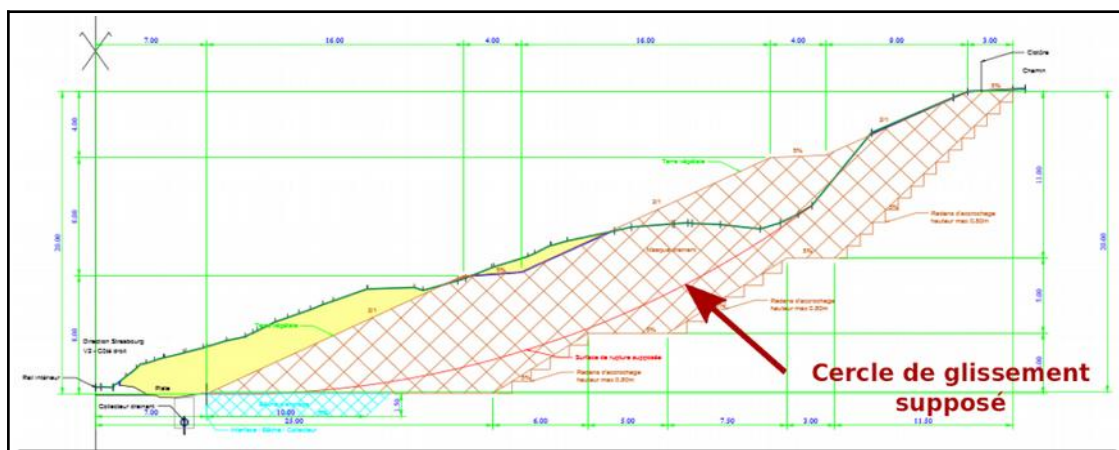


Figure 38 : le cercle de glissement supposé et le décaissement de reconstruction

4.3.2 - Les constats sur les circulations d'eau lors du déblaiement

Les observations visuelles du terrain lors du déblaiement ont été considérablement gênées par la mise en place du confinement généralisé lié au Covid-19, en France 12 jours après l'accident, et la limitation des déplacements en résultant. Les constats rassemblés ici, effectués début mars puis à partir de mi-avril, résultent de deux visites des experts du Cerema, quatre visites de l'expert judiciaire missionné dans le cadre de la procédure pénale, ainsi que d'observations établies par SNCF Réseau. Ces constats se sont déroulés en parallèle des travaux de déblaiement. Ils ont pu manquer de complétude.

Le lendemain du glissement, aucune arrivée d'eau significative n'était apparente à la surface du décrochement dans la formation de loess mise à nu.

Dans les jours qui ont suivi, et alors que la météorologie était très pluvieuse du 5 au 12 mars 2020, l'expert judiciaire missionné pour la procédure pénale a constaté qu'un phénomène d'entraînement de particules fines des loess s'était mis en œuvre dans la paroi du décrochement favorisé par des venues d'eau depuis le sol en place. Cinq cônes de déjection se sont ainsi formés dont 3 sont montrés sur la vue ci-dessous prise le 12 mars 2021. La quantité de fines lessivées montre la force du mécanisme.



Figure 39 : les écoulements dans les loess (photo expert judiciaire le 12/03/20)

À l'ouverture de la formation des argiles, le même expert judiciaire a constaté, le 17 avril 2020, une différence d'aspect du terrain en relation avec des différences de teneur en eau. Il distingue une zone en partie centrale du glissement qui présente un sol gorgé d'eau (flèche rouge à droite sur la figure ci-dessous) et les parties latérales moins humides (flèche rouge à gauche). L'eau s'accumule et stagne en pied de la masse centrale (en bas à droite sur la figure ci-dessous). La pluviométrie est pourtant quasi nulle depuis la fin du mois de mars. Les terrassements sont à ce stade légèrement sous le niveau de la risberme inférieure. L'expert judiciaire constate dans les argiles des niveaux plus indurés, feuilletés avec la présence de cristallisation de calcite caractérisant de probables zones préférentielles d'écoulement de l'eau.



Figure 40 : vue du centre du glissement en cours de terrassement (photos expert judiciaire le 17/04/20)

SNCF Réseau constate aussi l'accumulation très localisée de cette eau le 18 avril, qui s'assèche le 20. SNCF Réseau attribue l'apport d'eau (par météo sèche) à une libération d'eau contenue dans le drain de la risberme inférieure lors des travaux de déblaiement (nous verrons au paragraphe suivant que ce drain présentait plusieurs zones de stagnation d'eau). Les experts du maître d'œuvre attribuent l'apport à un hypothétique engorgement de circulations fissurales internes au talus produisant des mises en charge soudaines et localisées.

Le 21 avril, alors que le déblaiement est achevé, l'expert judiciaire constate que les matériaux déblayés présentent toujours un caractère boueux, gorgés d'eau malgré le temps sec. Il observe au pied du déblai des flaques d'eau qui stagnent.

Le 23 avril, toujours par beau temps, SNCF Réseau identifie une arrivée d'eau gorgeant le sol en dessous du fond de la tranchée drainante de la risberme supérieure (cercle rouge à gauche sur la figure ci-dessous). Ce niveau correspond au contact loess / argile. Une autre zone humide, plus ponctuelle, est constatée à proximité immédiate le lendemain. Le 27 avril, il s'agit d'une persistance des suintements et traces d'humidité sur une ligne de 6 à 7 mètres correspondant à une frange noirâtre du terrain entre loess et argiles (cerclée en rouge à droite sur la figure). À cette date le remblaiement du talus a déjà ré-enfoui la partie inférieure. Les suintements persisteront jusqu'à enfouissement de la partie supérieure mi-mai.



Figure 41 : suintements entre loess et argiles (photo SNCF Réseau le 29/04/20)

Ces constats manquent de complétude, ayant été perturbés par la crise sanitaire. Ils témoignent néanmoins de l'existence de circulations d'eau actives dans les loess et plus localement dans les argiles. Pour les argiles, qui sont des formations peu perméables, ces écoulements souterrains trouveraient des cheminements préférentiels dans des anfractuosités du terrain.

4.3.3 - L'inspection des réseaux de drainage

Une campagne de vidéo-inspection des dispositifs de drainage implantés sous les risbermes et en pied de talus a été effectuée dans le secteur du glissement juste après l'accident, du 10 au 13 mars 2020.

L'état initial (en fin de construction) du réseau dans les risbermes n'est pas connu. Une reconnaissance complète par caméra aurait été établie en fin de construction, mais, si des images ont bien été retrouvées pour les collecteurs de pied de talus, aucune ne l'a été pour les drains des risbermes.

Les principaux constats de la campagne après l'accident sont décrits ci-après pour chacun des trois niveaux de conduite du talus. Ils montrent des dégradations importantes (les numéros des images et des regards se réfèrent à ceux portés sur la figure 42) :

- > Le drain situé sous la **risberme supérieure** présente, sur son linéaire en amont de la zone glissée c'est-à-dire vers Strasbourg, un aspect propre et sec (image 1). Il en est de même jusqu'au droit du regard effondré. Après le glissement, c'est-à-dire vers Paris (sens descendant), le drain présente une ligne d'eau et de boue de 5 à 10 cm de hauteur (image 2). Plus loin après le regard qui marque la fin de la risberme (numéroté R5), le drain descend et est sur le linéaire très déformé jusqu'au regard R6, avec des ovalisations, des poinçonnements et des écrasements (image 3). Il y a aussi des déformations au niveau des raccords (image 4). En extrémité, avant le regard R6, le drain comporte des ruptures de pentes et il est fendu en partie inférieure (image 5). Cette toute dernière zone correspond toutefois à l'aplomb de la piste d'accès réalisée alors pour le chantier de déblaiement. Les déformations en ce point résultent a priori du passage de camions sur la piste dans les heures qui précèdent l'inspection. Il n'est pas exclu que ces camions aient produit certaines des autres déformations.

Cet état des lieux semble traduire une différence de fonctionnement de la conduite entre l'amont et l'aval de la zone glissée. À l'amont, la conduite est saine avec peu de stagnation d'eau. À l'aval, la conduite est en mauvais état avec des stagnations d'eau.

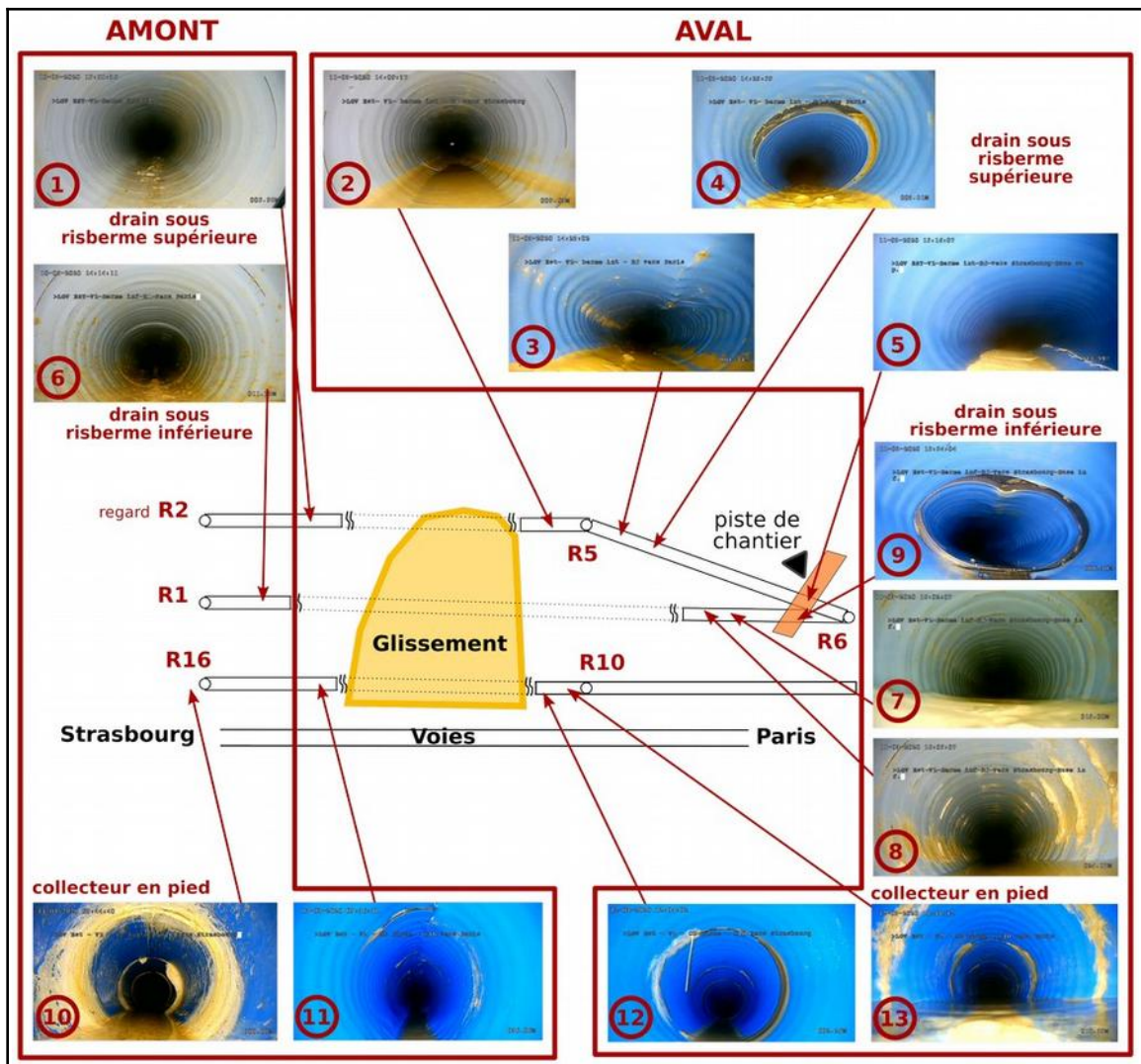


Figure 42 : schéma d'ensemble de l'inspection vidéo du système de drainage

- Le drain situé sous la **risberme inférieure** est, vers Strasbourg, assez propre et sec (image 6), sauf en certaines zones localisées où il y a accumulation d'eau résultant de dépôt ou, semble-t-il, de « flash » c'est-à-dire de défauts de profil en long du drain. Vers Paris, de l'autre côté du glissement, le drain n'a été reconnu que sur un faible linéaire de 30 m. Il présente des dépôts, avec formation d'un seuil retenant l'eau (image 7). Des concrétions se sont formées par endroit dans les ouvertures de drainage attestant d'arrivées ponctuelles d'eau (image 8). À l'approche du regard R 6, le drain est très déformé, écrasé (image 9). Cette dernière zone correspond toutefois à l'aplomb de la piste de chantier.

Le linéaire global reconnu de ce drain est assez faible. Il semble que globalement il était le siège d'une circulation d'eau tout du long, avec des zones de stagnation en raison de défauts de profil et d'accumulation de matériau formant seuil.

- Le collecteur drainant placé en **pied de talus** ne présente pas de déformation. Ceci vaut en dehors de la partie glissée qui n'a pas pu être examinée. Le collecteur présente des dépôts calcaires, certains formant un seuil avec stagnation d'eau, ainsi que des calcifications importantes au droit des fentes de drainage, certaines étant colmatées (image 10). Côté Paris, une stagnation d'eau lié à un seuil atteint jusqu'au quart du diamètre du collecteur (image 13).

Le BEA-TT s'est demandé si le mauvais état global des drains des risbermes, avec des flashes, des accumulations de matériau et d'eau, des fissurations et des défauts aux raccords, n'aurait pas pu être à l'origine de réalimentations en eau localisées des matériaux du talus. Il n'a pas été en mesure d'apporter une réponse.

4.3.4 - La campagne géotechnique complémentaire

Dans le but de comprendre l'accident, et face à l'impératif de redimensionner un ouvrage de reconstruction de la zone effondrée, le gestionnaire d'infrastructure a réalisé une campagne géotechnique, comprenant des essais in-situ et des essais de laboratoire.

La campagne a comporté deux sondages carottés de 30 m de profondeur dans la butte au droit de la zone de glissement (au PK 391,040 pour le talus voie V2 et au PK 391,000 pour le talus voie V1). Ces sondages ont fourni des échantillons pour les essais de laboratoire consistant en des essais dits d'identification, de cisaillement et œdométriques. Les essais d'identification permettent de déterminer la nature des sols, tandis que les essais œdométriques évaluent le degré de surconsolidation de l'argile, qui est important pour le choix des paramètres de résistance au cisaillement. D'autres sondages à la tarière à l'entour ont complété pour permettre l'identification des sols. Des capteurs de pression interstitielle et des piézomètres ont également été posés. Les résultats sont présentés dans un rapport très détaillé. Les sondages ont confirmé l'analyse de la structure du sol faite au § 4.2, en précisant toutefois que la formation beige clair L6 du Domérien était à faible fraction de calcaire et donc plus une argile qu'une marne.

Nous allons nous intéresser aux essais de cisaillement qui permettent de caractériser la résistance du sol pour la vérification de la stabilité du talus. La figure ci-après donne une vue extraite du rapport d'essais de laboratoire montrant trois éprouvettes de sol après leur rupture en cisaillement lors de l'un des essais triaxiaux¹⁷.

¹⁷ La détermination des caractéristiques mécaniques s'effectue par un essai en laboratoire appelé **essai triaxial** : une éprouvette de forme cylindrique, enveloppée d'une membrane étanche, est placée dans une cellule où elle est soumise à une contrainte uniforme de confinement par accroissement de la pression dans la cellule. Ensuite, un piston permet de la comprimer dans la direction axiale à vitesse constante jusqu'à la rupture. Dans l'essai triaxial réalisé, de type (CU+u), l'éprouvette est tout d'abord consolidée de manière isotrope, avec drainage de l'eau interstitielle contenue dans l'éprouvette, puis elle est cisailée en condition non drainée, c'est-à-dire sans drainage de l'eau interstitielle, mais avec mesure de la pression de l'eau interstitielle (u), permettant de calculer les contraintes dites « effectives » (σ') qui caractérisent les interactions entre les particules solides du sol, d'où provient sa résistance au cisaillement.



Figure 43 : échantillons d'argiles après rupture lors de l'essai triaxial

Dix essais triaxiaux, comprenant chacun trois écrasements d'échantillon (soit 30 mesures des contraintes de résistance), ont été réalisés, dans les loess et dans les argiles du Domérien prélevés sur le site du glissement. Les limites de résistance obtenues pour ces échantillons sont représentées sur la figure ci-dessous qui est expliquée ci-après.

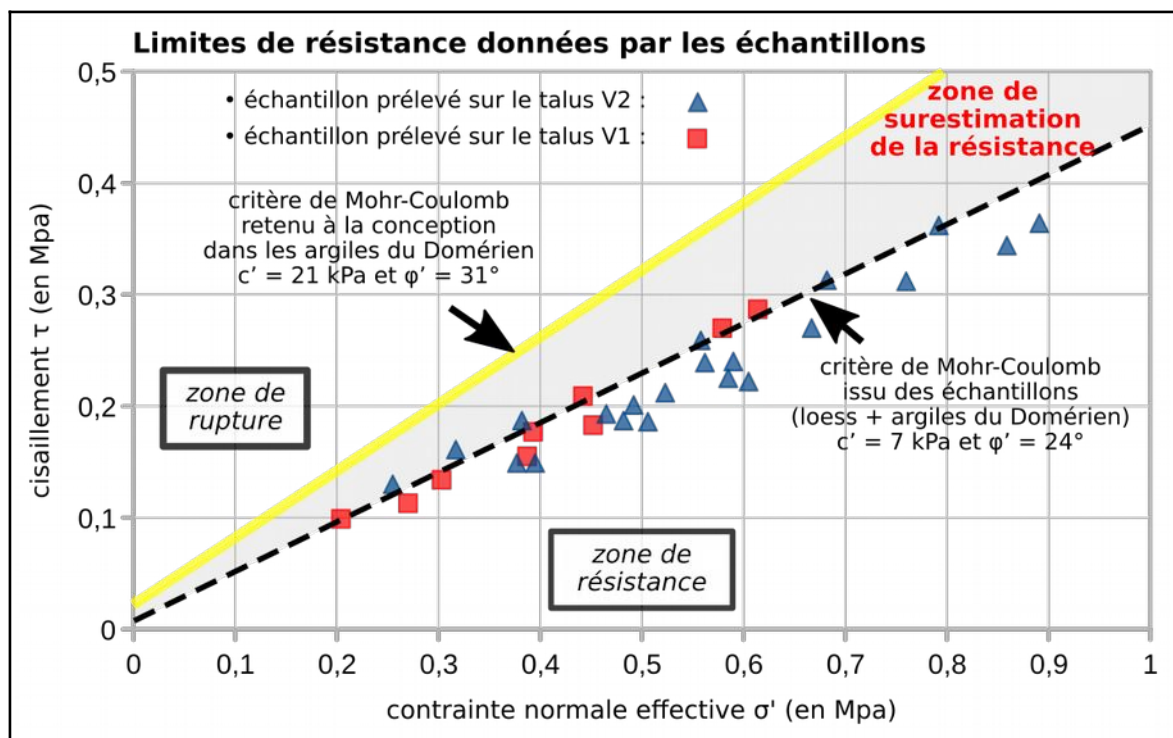


Figure 44 : résultats des essais triaxiaux de la campagne complémentaire

Le graphe donne une représentation du critère de résistance de « Mohr-Coulomb » obtenu (voir § 4.1), avec en abscisse la contrainte effective normale σ' et en ordonnée le cisaillement résistant τ à la rupture (nota : cette représentation est simplificatrice de la grande complexité d'analyse de ces données mais est voulue ici pour comprendre simplement les ordres de grandeur en jeu). Le graphe montre que :

- > Le domaine de résistance des échantillons prélevés est sensiblement délimité par un critère de Mohr-Coulomb correspondant à une cohésion $c' = 7 \text{ kPa}$ et un angle de frottement interne $\phi' = 24^\circ$ (ligne noire en pointillé). Les résistances obtenues pour les loess et pour les argiles du Domérien sont comparables, c'est pourquoi les mesures dans ces deux formations différentes sont amalgamées dans le graphe.

- Les valeurs obtenues ci-dessus sont assez en écart avec celles retenues à l'époque de la construction pour la formation des argiles du Domérien. Les paramètres retenus étaient $c' = 21 \text{ kPa}$ et $\varphi' = 31^\circ$ dans cette formation (correspondant à la ligne jaune). Nous reviendrons plus loin au § 4.5.1 sur l'origine de ces valeurs.

Pour les loess, les paramètres retenus (12 kPa et 25°) étaient plus en comparaison.

Le domaine de résistance des argiles du Domérien a de ce fait été très sensiblement surestimé lors de la conception, notamment en raison du choix d'un angle de frottement interne du sol φ' fort (31°) qui maximise la résistance sous charge. Nous verrons au § 4.8.1 que les paramètres géomécaniques retenus à l'époque ont de ce fait conduit à surestimer notablement le coefficient de sécurité en stabilité du talus.

4.4 - Les choix de conception des ouvrages de drainage

Les constats relatés dans le paragraphe précédent conduisent à approfondir les dispositions prévues lors de la conception et de la construction de l'ouvrage. Nous présentons dans un premier temps les choix concernant les ouvrages hydrauliques avant d'aborder au chapitre suivant les aspects mécaniques de vérification de la stabilité.

Comme nous l'avons déjà dit (§ 4.1), la présence d'eau est un paramètre important intervenant dans la stabilité d'un talus. Pour évaluer cette présence, des **relevés piézométriques** avaient été effectués lors des reconnaissances avant travaux. Selon les documents du DOE, ils ont mis en évidence la présence de deux nappes. La première est une nappe superficielle située dans les loess. La seconde est située dans les argiles, formation de perméabilité globalement faible malgré tout, si bien que cette nappe consiste surtout en des circulations fissurales. Le déblai est qualifié d'humide.

Cette description est cohérente aux observations faites après l'accident. Des écoulements ont bien été identifiés en provenance des loess et, possiblement et localement des argiles (cf. § 4.3.2).

La stratégie de gestion des eaux internes du talus a connu une évolution notable au cours du projet, que nous allons décrire.

Lors de la phase de conception initiale PRO, la géométrie du talus et les principes de drainage retenus sont représentés sur la figure ci-après.

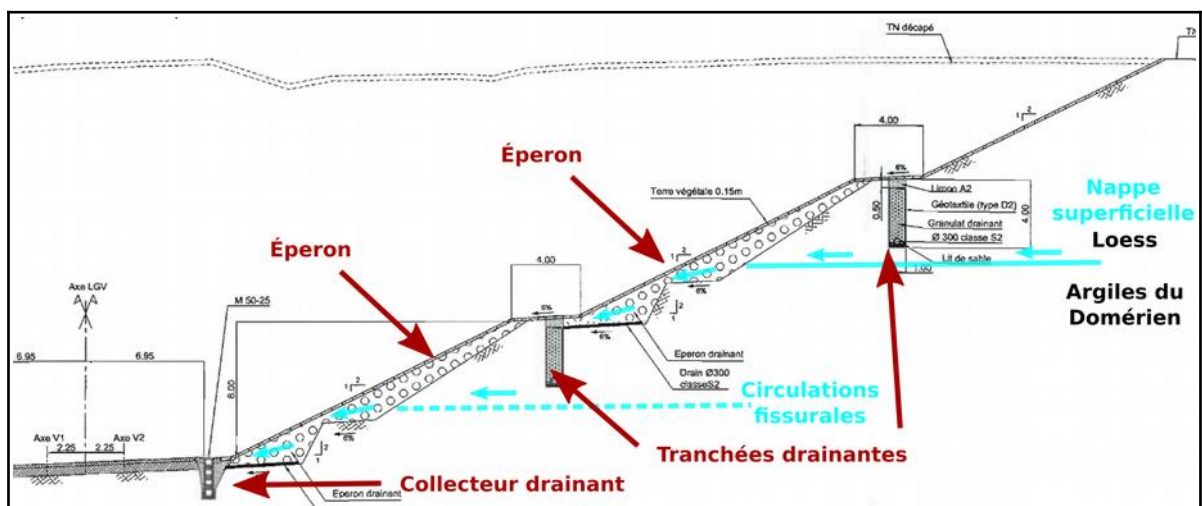


Figure 45 : profil en travers et dispositifs de drainage à l'issue de la phase PRO

Dans cette conception initiale, le drainage s'effectue par deux types d'ouvrages :

- des **tranchées drainantes longitudinales** disposées sous les risbermes, ainsi qu'un **collecteur drainant longitudinal** en pied de talus. Les tranchées drainantes nécessitent d'être soigneusement réalisées, sinon elles pourraient avoir un effet de réintroduction d'eau dans le talus qui peut s'avérer dévastateur sur la stabilité ;
- des « **éperons** » **drainants transversaux**, qui sont des tranchées dans la direction de la pente, disposées tous les 5 m. Ces ouvrages ont la double fonction de participer à la stabilité du talus par effet de contrefort et d'assurer un drainage en profondeur.

Nous remarquons que l'interface loess / argile représente une ligne particulière d'écoulement des eaux. En effet, les deux matériaux en présence ont des perméabilités différentes : les argiles constituent une formation étanche au regard des loess (perméabilité dans la gamme de 10^{-8} m/s pour les argiles et de 10^{-7} m/s pour les loess). Les eaux de la nappe superficielle s'évacuent de façon privilégiée en passant au-dessus de l'interface. Des suintements ont d'ailleurs pu être observés à cette interface lors des travaux de déblaiement (cf. § 4.3.2). Cette circulation est symbolisée par une ligne bleue en trait plein sur la figure. S'y ajoutent d'autres écoulements qui peuvent se produire sous forme de circulations fissurales dans les argiles (symbolisées par une ligne bleue en pointillé sur la figure). Ces deux types d'arrivée d'eau sont captés par les éperons drainants.

À l'issue de la phase de conception PRO+, la géométrie du talus et les principes de drainage qui ont été retenus sont présentés sur la figure ci-après.

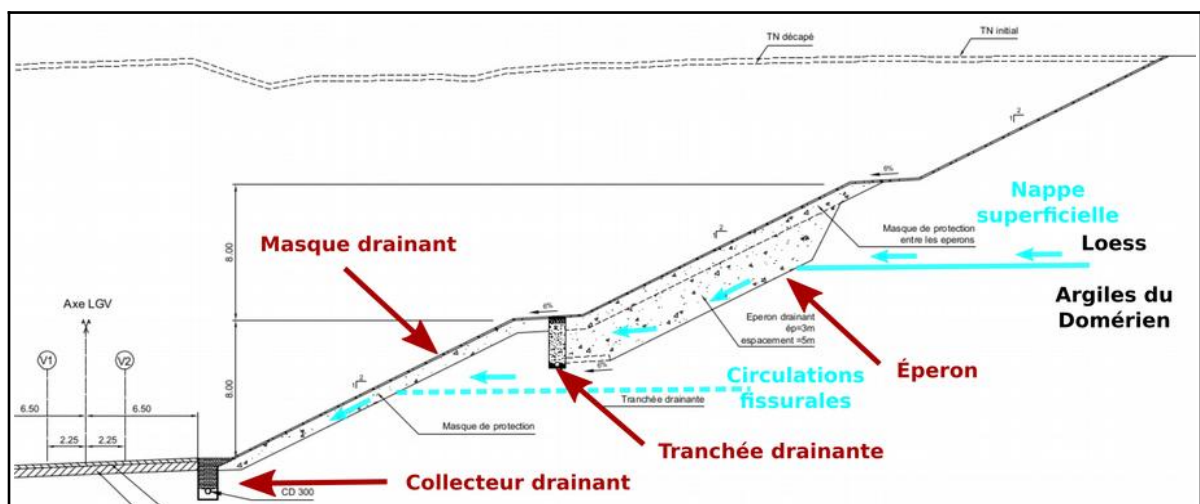


Figure 46 : profil en travers et dispositifs de drainage à l'issue de la phase PRO+

Dans cette conception, un masque drainant remplace les éperons drainants du talus inférieur qui ne pouvait capter les arrivées d'eau qu'au droit des discontinuités rencontrées. L'épaisseur du masque est de 0,75 m et il est quasi général sur toute la surface du talus. Le concepteur n'excluait de plus pas un renfort en éperons localisés si nécessaire.

Lors du chantier de construction, ces dispositions ont à nouveau évolué (figure ci-après).

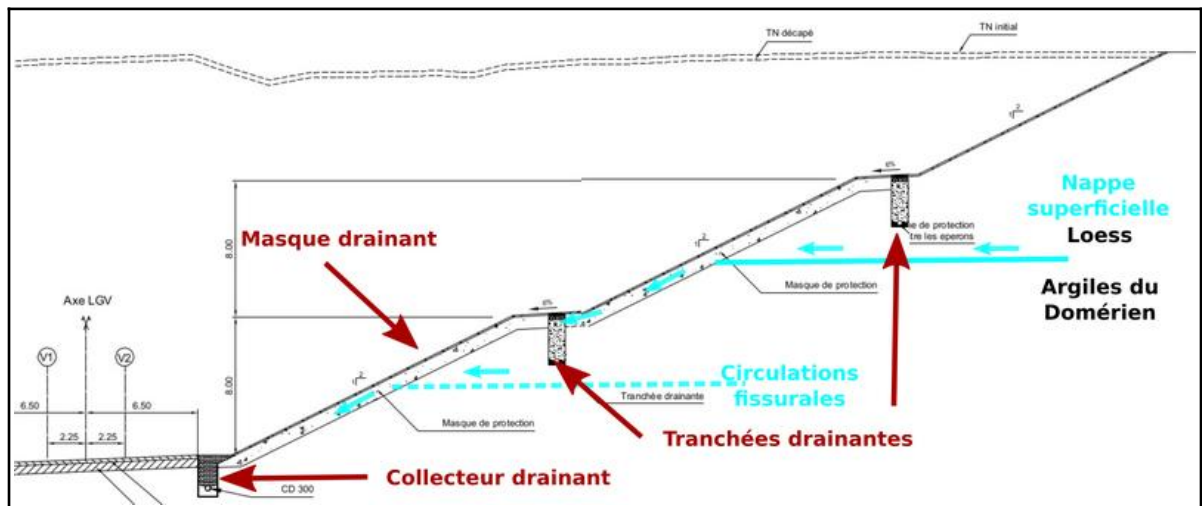


Figure 47 : profil en travers et dispositifs de drainage exécutés

Les éperons drainants ont été supprimés au profit d'une tranchée drainante longitudinale disposée sous la risberme supérieure. Il est à noter que dans cette conception finalement exécutée, l'interface loess / argiles située entre les risbermes supérieure et inférieure, où s'écoule la nappe superficielle, n'est plus drainée en profondeur. Le masque en surface du talus ne constitue pas un système de drainage interne au profil, et les tranchées drainantes, qui n'interceptent pas les circulations, non plus. Les terrains mieux drainés étant plus résistants, il en résulte une stabilité du talus moindre.

Nous en concluons que le système de drainage finalement retenu est peu efficace. Il n'assure pas un drainage en profondeur du talus. Il ne contribue pas à constituer un contrefort participant à la sécurité de la stabilité. Il n'apporte pas, par abaissement des quantités d'eau dans le talus, un surcroît de stabilité que l'on pourrait en attendre.

Ce point ne constituait a priori pas une difficulté lors des études. En effet, dans la mesure où la capacité de résistance des argiles était considérée comme correcte, la stabilité de l'ouvrage n'était pas en question.

Enfin nous notons que dans cette conception, tout défaut de fonctionnement du drain de la tranchée sous une risberme peut entraîner une réintroduction d'eau dans le talus et une imbibition du sol. Nous avons vu dans les résultats des inspections par caméra post-accident (voir § 4.3.3) que plusieurs défauts semblaient exister sur le réseau : flashes et seuils avec eau stagnante, ovalisation, poinçonnement... Si un défaut important était présent dans la partie effondrée (celle qui n'a pu être inspectée), il n'aurait pas manqué d'apporter une réintroduction d'eau supplémentaire dans le sol néfaste à la stabilité. Les constats sur le glissement lors de son terrassement n'ont cependant pas permis de statuer qu'une telle éventualité ait été avérée.

4.5 - L'évaluation de la stabilité lors des études

Nous présentons ci-après la démarche de vérification de la stabilité effectuée en conception, ainsi que les validations apportées par les différents acteurs tout au long du projet. Ces éléments sont assortis de nos analyses et commentaires.

4.5.1 - Les caractéristiques géomécaniques des sols

Les paramètres géomécaniques de vérification de la stabilité des talus ont été déduits des résultats de reconnaissances géotechniques réalisées avant et pendant la construction. Ces reconnaissances avaient, comme c'est toujours le cas dans un chantier de terrassement d'ouvrage linéaire, un double but :

- le premier but était de caractériser les sols par des essais d'identification, pour permettre notamment de définir les conditions de réemploi des matériaux du déblai pour la réalisation de remblais de la ligne ;
- le second but était de déterminer les paramètres de résistance mécanique des sols rencontrés pour effectuer le calcul de stabilité des talus en déblai.

Les campagnes ont consisté en des forages du terrain, avec prélèvement de matériau et réalisation d'essais en laboratoire (*sondages à la pelle mécanique, sondages à la tarière -vis sans fin-, carottages*)¹⁸ et en des mesures en place des caractéristiques mécaniques et hydriques (*sondages destructifs, essais pressiométriques, installation de piézomètres*). Le tableau ci-après récapitule les sondages réalisés selon les phases. La figure qui suit les localise (représentation uniquement de ceux qui sont antérieurs à la construction).

Phases d'avancement (§ 2.5.2)	Sondages réalisés	Numérotation
Avant-projet sommaire (APS)	➤ 1 carottage avec prélèvement d'échantillons et essais laboratoire	CA 014
Avant-projet détaillé (APD)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 4 sondages à la pelle mécanique ➤ 8 sondages à la tarière ➤ 2 sondages destructifs ➤ 2 forages pressiométriques ➤ 1 carottage avec prélèvement d'échantillons et essais laboratoire ➤ 5 dispositifs longitudinaux de mesure géophysique ➤ 5 dispositifs longitudinaux de mesure géophysique 	PM1/27 à 28 et PM2/33 à 34 ST1/43 à 45 et ST2/33 à 37 SD1/04 à 05 FP1/5955-1 et FP2/5955-1 SC1/11 DL1/25 à 29 DT1/30 à 32
Projet (PRO)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 2 sondages à la tarière ➤ 2 sondages au pénétromètre statique 	ST3/08 à 09 PE3/5955-1 à 2
Projet + (PRO+)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 1 sondage à la pelle mécanique ➤ 2 sondages à la tarière ➤ 4 sondages destructifs (piézomètre) 	PM6/110 ST6/112 et 122 SD4/820 à 823
Construction	➤ 94 sondages à la pelle mécanique	PM537.1 à 94

18 La détermination des caractéristiques mécaniques s'est effectuée par les essais en laboratoire suivants (à titre indicatif, les résultats donnés par d'autres essais peuvent être corrélés à ces essais) :

- **l'essai de cisaillement direct** (à la boîte de « Casagrande ») : l'échantillon de sol est contenu dans une boîte, elle-même composée de deux demi-boîtes, puis il est soumis à une contrainte verticale avant d'être cisailé à vitesse constante pour mesurer les paramètres.
- **l'essai triaxial** (voir nota 17) : l'essai peut être consolidé drainé (CD), le drainage s'effectuant au travers des platines au sommet et à la base de l'échantillon, ou consolidé non drainé avec mesure de la pression interstitielle (CU+u).

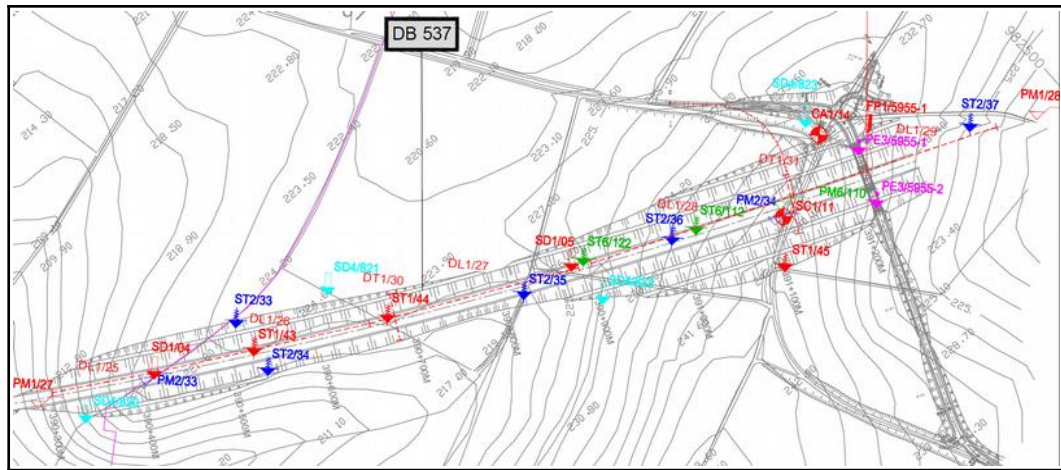


Figure 48 : localisation des sondages de sol des phases APS à PRO+
(chaque couleur correspond à une phase d'avancement du projet)

Les résultats géomécaniques obtenus au moyen de ces essais (coefficients c' et φ' évoqués en § 4.1) sont récapitulés dans les tableaux ci-après, tels qu'ils sont retranscrits dans le DOE.

Loess (O6)	Sondage	Type	Classe GTR	Prof. (m)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	φ' (°)
	SC1/11	Essai triaxial CD	A3	12,5 – 13,3	20,6	12	25
	PM2/33	Cisaillement direct	A2	2,50	-	21	28
	PM2/34	Cisaillement direct	A1/A2	2,70	-	16	30
Moyenne					20,6	16,3	27,6
Valeurs retenues pour le calcul de stabilité :					20,5	12	25

Argiles (L6)	Sondage	Type	Classe GTR	Prof. (m)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	φ' (°)
	SC1/11	Cisaillement direct	A3	20,50 – 21,28	20,38	10	32
	CA014	Essai triaxial Cu+U	A2	16,00 – 16,90	20,80	20	28,5
	CA014	Cisaillement direct	A2	21,95 – 22,40	20,50	35	33
Moyenne					20,56	21,67	31,16
Valeurs retenues pour le calcul de stabilité :					20,5	21	31

Nous observons que malgré le grand nombre de sondages globalement effectués, les essais utiles à l'évaluation des caractéristiques sont en réalité très peu nombreux. De plus, parmi ces essais, seul l'essai triaxial CU+u est considéré comme fiable pour l'évaluation de la stabilité à long terme. Il est unique dans le cas présent (effectué dans les argiles). Les essais de cisaillement direct, les plus nombreux, sont plus faciles à réaliser mais réputés moins précis. Dans ce type d'essai les conditions de drainage ne sont pas maîtrisées. Le drainage accroît l'angle de frottement interne de manière fictive, il est ainsi risqué d'en déduire les caractéristiques c' et φ' .

Il nous a été précisé par le maître d'œuvre que les valeurs retenues (en vert dans le tableau ci-dessus), ont été confortées par d'autres essais réalisés sur d'autres buttes de la ligne qui traversent les mêmes types de formation géologique. Cet argument est à relativiser, car les dénominations géologiques peuvent cacher des variations de propriétés des sols d'un lieu à l'autre. Toutefois, on observe que :

- > Les loess constituent l'essentiel des terrains de recouvrement sur le lot 43B. Sur le linéaire, 15 essais triaxiaux de type CU+u, 5 essais triaxiaux de type consolidé drainé et 14 essais de cisaillement direct ont été totalisés dans ce type de sol. Sur les

15 essais triaxiaux CU+u (les plus fiables), les résultats sont en moyenne moins optimistes en cohésion que les valeurs retenues pour le DB 537 ($c' = 6,91$ kPa en moyenne pour 12 kPa retenus en conception sur le DB 537), et un peu plus optimistes en angle de frottement interne ($\varphi' = 29,3^\circ$ en moyenne pour 25° retenu).

- Concernant les argiles du Domérien, la formation est rencontrée sur un total de trois buttes au début du lot 43B, à savoir les déblais DB 533, DB 535 et DB 537. Pour la reconnaissance des caractéristiques mécaniques, un seul essai triaxial de type CU+u et 4 essais de cisaillement direct ont été réalisés au total, qui sont pour l'essentiel ceux de la butte DB 537 vus ci-dessus. Dans cette formation la valeur de calcul retenue pour la cohésion est médiane ($c' = 21$ kPa), alors qu'il existe une disparité notable et interpellante des résultats des essais (c' allant de 10 à 35 kPa dans le tableau ci-dessus). L'angle de frottement interne retenu est aussi médian ($\varphi' = 31^\circ$), dans une disparité également notable (φ' allant de 25° à 33° dans l'ensemble des résultats).

Nous faisons ainsi le constat que les essais de cisaillement qualitatifs effectués lors de la construction sont peu nombreux pour un déblai de 1 230 m de linéaire, et particulièrement pour la connaissance des caractéristiques des argiles du Domérien. Pour la détermination de la résistance au cisaillement, seuls les essais triaxiaux font foi et ils sont insuffisants. Un seul essai triaxial CU+u, considéré comme le plus fiable, a été réalisé sur cette formation qui est critique vis-à-vis de la stabilité du talus.

L'apparente densité des sondages, visible en figure 48 et dans le tableau qui la précédait, masque en réalité un déficit d'essais spécialisés nécessaires à la justification de la stabilité de l'ouvrage. La densité des sondages a été orientée vers un autre objectif, celui de la détermination des conditions de réemploi des sols excavés, cet objectif supplantant celui de la connaissance des paramètres mécaniques de stabilité.

4.5.2 - La validation de la conception

Les principes de conception du déblai sont définis par le maître d'œuvre qui a établi le dossier PRO+. La conception détaillée de l'ouvrage est, elle, actée en étroite coordination entre l'entreprise et le maître d'œuvre à l'occasion des travaux. Pour ce faire, des échanges ont eu lieu entre ces deux intervenants lors de réunions « géotechniques » bimensuelles ayant fait l'objet de comptes rendus, et au travers de documents d'exécution, contrôlés et validés de façon croisée.

Le choix des caractéristiques géomécaniques n'a pas connu d'évolution lors de la construction, l'entreprise approuvant les dispositions préalablement actées par le maître d'œuvre. Seule la conception des ouvrages hydrauliques a évolué, comme nous l'avons vu au § 4.4, d'entente entre les deux intervenants.

Le dossier de conception PRO+ avait auparavant fait l'objet d'une analyse critique puis d'une approbation formelle, opérations de contrôle appréciables en soi pour renforcer la qualité et la sécurité. Ces opérations impliquaient deux acteurs : l'assistant technique à maîtrise d'ouvrage (AMO) missionné notamment pour contrôler le respect des référentiels techniques et réglementaires de conception, et la maîtrise d'ouvrage (MOA) qui approuvait formellement.

L'assistant au maître d'ouvrage, doté de compétence en mécanique des sols, a effectué une analyse approfondie du PRO+ en 2009. Dans ces avis, il notait le caractère approximatif du choix des caractéristiques, sans que cela ne se traduise toutefois en résultat, et ne conduise à remettre en question la consistance des reconnaissances en essais spécialisés. L'AMO pointait aussi que d'une manière générale la campagne de sondage du lot 43B permettait de disposer de données sensiblement plus exhaustives sur le lot 43B que sur les autres lots du tronçon H. « *Dans ce contexte, les hypothèses géotechniques retenues pour le lot 43B peuvent être jugées plus prudentes que celles*

des autres lots (45, 47, 43A) [...] » concluait-il, renforçant peut-être malgré lui un sentiment de sécurité sur le choix des caractéristiques géomécaniques qui n'avait pas lieu d'être pour le déblai DB 537.

L'assistant au maître d'ouvrage n'a toutefois pas examiné en détail la conception du DB 537, considérant que les études géotechniques seraient complétées lors des études plus détaillées, en phase ultérieure d'exécution. Le maître d'ouvrage a approuvé formellement le PRO+. Nous avons vu que les principes de conception géotechniques arrêtés à ce stade n'ont pas été remis en question ultérieurement. L'assistant au maître d'ouvrage n'est par ailleurs pas intervenu sur le DB 537 en cours de construction pour examiner les documents de conception, n'étant pas missionné à cette fin.

Il apparaît donc que diverses interventions de contrôle et de validation ont fait suite à la conception initiale du maître d'œuvre. Il s'agit de l'entreprise, de l'assistant au maître d'ouvrage (dans une moindre mesure), et du maître d'ouvrage (intervention à caractère essentiellement formel). Ils n'ont pas joué le rôle de boucle de rattrapage qui était permise par leur intervention.

Les investigations du BEA-TT n'ont pas exploré plus avant ce sujet, le présent rapport d'enquête technique n'ayant pas pour objet de déterminer des fautes ou responsabilités.

4.5.3 - Le point de vue réglementaire sur la consistance de la campagne géotechnique

Le « Référentiel Technique pour la réalisation des LGV – Partie génie civil » définit les exigences du gestionnaire d'infrastructure pour la conception des ouvrages de génie civil des lignes ferroviaires à grande vitesse. Il précise dans son tome II « LGV Voyageurs - Ouvrages en terre », et plus particulièrement dans son article 2.1.2.1, les exigences particulières relatives au choix des paramètres géotechniques de vérification de la stabilité.

Ces vérifications doivent être effectuées en utilisant des « valeurs moyennes prudentes des paramètres géotechniques », et le choix des valeurs des paramètres « doit tenir compte des informations disponibles sur leur variation dans l'espace (connaissance du modèle géologique et géotechnique), mais aussi de la représentativité des prélèvements et essais ainsi que de la signification de l'essai réalisé sur l'échantillon en tenant compte de son possible remaniement ».

Le texte renvoie pour plus de précision à l'Eurocode 7 (NF EN 1997-1 et NF EN 1997-2), texte de portée européenne sur le calcul géotechnique des ouvrages de génie civil.

Ce dernier texte définit principalement des exigences de haut niveau, insistant sur l'étendue des problématiques à considérer par les hommes et femmes de l'art de la conception. Il dit ainsi que « les emplacements des sondages de reconnaissance et leurs profondeurs doivent être choisis en tenant compte des reconnaissances préliminaires et en fonction des conditions géologiques, des dimensions de l'ouvrage et des problèmes d'ingénierie rencontrés », sans donner de descriptif plus détaillé.

La partie 2 du texte (NF EN 1997-2), traitant des « reconnaissances des terrains et essais », donne toutefois des indications dans son annexe P.1 sur la consistance des « essais de résistance des sols » par « essais de compression triaxiale » en vue de la détermination de la résistance au cisaillement non drainé. **Six essais** de compression triaxiale sont recommandés dans le cas où l'on ne dispose d'aucune expérience du sol préalable comparable et lorsque le rapport des valeurs maximale et minimale mesurées est supérieur à 2, ce qui est bien le cas ici (mesure de la cohésion c' entre 10 et 35 kPa). Un essai signifie un ensemble de trois éprouvettes testées à des pressions différentes.

La consistance des essais avec un seul essai de compression triaxiale non drainé dans les argiles du Domérien était donc en deçà des recommandations de l'Eurocode 7. Notons que le texte précise que l'annexe « sert pour vérifier si le nombre d'essais est suffisant », mais elle est classée comme informative et non normative.

Dans le prolongement et à titre de comparaison, la quantité des investigations à réaliser est également cadrée dans un document publié en mai 2016 (donc postérieurement aux travaux) par l'Union Syndicale Géotechnique (SYNTEC-INGENIERIE) sur « les recommandations sur la consistance des investigations géotechniques pour les études géotechniques de conception (G2) ». Ce document recommande pour la justification de la stabilité d'ouvrages linéaires de ligne ferroviaire d'adopter un programme minimal d'une reconnaissance tous les 100 mètres linéaires d'ouvrage. Ceci conduit, concernant les essais de cisaillement nécessaires à la vérification de la stabilité, à des investigations plus développées que celles réalisées (2 sondages employés dans notre cas pour un ouvrage de 500 m dans sa partie de grande hauteur).

4.6 - Les désordres survenus en cours de travaux

Après les études, lorsque le chantier de construction a démarré, quatre glissements de talus se sont produits. Ces glissements sont localisés sur la figure ci-dessous. Ils sont survenus à des distances du glissement de mars 2020 inférieures à 250 mètres. L'un des glissements, survenu en mars 2012, lui est contigu. Nous reprenons dans le tableau qui suit une description succincte de chacun des événements.

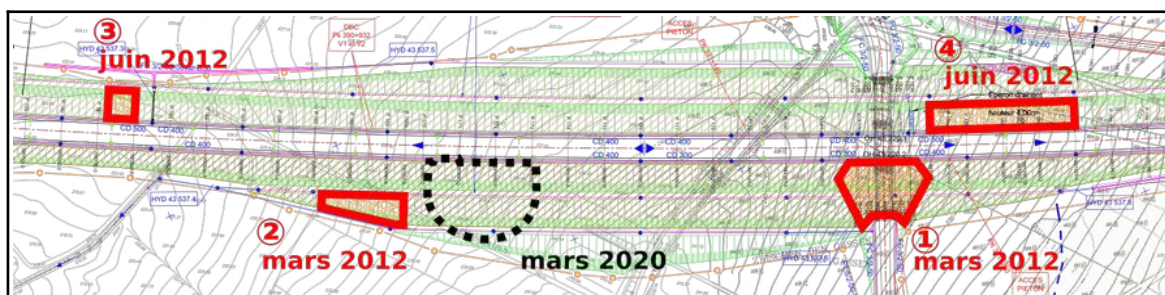


Figure 49 : localisation des glissements survenus en cours de travaux

1^{er} glissement : mars 2012
 au PK 391,190, côté voie V2
 (à 165 m du glissement de mars 2020)

Cet éboulement s'est produit lors des fouilles de réalisation de la culée de l'ouvrage d'art de la RD 67. Il concernait un talus provisoirement raidi à 3/2 et creusé dans le terrain loessique. Il n'est, contrairement aux désordres qui suivront, pas représentatif de ce qui s'est passé en mars 2020.

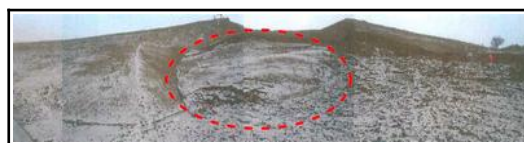


Figure 50 : 1^{er} glissement

2^e glissement : mars 2012

au PK 390,950, côté voie V2
(glissement contigu à celui de mars 2020)

Le glissement s'est produit alors que le niveau des terrassements atteignait la risberme inférieure (hauteur 17 m). Sa largeur était d'une vingtaine de mètres et sa hauteur d'environ 5 m.

Le glissement s'est renouvelé en juin 2012 alors que l'éboulement précédent était en cours de décaissement en vue de son confortement (photo ci-contre du bas), sur une vingtaine de mètres du côté est.

La zone a finalement été confortée par un masque poids d'une longueur de 45 m.

Ces glissements se sont produits alors que la tranchée drainante de la risberme inférieure n'était pas terminée (exutoire non finalisé).



Figure 51 : 2^e glissement

3^e glissement : juin 2012

au PK 390,800, côté voie V1.
(à 165 m du glissement de mars 2020)

Le glissement de 15 mètres de large s'est déclenché suivant un plan parallèle au talus (à une profondeur de 1 m environ) dans une zone où le talus fait 8 m de hauteur.

Lors de la réalisation du masque poids, un nouvel affaissement a été constaté au niveau du drain longitudinal de la risberme en partie haute du talus.

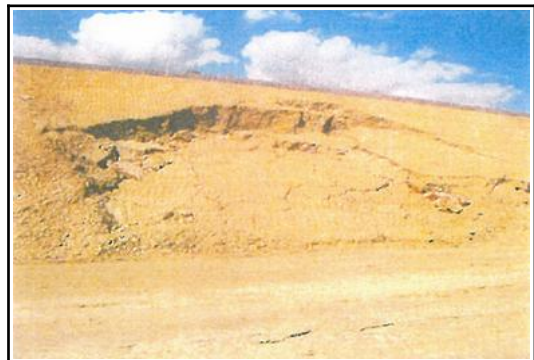


Figure 52 : 3^e glissement

4^e glissement : juin 2012

au PK 391,240, côté voie V1.
(à 215 m du glissement de mars 2020)

Le glissement, en deux phases successives, est survenu sur une longueur de 80 m et une hauteur de 5 m à l'interface limon – argiles.

La figure ci-contre montre la fissure en crête du glissement.



Figure 53 : 4^e glissement

Ces trois derniers glissements ont concerné le talus avec sa forme de pente définitive et sur une hauteur englobant les deux formations de loess et d'argiles du Domérien. Ils témoignaient d'une faiblesse de stabilité des terrains.

L'analyse de ces glissements par l'entreprise et le maître d'œuvre, les a conduits à intuitivement réévaluer à la baisse les caractéristiques mécaniques de résistance au cisaillement du toit des argiles sur une épaisseur d'environ 3 à 4 mètres, cette couche étant estimée comme moins résistante. La valeur de la cohésion (c') de 21 kPa a été abaissée à une valeur de 0 à 1,5 kPa sur cette épaisseur. Le coefficient de sécurité de la stabilité du talus calculé en résultant avoisinait alors 1, corroborant l'instabilité de glissement. Un confortement des talus par un masque poids de plusieurs mètres d'épaisseur a alors été décidé et réalisé au droit des seules zones glissées permettant de retrouver une stabilité acceptable de ces zones (voir figure ci-dessous).



Figure 54 : masque poids du 2^e glissement en coupe lors du terrassement

Au-delà des quatre effondrements accidentels décrits ci-dessus, le constat de venue d'eau à l'interface loess - argiles lors des travaux a conduit à réaliser des éperons drainants complémentaires aux PK 391,230 et 390,665, côté voie 1. D'autres venues d'eau ont été constatées, notamment lors de la réception des terrassements, mais n'ont pas fait l'objet de suite particulière. Le masque drainant a été jugé, par les intervenants, suffisant pour régler les effets à terme. Nous remarquons que ces constats se sont faits dans la saison des travaux qui est plutôt sèche, minimisant ainsi les difficultés qui se poseraient à terme lors de la montée en charge hydraulique des nappes.

Concernant les suites données aux glissements vus plus haut, leur analyse a, à notre sens, été sommaire. Au premier rang des facteurs envisagés figure la mauvaise résistance de la couche du toit des argiles. Il en a résulté une modification de caractéristiques géomécaniques de calcul de cette couche qui ne provient d'aucune mesure physique. Les calculs et renforcements ont été appliqués localement aux zones éboulées, alors qu'étonnamment la couche posant difficulté concernait assez généralement l'ensemble du déblai. L'analyse réalisée n'a conduit ni à une réinterrogation plus globale du choix des caractéristiques mécaniques de résistance des terrains dont la reconnaissance initiale était faible, ni à des compléments de reconnaissance. Par cette analyse sommaire, les acteurs du projet se sont privés d'explorer les causes plus profondes de l'insuffisance de la stabilité ce qui aurait pu les conduire à remettre en question les hypothèses de dimensionnement et la conception du déblai.

L'analyse et les mesures prises suite aux effondrements du déblai DB 537 ont été retranscrites dans des fiches de modification ou d'adaptation soumises à examen de l'assistant à maîtrise d'ouvrage (AMO) et à approbation du maître d'ouvrage. Le maître d'ouvrage nous a semblé d'une manière générale très interventionniste sur ces aspects, remettant en question les choix de l'entreprise et du maître d'œuvre. C'est la perception que nous pouvons avoir de l'analyse globale des documents étudiés comportant son avis. Ces interventions de fond sont en soi un point d'ailleurs plutôt positif.

Les fiches de modification et d'adaptation consécutives aux effondrements du déblai DB 537 ont été proposées tardivement par le maître d'œuvre, en juillet 2013 soit un an après la construction. Le maître d'ouvrage les a validés, mais dans ce contexte tardif, peu propice aux remises en question. Lui-même et son assistant n'ont ainsi pas été complètement en mesure de jouer le rôle de boucle de rattrapage permise par leur intervention.

À l'occasion de la reprise en maintenance, le gestionnaire d'infrastructure a classé l'ouvrage comme « sensible », en raison notamment de ces incidents, indiquant la conscience d'un certain risque.

Il apparaît en conclusion que plusieurs signes d'alerte ont eu lieu lors de la construction, mais qu'ils ont été sous-exploités, conduisant à ne pas réinterroger les hypothèses de dimensionnement.

4.7 - Les enseignements de la surveillance du déblai

L'achèvement des travaux ne s'est pas traduit par des prescriptions particulières transmises au gestionnaire d'infrastructure concernant des aspects notables à surveiller sur les talus. Dès lors l'ouvrage a été soumis au plan de maintenance commun aux ouvrages en terre du gestionnaire d'infrastructure.

Pour être plus précis, un document émis par le maître d'œuvre stipulerait qu'un suivi piézométrique du déblai DB 537 était à assurer. Cette préconisation n'est toutefois assortie d'aucune précision (modalité, exploitation à faire, seuils d'alerte...) et ne semble pas vraiment traduisible en terme opérationnel en exploitation.

La LGV EE, comme les autres LGV, fait l'objet d'une surveillance soutenue eu égard au risque particulier que représente la grande vitesse. De nombreuses tournées, réalisées par des agents ou par des engins, sont organisées selon des cycles définis pour inspecter la voie et ses abords. Chacune de ces tournées est l'occasion de répertorier les anomalies ou les désordres qui peuvent être précurseurs d'un danger pour les circulations. Ces contrôles constituent ce que le gestionnaire d'infrastructure nomme la « surveillance systématique ».

L'annexe 7 présente en détail les opérations directement ou indirectement en relation avec la surveillance des talus prévues dans le plan de maintenance. Elle synthétise les enseignements sur chaque périmètre d'opération.

Le déblai DB 537 était classé comme « ouvrage en terre sensible », catégorie d'ouvrage présentant un risque de détérioration, risque ayant des conséquences pour l'exploitation. La raison de ce classement était la préexistence de désordres sur les talus survenus au cours de la construction (voir § 4.6), et l'apparition de désordres sur la plateforme en exploitation (gonflement de celle-ci décrit au paragraphe « géométrie de la voie » de l'annexe 7).

Chacune des opérations a fait l'objet d'un compte rendu formalisé et tracé dans un outil de gestion de la maintenance assistée par ordinateur (GMAO) du gestionnaire d'infrastructure. Les tournées de surveillance sont consistantes et ont été correctement conduites. Le BEA-TT a examiné l'ensemble des comptes rendus produits. Il apparaît au global que la surveillance n'a conduit à aucune détection de signe avant-coureur du glissement du talus.

Une mise en relation pourrait aujourd'hui être envisagée entre le gonflement de la fondation de la plateforme et la rupture différée du talus : ces deux phénomènes pourraient, en première approche, être une conséquence du comportement évolutif dans le temps des argiles (décompression de déconsolidation avec augmentation des

pressions interstitielles qui sera explicitée au § 4.8.2 pour la rupture différée) ; mais un lien éventuel entre les deux phénomènes ne pouvait être fait avant l'accident.

À noter que, sur un tout autre registre, deux jours avant l'accident, le 3 mars 2020, le TGV d'inspection rapide à 320 km/h de la voie, IRIS 320, est passé sur la voie 2. La rame est dotée d'une caméra frontale. L'image vidéo enregistrée ne laisse voir aucun signe avant-coureur de glissement, comme on peut le deviner sur la figure suivante, où l'on perçoit la continuité du chemin de câble latéral en pied de talus, ainsi que celle de la risberme inférieure.



Figure 55 : image vidéo d'IRIS 320 en voie 2, le 3 mars 2020 dans la zone de glissement

4.8 - L'interprétation des causes du glissement

4.8.1 - La stabilité à long terme du glissement

Le modèle du talus d'origine choisi par le maître d'œuvre prenait en compte les paramètres géomécaniques suivant : $c' = 21$ kPa et $\varphi' = 31^\circ$ dans les argiles et $c' = 12$ kPa et $\varphi' = 25^\circ$ dans les loess.

Nous donnons sur la figure ci-après (à gauche) le résultat du calcul de stabilité obtenu en prenant en compte les coefficients ci-dessus. Le calcul a été effectué en propre par le BEA-TT au moyen du logiciel STB 2010¹⁹. Le coefficient de sécurité calculé est $F = 1,54$, semblable au résultat obtenu par le maître d'œuvre en conception. Ce coefficient de sécurité est supérieur à 1,5, ce qui justifiait la stabilité à long terme de l'ouvrage en conception.

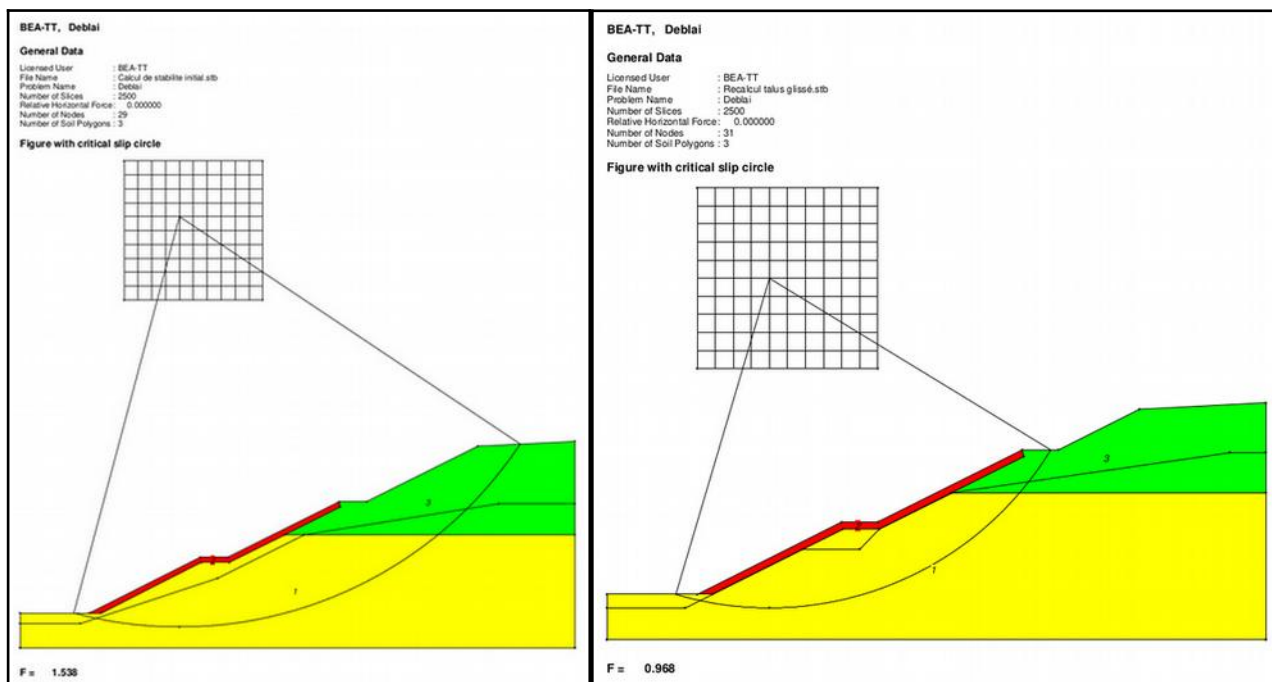
Les reconnaissances de sol effectuées post-accident conduisent aux paramètres géomécaniques suivant : $c' = 7$ kPa et $\varphi' = 24^\circ$ dans les argiles et les loess.

Nous donnons sur la figure en vis-à-vis (à droite) le résultat du recalcul avec ces valeurs (et une hypothèse de profil hydraulique plus conforme à la réalité du drainage). Le coefficient de sécurité calculé est de $F = 0,968$.

¹⁹ STB est un programme d'analyse de la stabilité d'une pente, utilisant la méthode simplifiée de Bishop, développé par l'Université de Delft aux Pays-Bas. Il présente l'intérêt d'être un logiciel libre de toute licence accessible à l'adresse suivante : <http://geo.verruijt.net>

Ce coefficient de sécurité proche de 1 est très inférieur au 1,5 exigé, traduisant l'insuffisance de stabilité à long terme de l'ouvrage.

Il est à noter que même avec un choix de caractéristiques légèrement meilleur, le coefficient de sécurité de 1,5 exigé serait loin d'être atteint.



Calcul en conception

Recalcul post-accident

Figure 56 : édition en sortie des calculs de stabilité
(chaque schéma donne la position du centre du cercle de rupture potentielle calculé, et la valeur minimale du coefficient de sécurité obtenue)

4.8.2 - L'évolution de la stabilité au cours du temps

Le paragraphe précédent nous permet de conclure que le talus n'avait pas la stabilité requise sur le long terme. Le terme a dans notre cas été de sept années, temps écoulé entre la construction du talus et l'accident. Pourquoi un tel délai ?

Deux raisons évoquées par les experts intervenus ont pu jouer :

- La première raison, développée par les experts du gestionnaire d'infrastructure, est que les pressions de l'eau dans les argiles sont lentement passées des valeurs produites par la déformation des sols pendant les travaux à un régime établi. Le passage des conditions de « court terme » aux conditions à « long terme » dans les sols fins peut prendre de nombreuses années.

Le comportement d'un sol fin saturé en eau dépend du taux de migration de l'eau interstitielle qui s'étale dans le temps²⁰. Pour les argiles du Domérien, entre leur déchargement initial lors de la construction et l'état d'équilibre final, il s'est produit une

²⁰ Dans un sol sableux, perméable, l'eau s'évacue vite et cela prend quelques secondes. S'il s'agit d'argiles, peu perméables, la migration de l'eau s'étend sur un temps long, parfois de plusieurs dizaines d'années. La vitesse de migration est fonction de la perméabilité et de la distance sur laquelle l'eau doit migrer pour que se rééquilibre la « pression interstitielle ». Ce phénomène est à l'origine de déformations et d'états de contrainte différés dans le temps. Les sols argileux sont ainsi connus pour être le siège de déformations de « consolidation » qui peuvent s'étaler sur une longue durée. Le basculement de la Tour de Pise en est un exemple célèbre. Lorsque le sol est déchargé ou excavé, ces phénomènes sont à l'inverse des « déconsolidations » avec génération de gonflements.

migration de l'eau avec un équilibre des pressions interstitielles. En phase initiale de terrassement, les pressions interstitielles sont faibles, négatives. Cet état améliore la stabilité du talus. Puis, plus l'eau migre, plus la pression interstitielle augmente, et plus l'effet de stabilisation provisoire disparaît. L'état évolue au cours du temps d'une stabilité apparente et précaire vers l'instabilité intrinsèque, par déconsolidation progressive des argiles. La rupture ne se produit pas dès la réalisation du chantier mais de façon différée dans le temps.

Cette sensibilité des argiles à la migration d'eau dans le temps a pu être observée selon un autre effet résultant, qui corrobore indirectement l'analyse, à savoir le gonflement de la plateforme par déconsolidation des argiles dans les zones où la plateforme est assise sur cette formation (après le PK 391,100, voir annexe 7 en figure 60).

- Une seconde raison (du caractère différé) pourrait être des apports d'eau exceptionnels dans les argiles à la faveur de l'épisode très pluvieux de février 2020. L'humidité du terrain a pu être localement accentuée avec hypothétiquement des mises en charge plus importantes dans le terrain.

Les experts du maître d'œuvre privilégient cette hypothèse car selon eux la formation argileuse pourrait présenter une certaine fracturation due à une zone de dislocation tectonique, à l'origine d'une fragilisation du terrain (résistance dégradée) et d'un comportement hydrogéologique singulier (circulations susceptibles de se mettre en charge).

Dans le premier cas, le caractère différé de l'effondrement proviendrait de ce que le terrain aurait bénéficié de conditions de « court terme » plus favorables que les conditions de « long terme » dont nous avons identifié qu'elles étaient insuffisantes (cf. § 4.8.1). Dans le second cas, il proviendrait de l'occurrence d'une sollicitation du sol portée à un maximum jamais connu par une pluviométrie exceptionnelle, dans le même contexte de sol qui présentait des caractéristiques de résistance insuffisantes.

Ces deux explications ne sont pas de nature à modifier la compréhension de la raison principale de l'effondrement qui est la faiblesse des caractéristiques mécaniques des argiles à long terme. Elles n'ont pas été explorées plus avant par le BEA-TT.

4.8.3 - Les résultats de l'interférométrie radar

Le gestionnaire d'infrastructure a confié à la société TRE Altamira²¹ une étude « d'interférométrie » pour analyser a posteriori du glissement du 5 mars 2020 l'éventualité de mouvements précurseurs du talus. Cette société est spécialisée dans la mesure du mouvement des sols et des structures depuis l'espace. Les variations de distance entre satellite et objets observés, lors de survols successifs de satellite, sont suffisantes pour déterminer les instabilités de surface lentes des sols qui peuvent affecter les constructions de génie civil.

La méthode a consisté à réanalyser les évolutions des images satellites depuis janvier 2017. Les points de mesure au sol sont permanents (notés PS, comme un poteau caténaire) ou distribués (notés DS, comme une surface herbeuse).

L'exploitation des relevés permet d'identifier une zone côté V2 dans le secteur de l'accident qui aurait subi un mouvement général de glissement à partir de janvier 2018 avec une accélération entre juin et décembre 2019 (voir figure ci-après).

21 La société TRE Altamira est une filiale du groupe Collecte localisation satellite (CLS), lui-même filiale du Centre national d'études spatiales (CNES).

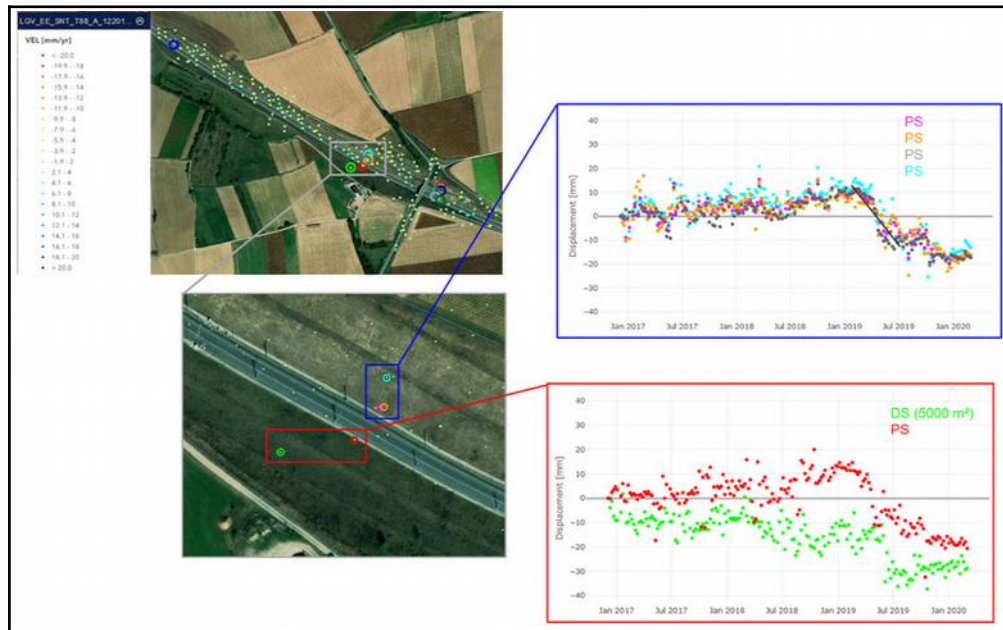


Figure 57 : graphes de points donnant l'évolution des déplacements au cours du temps dans la zone du glissement
(l'échelle des déplacements mesurés est de quelques dizaines de millimètres)

Côté V1, quatre cibles ponctuelles présentent un mouvement brutal d'affaissement de janvier à juillet 2019 puis à nouveau entre septembre et décembre 2019, laissant augurer de l'existence d'un risque en cours d'instabilité de ce talus. Des constats similaires ont également pu être faits sur un autre déblai de la ligne, le DB 533 de Littenheim.

Cette étude montre que le fluage de glissement du talus semblait à l'œuvre avant l'accident même si celui-ci n'a pas été détecté lors des tournées. L'étude présentée ici n'avait pas été envisagée par le gestionnaire d'infrastructure antérieurement à l'accident sur ce site, mais elle met en évidence des perspectives très intéressantes pour l'évolution des méthodes de surveillance et d'alerte sur les risques de glissement des talus.

4.8.4 - Conclusion sur la cause du glissement

La cause du glissement est que le talus du déblai DB 537 n'était pas stable à long terme. Les paramètres de résistance au cisaillement des argiles du Domérien ont été surestimés lors de la conception.

Plusieurs glissements précurseurs se sont produits lors de la construction. Ils ont donné lieu à des renforts localisés mais ont été insuffisamment analysés pour s'assurer de la pertinence des hypothèses de dimensionnement.

À l'issue du terrassement, le déblai était en stabilité précaire qui n'a pas duré à la faveur d'un comportement évolutif dans le temps des argiles ou d'apports d'eau exceptionnels lors de l'épisode très pluvieux de février 2020.

Il est probable que de faibles mouvements (fissures en tête, bombement en pied) aient eu lieu dans les semaines qui ont précédé l'accident. Ils sembleraient être mis en évidence par les analyses par interférométrie radar, mais n'ont pas été décelés visuellement lors des tournées d'inspection sur les abords et la plateforme.

4.9 - Le retour d'expérience national des déraillements sur ligne à grande vitesse

La grande vitesse ferroviaire est un des modes de transport les plus sûrs. En France, la sécurité du système TGV est exceptionnelle comme en attestent les chiffres. Aucun décès lié à une exploitation commerciale n'est à déplorer depuis le démarrage du service à grande vitesse en septembre 1981.

En quarante ans, le TGV a connu quatre déraillements sur ligne à grande vitesse. Ceux-ci sont récapitulés dans le tableau ci-après.

14 décembre 1992 à 7 h 30

Le TGV 920 Annecy-Paris déraille à 270 km/h, au passage de la gare de « Mâcon-Loché TGV » dans le département de la Saône-et-Loire.

Aucune personne n'est blessée dans le train. Vingt-cinq personnes qui attendaient sur le quai de la gare TGV sont légèrement blessées par des projections de ballast.

La cause du déraillement est d'origine matérielle. Les roues du bogie entre les remorques 3 et 4 se sont bloquées par suite de la défaillance d'un composant électronique. Le relâchement d'un freinage opéré plus tôt ne s'est pas réalisé sur le bogie défectueux. L'usure très importante des roues bloquées et la surchauffe en résultant ont conduit au déraillement au franchissement des aiguillages à l'entrée de la gare.

21 décembre 1993 à 7 h 06

Le TGV 7150 Valenciennes-Paris déraille à 294 km/h à hauteur de la commune Ablaincourt-Pressoir dans le département de la Somme. Quatre bogies des remorques dérailent vers l'extérieur de la voie mais restent dans l'axe de la voie.

L'accident a fait deux blessés légers sur les 200 occupants du train.

La cause du déraillement est un affaissement de la plate-forme de la voie lié au développement d'une cavité de type fontis, prenant possiblement son origine dans une ancienne galerie construite lors de la Première Guerre mondiale. Douze traverses étaient dans le vide.

Des limitations de vitesse des circulations ont été imposées sur ligne jusqu'au traitement complet du risque par injection de confortement.

Jeudi 16 août 2001, un nouveau fontis a été découvert sous voie sur la ligne et a donné lieu à l'organisation de nouvelles limitations temporaires de vitesse et d'une nouvelle campagne de traitement, sans accident toutefois.



5 juin 2000 à 17 h 54

L'Eurostar 9047 Paris-Londres déraile à 290 km/h près de la bifurcation de Croisilles dans le département du Pas-de-Calais. Quatre bogies sortent des rails. Le train partiellement déraillé s'immobilise 1500 m plus loin, causant des dommages à la voie.

Sur les 501 passagers, une dizaine furent légèrement commotionnés.

La cause du déraillement est d'origine matérielle. Une bielle de réaction du bogie arrière de la motrice de tête s'est détachée du châssis du bogie, entraînant par la suite des chocs avec la voie et le déraillement.



14 novembre 2015 à 15 h 04

Lors d'un essai s'effectuant à grande vitesse sans signalisation ferroviaire dans le cadre de l'homologation de la deuxième partie de la Ligne Est-Européenne, la rame d'essai déraile à 255 km/h à hauteur de 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 ; la motrice de queue tombe dans un canal.

Pour les 53 personnes qui se trouvaient à bord, le bilan des victimes est de 11 morts et de 21 blessés graves (il ne s'agissait pas d'une exploitation en service commercial). La rame TGV est entièrement détruite. Le pont-rail de franchissement du canal est fortement endommagé.

La cause directe de l'accident est la vitesse excessive du train dans une courbe serrée. Cet excès de vitesse est dû à un freinage trop tardif avant d'aborder la courbe.



Ainsi, sur ces quatre accidents de déraillement de TGV en pleine vitesse en France, deux ont une origine liée au matériel roulant. L'un est lié à une problématique spécifique d'essai hors circulation commerciale. Enfin, l'accident du 21 décembre 1993 a une cause origine liée à l'intégrité de l'infrastructure et, comme pour le cas de l'accident du 5 mars 2020, interroge sur la surveillance et le suivi des ouvrages en ligne.

Dans les trois accidents ayant eu lieu sous exploitation commerciale, l'architecture articulée de la rame a été reconnue pour sa capacité à maintenir la stabilité et l'intégrité du train jusqu'à l'arrêt, capacité confirmée par le déraillement du 5 mars 2020.

4.10 - Le retour d'expérience national sur les incidents d'ouvrage en terre

Chaque année, un bilan complet des incidents sur ouvrages en terre (et ouvrages hydrauliques) est établi par le gestionnaire d'infrastructure du réseau ferré national, SNCF Réseau.

Globalement sur le territoire, environ 300 incidents affectent le réseau par an. Un tiers sont graves, c'est-à-dire avec des conséquences sur les circulations. Le tableau ci-dessous, issu du bilan 2019, donne le détail de leur répartition par type.

Période	Répartition par famille d'événements : incidents graves / peu graves (total)							Total
	Eboulement ou chutes de blocs	Coulée ou inondation	Glissement en déblai	Désordre affectant le support de la voie	Désordre hydraulique avec perte du support de la voie	Fontis	Autre (pour mention)	
Moyenne 1998-2019	24 / 81 (105)	16 / 35 (51)	14 / 46 (60)	7 / 18 (25)	9 / 8 (17)	14 / 27 (41)	1 / 2 (2)	84 / 217 (301)
2019	11 / 74 (85)	16 / 28 (44)	12 / 24 (36)	6 / 12 (18)	4 / 1 (5)	11 / 32 (43)	0 / 0 (0)	60 / 171 (231)

Les incidents de glissement en déblai représentent une part de 20 %.

Depuis 1998, les incidents sur LGV représentent 7,3 % du total des incidents, ce qui correspond à peu près à la fraction de linéaire de ce type de ligne. En revanche, les incidents graves sur LGV ne représentent que 1,4 % du total des incidents graves. Il y a eu au total 25 incidents graves sur LGV, soit une moyenne de un par an. Un seul s'est produit dans les trois dernières années, en 2018, sur la LGV Méditerranée, avec un léger affaissement de la voie en remblai entraînant une limitation de vitesse.

La nature de l'accident du 5 mars 2020 à Ingenheim est par son ampleur et ses conséquences particulièrement rare.

4.11 - Les actions mises en œuvre postérieurement à l'accident

Dès l'accident, le gestionnaire d'infrastructure a mis en œuvre plusieurs actions visant à remettre en service la ligne avec la garantie de retrouver un haut niveau de sécurité. Ces actions sont chronologiquement les suivantes :

- > Mars 2020 : Désignation d'un comité d'experts techniques dans le domaine de la géotechnique.

Le comité a aidé le gestionnaire d'infrastructure à comprendre les causes de l'accident et à la prise de décisions pour traiter le risque de récurrence sur le déblai accidenté et les déblais voisins (certains résultats de l'expertise sont relatés dans le présent rapport).

- > Avril à mai 2020 : Travaux de confortement de la zone glissée.

Ces travaux ont permis de reconstituer le talus dans sa géométrie initiale, en substituant les matériaux par des matériaux de meilleures caractéristiques géomécaniques et par réalisation d'une « bêche d'ancrage » en pied de talus. Le coefficient de sécurité de stabilité atteint est de 1,5.



Figure 58 : vue du talus reconstruit

- Juin à août 2020 : Réalisation d'un programme d'investigations complémentaires permettant d'appuyer les expertises et de valider définitivement les travaux (une partie des résultats de ces investigations sont restitués dans le présent rapport en partie 4.3).
- Septembre 2020 : Implantation d'un système de surveillance de la tenue des talus par capteurs d'inclinaison, capable de déclencher une alerte en temps réel en cas de mouvement.

Ce suivi a été mis en place sur 4 déblais, dont le DB 537. Il délivre une alarme à l'agent-circulation avec ordre d'arrêt du train en cas de mouvement détecté, situation qui ne s'est pas avérée à la date de parution du rapport.

- 27 septembre 2020 : Après remise en état de la voie, reprise des circulations commerciales sur la section de ligne sous le régime d'une limitation temporaire de vitesse (LTV) à 80 km/h sur la zone surveillée.
- À partir de septembre 2020 : Étude d'un projet de confortement définitif des déblais à risque, puis réalisation à partir d'avril 2021, pour lever les mesures restrictives temporaires (système de surveillance, limitation de vitesse).

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

Jeudi 5 mars 2020 à 7 h 20, le TGV 2350 en provenance de Colmar et à destination de Paris-Est quitte la gare de Strasbourg. À 7 h 27, il dépasse la gare de Vendenheim et s'engage sur la LGV Est Européenne sur la voie 2. Il est le cinquième TGV à passer sur la voie depuis le matin. Le précédent TGV est passé 32 minutes auparavant dans des conditions normales.

À 7 h 32, alors que le TGV 2350 monte en vitesse et qu'il aborde un point haut du profil dans une courbe à droite au passage du déblai DB 537 à Duntzenheim, le conducteur aperçoit devant lui, à 200 mètres compte-tenu de la visibilité, un dépôt de terre sur la voie.

Ce dépôt provient d'un glissement de très grande ampleur touchant le talus adjacent à la voie. Le glissement s'est produit dans la demi-heure précédente. La longueur du glissement est de 60 m, sa hauteur de 17 m, et son volume d'environ 11 000 m³. Le dépôt sur la voie a une longueur de 15 m, une hauteur de 1,30 à 1,50 m, et un volume d'environ 15 m³, soit 25 tonnes.

Le glissement résulte d'une stabilité précaire du talus dont la résistance d'une formation d'argiles contenue dans le terrain était moins importante qu'attendue. Du fait de la présence d'une autre formation dure et inclinée sous les argiles, le glissement est dissymétrique et vient recouvrir les voies sur une petite portion à son extrémité ouest.

À la vue du dépôt, le conducteur actionne le freinage d'urgence et l'abaissement du pantographe. Puis le choc se produit immédiatement, au PK 390,980 à la vitesse de 284 km/h.

Sous l'effet du choc, le chasse-obstacle de la motrice se disloque et le carénage du nez se déchire sur l'avant gauche. La motrice subit un mouvement d'enfoncement dans la première remorque. Son bogie avant déraile vers le côté droit, suivi de la même façon du bogie arrière puis des trois bogies des remorques suivants. Le bourrelet de terre est dispersé par le choc, permettant le maintien de l'arrière de la rame sur la voie.

Le bogie avant de la motrice traverse l'espace entre les deux voies. Ses roues gauches traversent aussi la file de rail intérieure de la voie adjacente, 70 m et 0,9 seconde après leur déraillement. Le bogie, une fois à cheval sur la voie 1, vient buter contre les rails. Dans un mouvement de rotation de la motrice, le bogie arrière se déporte dans l'espace d'entrevoie et vient se mettre en butée contre la voie 1. La retenue des bogies par la voie (à la manière d'une glissière de sécurité) s'accompagne de déformations de voie et d'un déplacement des bogies par rapport à la caisse de la motrice.

Les trois premiers bogies des remorques qui ont également déraillé restent à cheval sur la voie 1. Ils détruisent le détecteur de boîte chaude situé au PK 390,932, 50 m après le point de déraillement.

Dans les mouvements de chocs, le conducteur est projeté au sol de sa cabine et grièvement blessé. Divers défauts se signalent au calculateur de sécurité du bord qui dédouble plusieurs fois la commande de freinage d'urgence du conducteur.

Dès la destruction du détecteur de boîte chaude, une alarme de mise hors service de celui-ci est délivrée au poste de commande à distance de Pagny-sur-Moselle. Le chef de circulation du poste tentera alors par deux fois, en vain, de joindre le conducteur pour lui donner la consigne de réduction de vitesse applicable dans ce cas. Le conducteur n'est plus en état de répondre.

Le TGV poursuit sa course, maintenu par les deux voies tout en détruisant celles-ci. Les éléments articulés de rame restent solidaires jusqu'à l'arrêt complet au PK 389,345, 1 635 m et 40 secondes après le point d'impact.

La rame subit au total des dommages conséquents. Il est à noter que sur toute la distance du déraillement, aucune intrusion ou projection d'objet ne se produit dans les habitacles, préservant les voyageurs. Le contrôleur titulaire a été renversé dans l'accident, ainsi qu'une voyageuse. Vingt-et-une personnes sont blessées légèrement, parmi les 307 à bord, plus le conducteur blessé grièvement.

Dès 7 h 33 l'alerte est donnée par plusieurs agents à bord. À 7 h 39, le coordonnateur régional des circulations pour l'Alsace informe le chef circulation de Pagny-sur-Moselle de la possibilité du déraillement. Ce dernier prend les mesures de rétention des circulations pour la protection du train accidenté. Il informe aussi les services de secours et les forces de l'ordre.

Les premiers services de secours sont présents sur place vers 8 h 05. Les passagers sont pris en charge et le conducteur est hélicoptéré vers un service hospitalier d'urgence.

La remise en état de la section de ligne s'est déroulée jusqu'en septembre 2020, date de reprise des circulations. Plusieurs mesures de sécurisation vis-à-vis du risque de glissement toujours présent sur certains talus ont été prises, comme une surveillance de la tenue des talus par capteurs d'inclinaison, ainsi qu'une limitation temporaire de vitesse des trains à 80 km/h sur la zone surveillée.

Un projet de confortement définitif des talus à risque est à l'œuvre pour lever les mesures restrictives temporaires.

6 - Analyse des causes et facteurs associés, orientations préventives

6.1 - L'arbre des causes

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

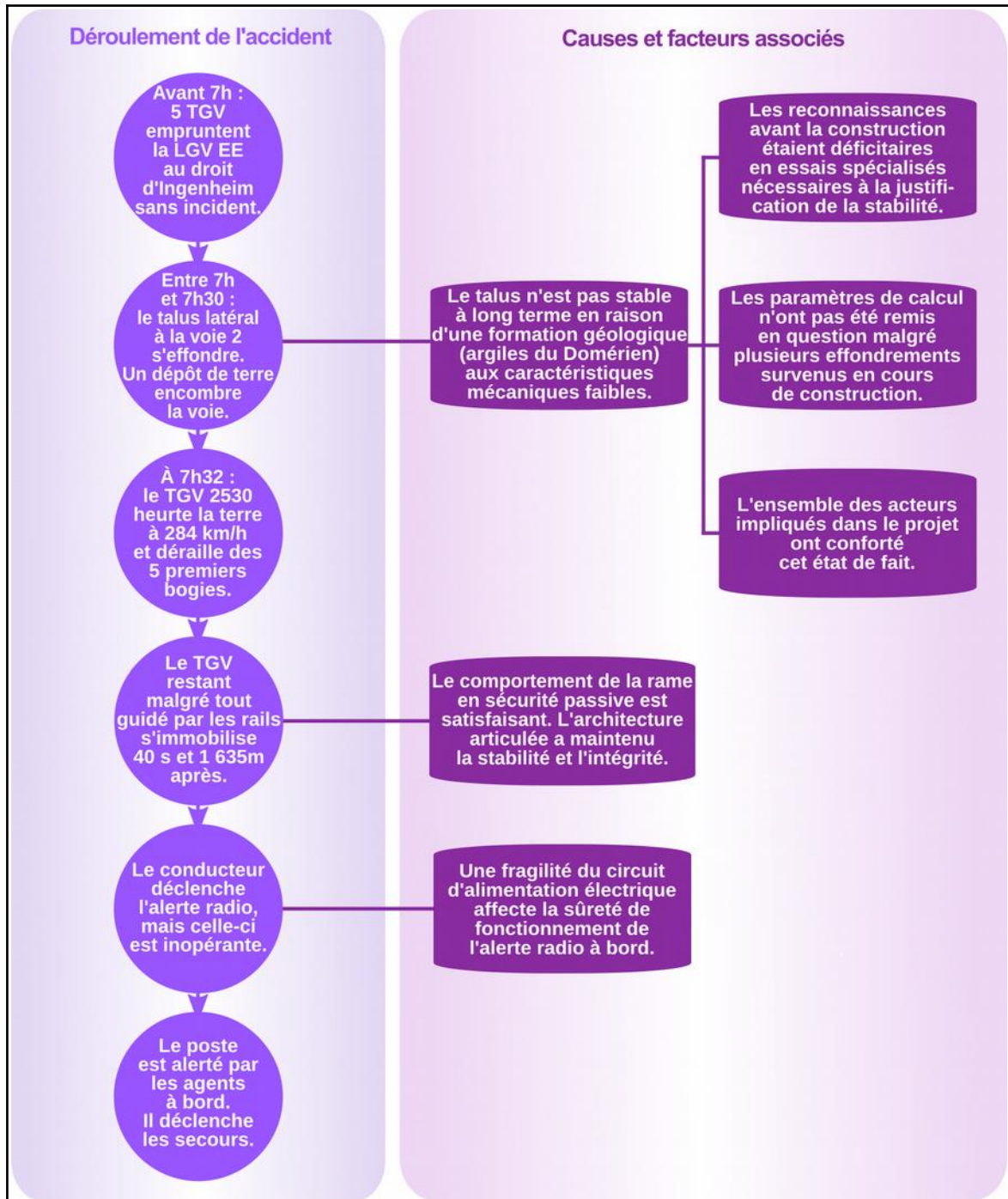


Figure 59 : l'arbre des causes de l'accident

6.2 - Les causes de l'accident

La cause immédiate du déraillement du TGV est le heurt d'un dépôt de matériau sur la voie provenant du glissement du talus adjacent.

La cause du glissement du talus est l'instabilité de celui-ci en raison de la faible résistance d'une formation géologique particulière le constituant : des argiles du Domérien. La résistance de cette formation avait été surestimée lors de la justification de la stabilité à l'époque de la conception.

Un comportement évolutif dans le temps des argiles, qui est caractéristique de ce matériau, ou des apports d'eau potentiellement élevés peuvent expliquer que l'instabilité ne se soit révélée qu'après quatre années d'exploitation de la ligne.

Plusieurs facteurs ont été identifiés comme ayant pu concourir à cette situation :

- > la faiblesse des reconnaissances des sols en ce qui concerne la détermination des paramètres géomécaniques utilisés pour la justification de la stabilité en conception ;
- > la non-vérification du choix de ces paramètres malgré plusieurs effondrements survenus en cours du chantier de terrassement ;
- > la non-détection de ces deux insuffisances par les acteurs impliqués dans le projet, aucun n'ayant joué, au niveau de contrôle le concernant, le rôle de boucle de rattrapage pourtant permise par son intervention.

Le bilan humain atténué de l'accident, malgré l'ampleur des dommages, s'explique par l'excellent comportement de la rame dans son interaction avec la voie après le déraillement.

Des chocs sur le matériel roulant ont cependant provoqué un endommagement des circuits électriques de la motrice de tête, et par suite la perte d'une fonction importante de sécurité, celle de l'alerte radio. Malgré son activation par le conducteur l'alerte radio n'a pas été transmise par le bord au poste d'aiguillage, ni à aucune autre circulation. Ce défaut causé par l'accident n'a pas prêté à conséquence, mais nécessiterait d'être sécurisé.

Les orientations préventives pour éviter le renouvellement de ce type d'accident sont à rechercher dans les quatre thématiques suivantes :

- > la consistance des reconnaissances géotechniques pour la justification en stabilité des talus de déblai sur LGV ;
- > le traitement du risque d'instabilité sur ce talus et d'autres de la LGV EE ;
- > la surveillance des ouvrages en terre sur ligne à grande vitesse ;
- > la robustesse de la radio sol-train.

6.3 - La consistance des reconnaissances géotechniques pour la justification en stabilité des talus de déblai sur LGV

Lors des études de conception de la LGV EE, les analyses géotechniques se sont appuyées sur un très grand nombre de sondages réalisés lors des phases successives d'études. L'apparente densité des sondages masquait en réalité, dans les cas du déblai DB 537, un déficit d'essais spécialisés nécessaires à la justification de la stabilité de l'ouvrage.

Les essais spécialisés déficitaires étaient plus précisément ceux permettant la détermination des paramètres de cohésion non drainée et de l'angle de frottement interne pour les argiles du Domérien (coefficients c' et φ'). Ils sont utilisés pour la justification de la stabilité. Il s'agissait d'essais de compression triaxiale en laboratoire. Un seul essai de compression triaxiale avait été conduit pour cette formation, là où l'Eurocode 7 préconise la réalisation de six essais au minimum. L'organisation d'essais complémentaires de ce type après l'accident a confirmé que la résistance en cisaillement des argiles avait été largement surestimée, d'un facteur proche de 1,5.

Le « Référentiel Technique pour la réalisation des LGV – Partie génie civil » définit les exigences du gestionnaire d'infrastructure pour la conception des ouvrages de génie civil des lignes ferroviaires à grande vitesse. Dans son tome II « LGV Voyageurs - Ouvrages en terre », il aborde la question des exigences particulières relatives au choix des paramètres géotechniques de vérification de la stabilité (article 2.1.2.1). Il ne définit toutefois pas d'exigence précise de consistance minimale des essais à réaliser. Il renvoie à l'Eurocode 7 qui lui-même ne donne, sur ce sujet, que des indications informatives et non normatives.

Il résulte de ces textes, qu'il existe une latitude d'interprétation significative. Dans un contexte d'études de grande technicité, complexes et abordant de multiples sujets, cette latitude a laissé se développer, chez les acteurs qui ont participé à la conception, un sentiment « *d'importance* » du volume général des reconnaissances effectuées voire de « *prudence* » des paramètres retenus. Ce n'était en rien le cas sur le point particulier de la stabilité des argiles du Domérien.

Il semble important de se demander si les prescriptions pour la réalisation des LGV sont suffisamment contraignantes, sur un sujet aussi critique que la stabilité des grands talus. La consistance à donner aux reconnaissances géotechniques pourrait être mieux encadrée. Le risque sur ligne à grande vitesse est considérablement plus important au regard d'autres ouvrages de génie civil courant ou d'un ouvrage équivalent routier.

Le BEA-TT émet ainsi la recommandation suivante.

Recommandation R1 à l'attention de SNCF Réseau :

Renforcer les prescriptions du référentiel technique pour la réalisation des LGV concernant l'encadrement de la consistance des essais conduisant au choix des paramètres géomécaniques de vérification de la stabilité des grands talus de déblai.

Le BEA-TT invite par ailleurs les acteurs de la construction du DB 537, la société SETEC, l'entreprise RAZEL et la société Tractebel, et de façon plus large toute la profession, à remettre en question leurs pratiques sur la consistance à donner aux campagnes de sondages pour la vérification de la stabilité des talus lors de la réalisation des LGV.

6.4 - Le traitement du risque d'instabilité sur les talus de la LGV EE

La formation géologique des argiles du Domérien, identifiée comme principalement en cause dans la survenue de l'accident, concerne un linéaire important du déblai DB 537 qui a été accidenté mais également d'autres déblais avoisinants : DB 533, DB 535.

Le déficit de reconnaissance géotechnique a possiblement pu affecter d'autres formations que les argiles du Domérien qui pourraient alors présenter un risque d'instabilité.

SNCF Réseau a entrepris une analyse approfondie de l'ensemble de la section de ligne pour identifier les zones à risque. Une surveillance renforcée de ces zones est mise en œuvre. Des solutions de confortement définitif sont à l'étude ou en cours de réalisation par le gestionnaire d'infrastructure. Il convient de mener ces travaux à terme.

Le BEA-TT émet la recommandation ci-après.

Recommandation R2 à l'attention de SNCF Réseau :

Parachever les analyses et les projets de travaux confortatifs faisant suite à l'accident, afin de traiter le risque de glissement de talus sur la section terminale est de la LGV Est Européenne.

6.5 - La surveillance des ouvrages en terre sur ligne à grande vitesse

Les investigations conduites par le BEA-TT n'ont pas révélé d'anomalie concernant les opérations de surveillance mises en œuvre sur la LGV EE. Les tournées de surveillance sont consistantes et ont été correctement conduites.

Les analyses entreprises par le gestionnaire d'infrastructure après l'accident ont mis en œuvre une technique novatrice de surveillance des talus de déblai par « interférométrie radar ». Cette technique consiste à réanalyser les évolutions d'images satellites qui apparaissent suffisantes pour déterminer les instabilités de surface lentes des sols.

Cette technique est actuellement l'unique moyen qui aurait permis de détecter le risque d'accident avant celui-ci, hormis hypothétiquement le renforcement des tournées de surveillance déjà abondantes.

Le retour d'expérience national sur les incidents d'ouvrage en terre montre que de nombreux glissements en déblai affectent le réseau ferré tous les ans (60 en moyenne par année), rendant profitable leur détection, même si ces glissements restent limités sur les lignes à grande vitesse et qu'un glissement de l'ampleur de celui d'Ingenheim est exceptionnel.

Pour mieux anticiper ces désordres, la technique de l'interférométrie est prometteuse. Néanmoins, elle peut aussi présenter selon le gestionnaire d'infrastructure des limites d'utilisation qu'il conviendrait de préciser avant d'envisager un suivi (périodicité de survol de la zone surveillée, existence d'un couvert végétal, orientation du glissement par rapport aux satellites...). D'autres techniques et outils peuvent aussi être explorés. Il conviendrait donc d'approfondir comment ces techniques pourraient durablement aider à la surveillance des instabilités sur le réseau en général et sur LGV en particulier.

Le BEA-TT émet la recommandation ci-après.

Recommandation R3 à l'attention de SNCF Réseau :

Étudier et statuer sur l'intérêt d'incorporer les analyses d'interférométrie radar, ou toute autre technique pertinente, aux opérations de surveillance des déblais classés sensibles au titre de la politique de maintenance.

Un point d'attention a été noté par le BEA-TT lors de ses investigations concernant la surveillance des ouvrages de drainage dans les talus du déblai.

L'examen vidéo post-accident des linéaires de tranchée drainante de part et d'autre de l'effondrement a montré de nombreux défauts affectant les ouvrages (flashes et seuils avec eau stagnante, ovalisation, poinçonnement, déboîtement...)

Le BEA-TT n'a pas retenu ce point comme causal dans l'accident. Il n'a notamment pas été possible de statuer sur la part provenant, dans ces défauts, des circulations de camions ayant fait suite à l'accident. Toutefois, les défauts observés, s'ils avaient été avérés, auraient été de nature à apporter de possibles réintroductions d'eau dans le talus, néfastes à la stabilité.

Ces ouvrages présentent un long linéaire, sans descente d'eau intermédiaire, si bien que des fuites localisées peuvent s'alimenter d'un débit important.

Lors de la réception des terrassements après la construction, il aurait été organisé une reconnaissance par caméra des collecteurs sous risbermes pour vérifier leur bon fonctionnement. Toutefois, il n'a pas été retrouvé de compte rendu vidéo d'un tel examen.

Le BEA-TT s'étonne que les opérations de surveillance du déblai qui ont suivi n'aient jamais cherché à s'assurer de l'état initial de ces collecteurs sous risbermes. Il s'étonne notamment que, faute de trace de cet état initial, le mainteneur n'ait pas réalisé une visite par caméra pour vérifier leur bon fonctionnement. Il semble (cela peut se comprendre) que faute d'avoir détecté cette anomalie, et vu le caractère récent de l'ouvrage, le mainteneur n'avait pas encore prévu de visite de contrôle. Mais il en résulte que les potentiels désordres affectant l'efficacité du système de drainage, que l'on peut craindre à la vue des reconnaissances après l'accident, n'ont jamais été vérifiés.

Compte tenu des risques pouvant résulter de défaut sur ces ouvrages, le BEA-TT émet la recommandation ci-après.

Recommandation R4 à l'attention de SNCF Réseau :

Réexaminer les prescriptions en matière de surveillance des ouvrages de drainage internes aux grands talus en vue de garantir leur examen par caméra et la connaissance de leur bon état de fonctionnement.

Le BEA-TT invite les autres gestionnaires d'infrastructure agréés du réseau ferré national à mettre en œuvre les recommandations R3 et R4.

6.6 - La disponibilité de la radio sol-train

Le comportement de la rame TGV dans son interaction avec la voie après le déraillement en sécurité passive a été satisfaisant, permettant d'éviter des conséquences graves pour les voyageurs.

Le BEA-TT a connaissance qu'une rencontre a eu lieu dès après l'accident entre l'exploitant SNCF Voyageurs et le constructeur Alstom pour échanger des informations techniques sur les enseignements apportés par l'accident à l'examen de dommages sur le matériel. Le BEA-TT ne peut que se satisfaire que ce type d'échange ait eu lieu. Ils sont de nature à améliorer les savoirs techniques de l'exploitant et du constructeur. L'organisation d'un déraillement en « grandeur nature » n'étant pas une option réaliste pour la conception en sécurité passive d'un modèle de rame, il convient, lorsque regrettablement il se produit, d'en tirer toute la connaissance nécessaire.

Mais si le comportement en sécurité passive a été satisfaisant, un manque de robustesse ou de sûreté de fonctionnement de l'alerte radio a été identifié. Par suite de

l'endommagement des circuits électriques de la motrice de tête lors du déraillement, l'alerte radio activée par le conducteur n'a pas été transmise.

Des leçons doivent être tirées par l'exploitant et par le constructeur de ce dysfonctionnement. L'alerte radio est un dispositif de sécurité qui doit faire preuve d'une grande disponibilité lors des accidents.

Ce sujet de perte de disponibilité de l'alerte radio a déjà été posé lors d'autres accidents survenus sur le réseau comme la dérive du TER n° 848973 entre Formerie, Serqueux et Sommery survenue le 20 octobre 2015, ou la collision entre un train express régional et un ensemble routier surbaissé sur le passage à niveau n° 70 à Boulzicourt survenue le 16 octobre 2019²². L'analyse de ces accidents avait conduit le BEA-TT à adresser des recommandations pour la sécurisation de la fonction d'alerte radio de ces matériels automoteurs à grande capacité.

Considérant que les actions sont encore en cours, le BEA-TT n'émet pas de recommandation complémentaire.

Le BEA-TT invite néanmoins le constructeur Alstom à étudier comment améliorer la disponibilité des fonctions de sécurité de l'alerte radio (ou autres) sur les futures rames TGV, en cas d'accident produisant des dommages conséquents au matériel roulant.

²² Les rapports d'enquête technique de ces accidents sont publics et consultables sur le site internet du BEA-TT.

7 - Conclusions et recommandations

7.1 - Conclusions

La cause immédiate du déraillement du TGV est le heurt d'un dépôt de matériau sur la voie provenant du glissement du talus adjacent.

La cause du glissement du talus est l'instabilité de celui-ci en raison de la faible résistance d'une formation géologique particulière le constituant : des argiles du Domérien. La résistance de cette formation avait été surestimée lors de la justification de la stabilité à l'époque de la conception.

Un comportement évolutif dans le temps des argiles, qui est caractéristique de ce matériau, ou des apports d'eau potentiellement élevés peuvent expliquer que l'instabilité ne se soit révélée qu'après quatre années d'exploitation de la ligne.

Plusieurs facteurs ont été identifiés comme ayant pu concourir à cette situation :

- > la faiblesse des reconnaissances des sols en ce qui concerne la détermination des paramètres géomécaniques utilisés pour la justification de la stabilité en conception ;
- > la non-vérification du choix de ces paramètres malgré plusieurs effondrements survenus en cours du chantier de terrassement ;
- > la non-détection de ces deux insuffisances par les acteurs impliqués dans le projet, aucun n'ayant joué, au niveau de contrôle le concernant, le rôle de boucle de rattrapage pourtant permise par son intervention.

Le bilan humain atténué de l'accident, malgré l'ampleur des dommages, s'explique par l'excellent comportement de la rame dans son interaction avec la voie après le déraillement. Des chocs sur le matériel roulant ont par ailleurs provoqué un endommagement de circuits électriques de la motrice de tête et la perte d'une fonction importante de sécurité, celle de l'alerte radio, sans toutefois prêter à conséquence.

7.2 - Recommandations

Recommandation R1 à l'attention de SNCF Réseau :

Renforcer les prescriptions du référentiel technique pour la réalisation des LGV concernant l'encadrement de la consistance des essais conduisant au choix des paramètres géomécaniques de vérification de la stabilité des grands talus de déblai.

Recommandation R2 à l'attention de SNCF Réseau :

Parachever les analyses et les projets de travaux confortatifs faisant suite à l'accident, afin de traiter le risque de glissement de talus sur la section terminale est de la LGV Est Européenne.

Recommandation R3 à l'attention de SNCF Réseau :

Étudier et statuer sur l'intérêt d'incorporer les analyses d'interférométrie radar, ou toute autre technique pertinente, aux opérations de surveillance des déblais classés sensibles au titre de la politique de maintenance.

Recommandation R4 à l'attention de SNCF Réseau :

Réexaminer les prescriptions en matière de surveillance des ouvrages de drainage internes aux grands talus en vue de garantir leur examen par caméra et la connaissance de leur bon état de fonctionnement.

Le BEA-TT invite les acteurs de la construction du DB 537, la société SETEC, l'entreprise RAZEL et la société Tractebel, et de façon plus large toute la profession, à remettre en question leurs pratiques sur la consistance à donner aux campagnes de sondages pour la vérification de la stabilité des talus lors de la réalisation des LGV.

Le BEA-TT invite les gestionnaires d'infrastructure agréés du réseau ferré national autres que SNCF Réseau à mettre en œuvre les recommandations R3 et R4.

Le BEA-TT invite le constructeur Alstom à étudier comment améliorer la disponibilité des fonctions de sécurité de l'alerte radio (ou autres) sur les futures rames TGV, en cas d'accident produisant des dommages conséquents au matériel roulant.

ANNEXES

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête

Annexe 2 : Schéma de signalisation dans le secteur de l'accident

Annexe 3 : Plan de génie civil conforme à l'exécution dans la zone de glissement

Annexe 4 : Informations sur le risque sismique

Annexe 5 : Trains en circulation avant et juste après le TGV 2350

Annexe 6 : Description et analyse des dommages à la voie

Annexe 7 : Description des opérations de surveillance

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête



Le Directeur

La Défense, le 5 mars 2020

DECISION

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

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

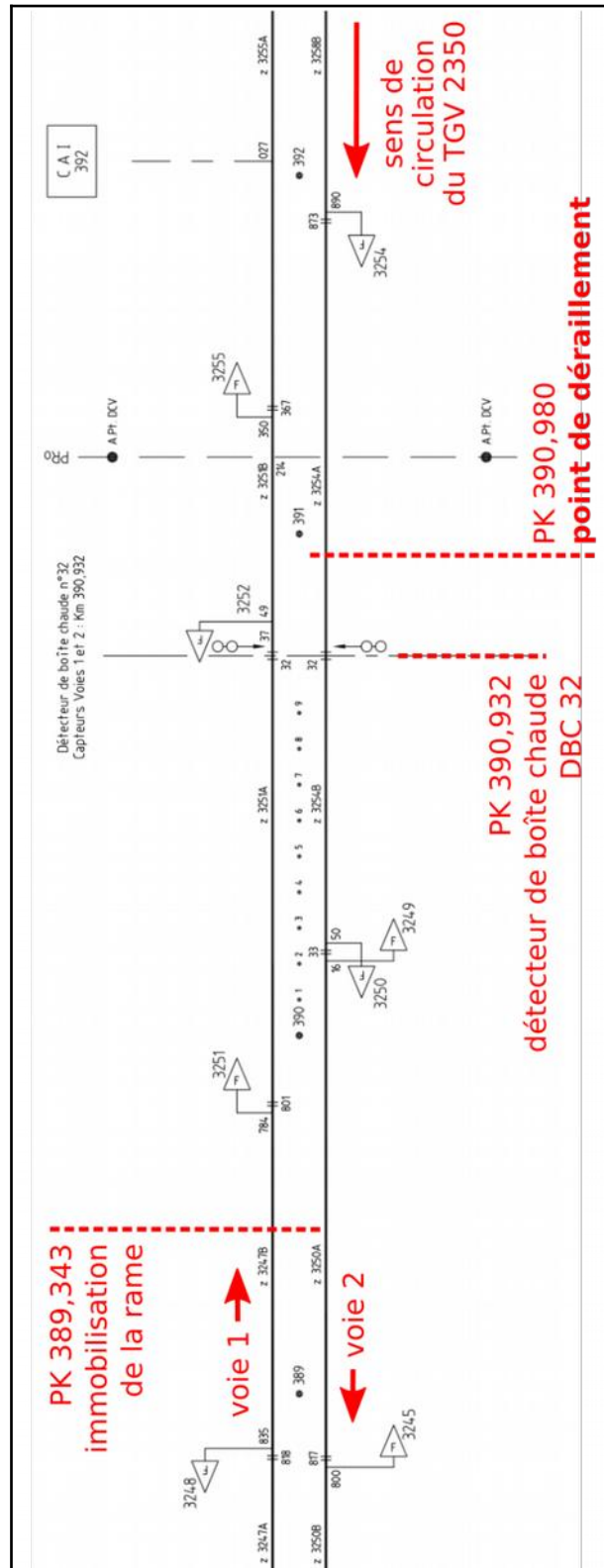
Vu les circonstances du déraillement d'un train à grande vitesse survenu le 5 mars 2020 à Ingenheim (67) ;

décide

Article 1 : Une enquête technique est ouverte en application des articles L. 1621-2 et R. 1621-22 du Code des transports concernant le déraillement du TGV n° 2350 sur la ligne Est Européenne 2 survenu le 5 mars 2020 à Ingenheim dans le Bas-Rhin.

Jean PANHALEUX

Annexe 2 : Schéma de signalisation dans le secteur de l'accident



Annexe 4 : Informations sur le risque sismique

La France est un pays à sismicité modérée. À l'exception des Antilles, notre pays est en effet relativement éloigné des frontières des plaques tectoniques.

L'évaluation de l'aléa sismique est définie par une carte de zonage sismique nationale réglementaire. Cinq zones de risque y sont répertoriées, allant d'un risque très faible (zone 1), faible (zone 2), modéré (zone 3), moyen (zone 4), à fort (zone 5) pour les Antilles françaises. La partie sud de l'Alsace est classée en zone 4 de sismicité moyenne. Le fossé Rhénan et ses contreforts, dont fait partie le tracé de la LGV EE, sont classés en zone 3 à sismicité modérée. On dénombre par le passé dans cette région plus d'une dizaine de séismes d'intensité VI selon l'échelle macroscopique européenne EMS 98, c'est-à-dire ayant produit des frayeurs dans la population et de légers dommages sur les constructions (fissurations, chute de débris de plâtres...)

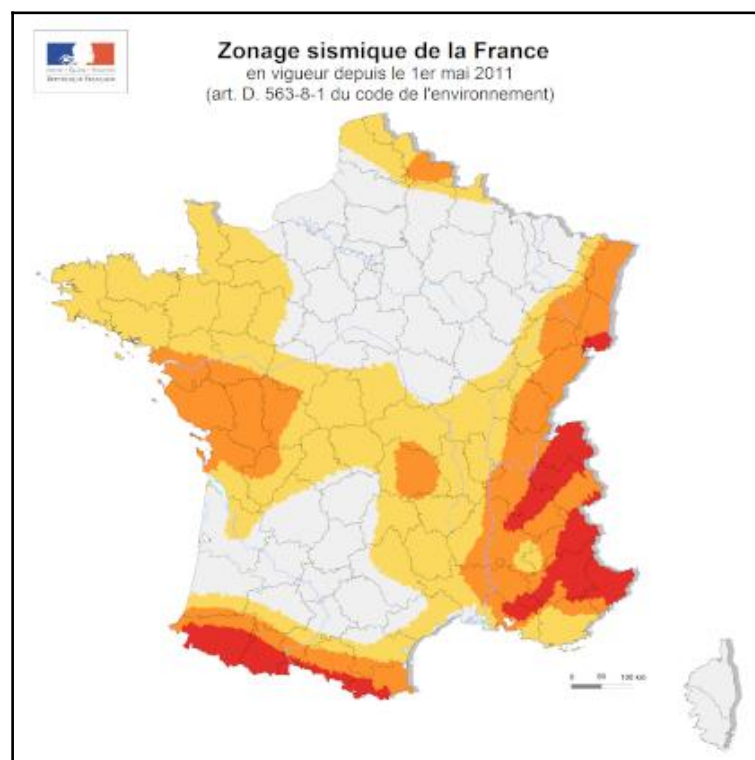


Figure 60 – zonage sismique de la France métropolitaine
(source Ministère de la transition écologique)

Annexe 5 : Trains en circulation avant et juste après le TGV 2350

Le tableau suivant récapitule les trains ayant circulé le 5 mars 2020 sur le tronçon terminal entre Baudrecourt (PK 298,8) et Vendenheim (PK 492,3).

Le tableau donne l'heure de passage de ces trains, théorique et réelle, à la balise en gare de Vendenheim située à 5 min du point de déraillement. L'heure de passage au point du déraillement en est déduite par extrapolation.

N° de TGV	Passage à Vendenheim		Origine / Destination et horaires prévus	Passage au point de déraillement	Écart avec le TGV 2350
	théor ^{que}	réel			
sens pair Strasbourg → Paris (voie 2)					
999002	5h02	4h54	Strasbourg (4h45) → Paris-Est (7h25)	5h00	-2h32min
5420	6h14	6h20	Strasbourg (6h07) → Lille (9h08)	6h25	-1h07min
5450	6h20	6h24	Strasbourg (6h13) → Bordeaux (12h01)	6h29	-1h03min
2404	6h54	6h55	Strasbourg (6h47) → Paris-Est (8h35)	7h00	-32min
2350	7h26	7h27	Colmar (6h38) → Paris-Est (9h05)	7h32	-
5470	7h38	7h38	Strasbourg (7 h 31) → Rennes (12 h 17) TGV détourné	7h43 (*)	+11min (*)
sens impair Paris → Strasbourg (voie 1)					
5521	6h51	6h52	Metz (5h57) → Montpellier (12h56)	6h47	-45min
2363	8h59	-	Paris-Est (7h08) → Colmar (9h41) TGV détourné	-	+1h20min (*)

(*) valeur théorique, ces TGV n'ayant pas circulé sur la ligne en raison de l'accident.

Annexe 6 : Description et analyse des dommages à la voie

Cette annexe reprend les constats détaillés effectués sur la voie et les analyses qui peuvent en être faites.

Par convention, les voies, files de rail et faces de ces rails sont désignées selon les dénominations données sur la figure ci-après.



Figure 61 : convention de désignation des rails

Les déformations sur la voie 2

Au point de déraillement, il est mesuré une légère déformation de voie d'environ 5 cm vers la droite dans le sens du passage du train. La déformation coïncide avec le dépôt de terre. Elle résulte a priori d'une poussée latérale exercée par les bogies de la rame au passage du dépôt, le train ayant été repoussé latéralement vers la droite.

Après le détecteur de boîte chaude, une nouvelle déformation latérale, d'environ 5 cm, est mesurable sur la voie 2. Elle est localisée au **PK 390,910** (voir figure 28), soit 70 mètres après la première déformation.

Les déformations sur la voie 1

Sur la voie 1, voie contiguë à celle du train, nous constatons une première déformation latérale de la voie, entre le **PK 390,912** et le **PK 390,882**. Sa flèche est de 30 cm (voir figure ci-après). Elle est suivie d'une seconde déformation entre le **PK 390,855** et le **PK 390,835** dont la flèche est plus atténuée, d'environ 15 cm. À l'emplacement de ces déformations, la voie est fortement remaniée. Les traverses ont littéralement explosé en partie centrale indiquant les passages de roue entre les rails. Au début de la première déformation, des traces sur la surface du rail intérieur de la voie 1 indiquent un passage de roues au-dessus du rail. Il s'agit des roues de droite du bogie avant de la motrice M1, les seules qui ont été identifiées comme ayant pénétré entre les files de rail de la voie 1.

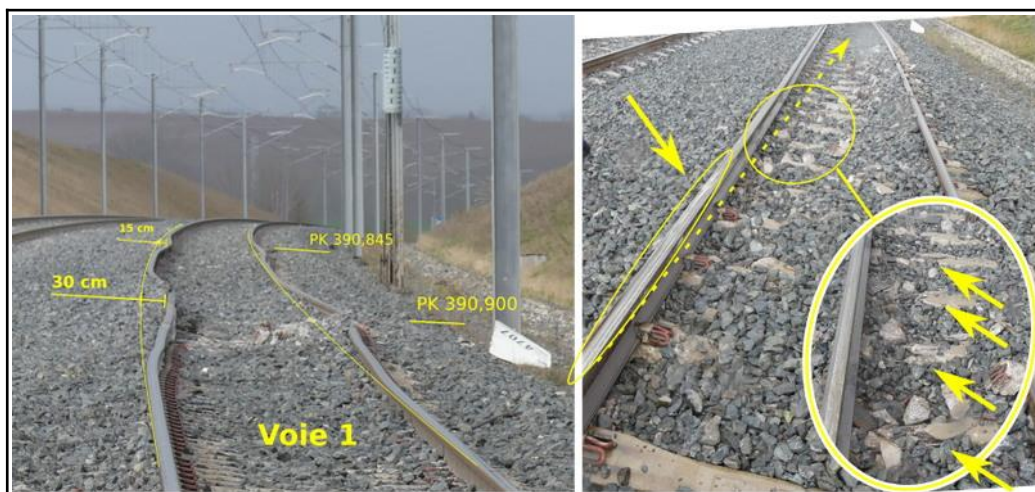


Figure 62 : vue de la déformation de la voie 1 et détail des impacts en voie

Le positionnement du train en voie après le déraillement

Pour faciliter la compréhension, nous présentons tout d'abord le positionnement final de la rame, une fois celle-ci immobilisée.

Le schéma ci-dessous donne la vue de dessus du positionnement de la rame une fois immobilisée. Le nez avant de la rame est à l'aplomb du **PK 389,345** repérable grâce à un poteau caténaire situé à cet endroit. Le bogie avant de la motrice M1 est à cheval sur la voie 1, le bogie arrière est dans l'entrevoie, les trois premiers bogies des remorques qui ont déraillé sont à cheval sur la voie 2.

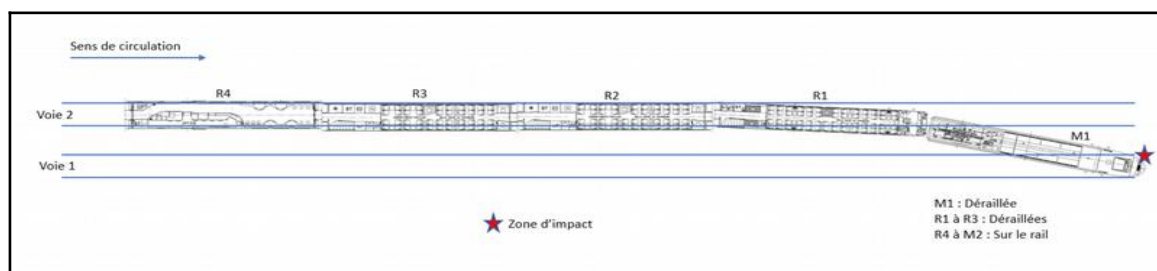


Figure 63 : positionnement de la rame après immobilisation

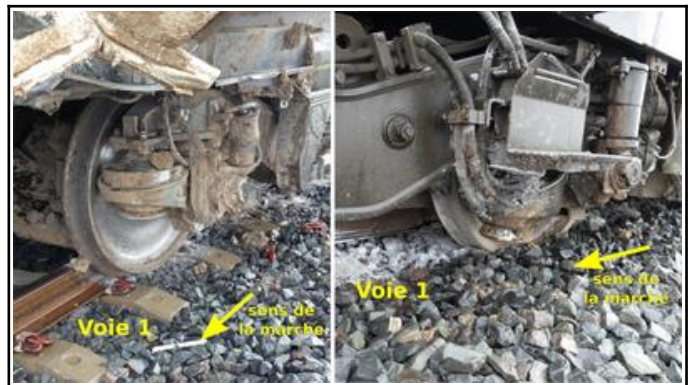
Le positionnement précis de chacun des bogies qui a déraillé est décrit ci-après.

Bogie A (avant de la motrice)

Le bogie A, bogie avant de la motrice M1, est positionné à cheval sur la voie 1 qui est la voie en sens inverse de la voie 2 sur laquelle circulait le train. L'essieu avant (à gauche ci-après) est plaqué contre les rails de la voie 1 par leur gauche dans le sens de la marche du TGV. La roue gauche arrière (à droite ci-après) est enfoncée dans le ballast, légèrement décalée vers la gauche. Elle a cisailé l'extrémité des traverses sur lesquelles elle a roulé.

Figure 64 : positionnement en voie du bogie A après immobilisation

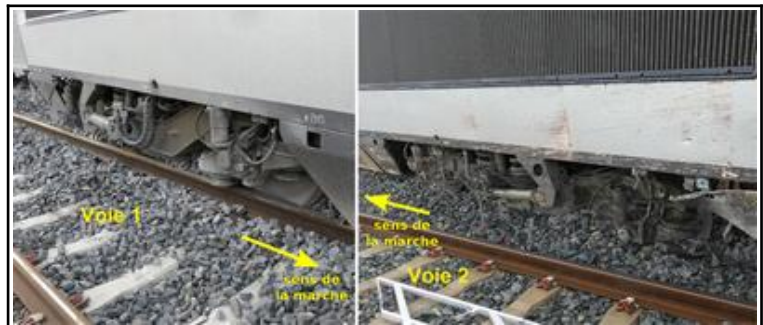
(roue avant gauche plaqué sur la face externe du rail intérieur à gauche ; et roue arrière gauche à droite)



Bogie B (arrière de la motrice)

Le bogie B, bogie arrière de la motrice M1, est dans l'entre-voie. Le bogie est plaqué sur la face externe du rail intérieur de la voie 1, dans le sens de la marche du train (à gauche ci-contre). Il est distant du rail intérieur de la voie 2 (à droite ci-contre).

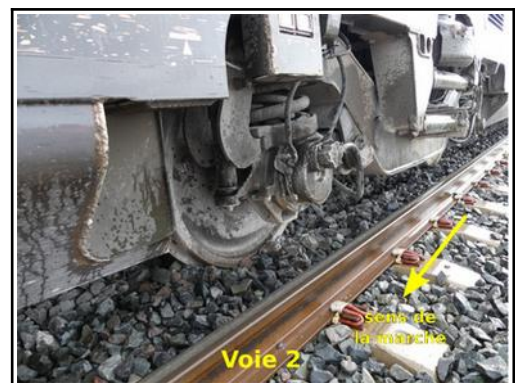
Figure 65 : positionnement en voie du bogie B après immobilisation



Remorques

Les trois bogies 1, 2 et 3 des remorques sont à cheval sur le rail intérieur de la voie 2, avec un positionnement similaire pour les trois (ci-dessous : bogie 2 vu du côté gauche).

Figure 66 : positionnement en voie du bogie 2 après immobilisation



État des voies sur les 1 500 mètres précédant l'immobilisation

Le positionnement du train que nous venons de décrire a été pris par la rame deux secondes après l'accident et s'est maintenu jusqu'à l'arrêt complet.

Le bogie A a glissé maintenu en butée par la voie 1 (voir figure ci-dessous à droite) :

- L'essieu avant était plaqué aux rails. La roue gauche a roulé sur les attaches de la file intérieure de rail. Elle les a toutes emportées sur 1 500 m. La roue droite frottait sur la face interne du rail extérieur, en position légèrement surélevée par rapport aux attaches en raison de l'enfoncement vers l'arrière du bogie.
- L'essieu arrière était légèrement décalé vers la gauche. La roue droite de cet essieu roulait sur les traverses en les ébréchant. La roue gauche cisailait l'extrémité gauche des mêmes traverses.

Le bogie B est resté dans l'entrevoie, plaqué au rail intérieur de la voie 1. Les bogies 1, 2 et 3 sont restés à cheval sur le rail intérieur de la voie 2.

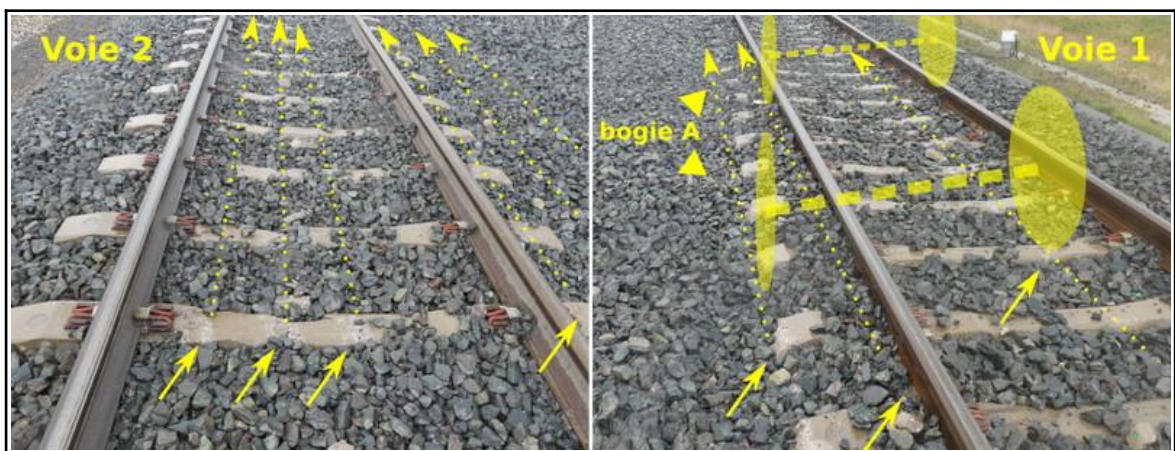


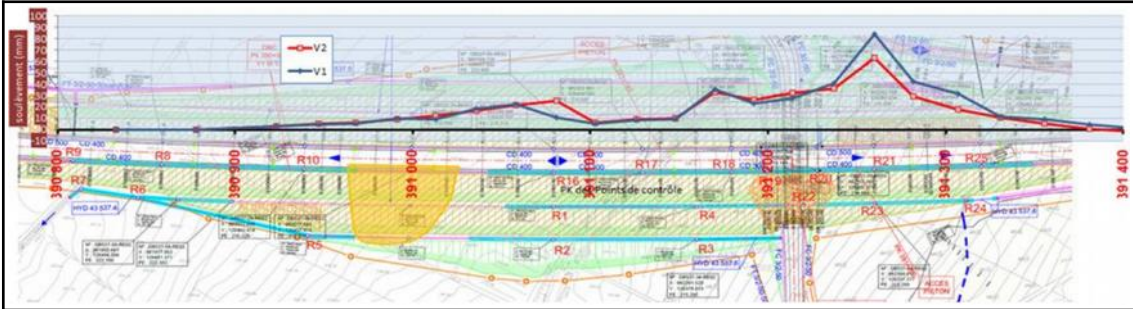
Figure 67 : dommages à la voie en partie courante

Cinq ruptures de rail (au niveau de soudures aluminothermiques) ont été repérées sur le rail intérieur de la voie 1, aux PK 390,710, 390,302, 389,905, 389,500 et 389,390.

Annexe 7 : Description des opérations de surveillance

Les principales opérations directement ou indirectement en relation avec la surveillance des talus prévues dans le plan de maintenance du gestionnaire d'infrastructure sont récapitulées dans le tableau ci-après (l'ordre de présentation va de ce qui est plus spécifique aux ouvrages en terre à ce qui est plus général à la voie et à sa plateforme).

Opération	Description sommaire
<p>➤ Les inspections d'ouvrage en terre</p> <p>périodicité : 3 ans</p>	<p>Les ouvrages font l'objet de visites détaillées tous les six ans avec une visite intermédiaire au moins tous les trois ans.</p> <p>Les visites ont été les suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • visite détaillée : 20/08/15 (visite initiale) • visite complémentaire d'expertise nationale : 19/07/16 • visite intermédiaire : 13/12/18 <p>Concernant les talus et les drainages, aucune anomalie n'a été identifiée à proximité du glissement. Seule une fissure est localisée au PK 390,860 (à 100 m du glissement) sur la risberme inférieure, sans lien avec l'accident.</p>
<p>➤ Les tournées en hélicoptère</p> <p>périodicité : 3 mois</p>	<p>Ces tournées permettent d'identifier visuellement les modifications d'importance sur la ligne concernant la plateforme, les talus et les abords. Elles permettent d'anticiper les risques de fontis, de coulée, de glissement et d'interférence de riverains.</p> <p>Les tournées de 2019 ont été effectuées les 22/02, 15/04, 16/09, et pour la dernière 25/11, les tournées de 2020 n'ayant pas encore eu lieu.</p> <p>Elles n'ont pas identifié de risque dans la zone de l'accident.</p>
<p>➤ Les tournées aux abords</p> <p>périodicité : 2 mois</p>	<p>Réalisées à pied, ces tournées permettent de déceler des modifications de l'environnement des voies et d'observer les ouvrages en terre, notamment leurs dispositifs d'écoulement des eaux et leur végétation.</p> <p>Les dernières dates de ces tournées ont été : 11/10/19, 2/12/19 et 27/1/20.</p> <p>Ces tournées ne font pas état de l'observation de défauts sur la zone du glissement. Les défauts les plus proches concernent des fissures du bord de piste à plus de 500 m.</p>
<p>➤ La surveillance de la géométrie de la voie par engin</p> <p>périodicité : 2 mois</p>	<p>La surveillance de la géométrie de la voie est assurée par le TGV d'inspection rapide à 320 km/h des installations, IRIS 320.</p> <p>Dès 2016, des défauts de géométrie de voie sont apparus avec des valeurs atteignant rapidement des valeurs d'intervention en nivellement longitudinal. L'analyse des enregistrements successifs fait apparaître deux bosses au droit du PK 391,260 (voir figure ci-après).</p> <p>Ces mouvements ne sont pas stabilisés à ce jour et ont focalisé beaucoup l'attention au travers d'un contentieux judiciaire toujours en cours entre le gestionnaire d'infrastructures et les responsables de la construction de la ligne. Des interventions de rectification de la voie ont aussi été nécessaires.</p>

Opération	Description sommaire
	<p>Ces mouvements ne sont pas exactement localisés au droit du glissement et seraient liés aux propriétés des matériaux rencontrés localement.</p>
 <p>Figure 68 : cumul des mouvements altimétriques des deux voies</p>	
	<p>La dernière tournée Iris sur la voie 2 en date du 03/03/20 (soit deux jours avant le glissement) ne donne pas de mesures en écart par rapport à la tournée précédente du 18/02/20.</p> <p>La rame est par ailleurs dotée d'une caméra frontale. L'image vidéo enregistrée le 03/03/20 ne donne aucun signe de glissement. On distingue nettement la bonne continuité du chemin de câble latéral en pied de talus, ainsi que la bonne continuité de la risberme inférieure (voir figure 55). Ceci confirme aussi l'absence de signe visible pour les conducteurs.</p>
<p>➤ Les tournées de surveillance périodique de la voie périodicité : 4 mois</p>	<p>Ces tournées ont pour objectif de détecter d'éventuelles anomalies ou dégradations des constituants de la voie. Elles ne s'intéressent pas de près aux ouvrages de talus.</p> <p>Les dernières dates de ces tournées ont été janvier 2020, octobre 2019 et juin 2019.</p>



Bureau d'Enquêtes sur les Accidents de Transport Terrestre



Grande Arche - Paroi Sud
92055 La Défense cedex

Téléphone : 01 40 81 21 83

Télécopie : 01 40 81 21 50

bea-tt@developpement-durable.gouv.fr

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



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE

Liberté
Égalité
Fraternité