

BEA-TT

*Bureau d'enquêtes sur les accidents
de transport terrestre*

*Rapport d'enquête technique
sur le choc d'une automotrice
contre un isolateur
pendant de la caténaire
le 1^{er} février 2012 à Sevran (93)*

juin 2013



**Conseil Général de l'Environnement
et du Développement Durable**

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

Affaire n° BEATT-2012-004

**Rapport d'enquête technique
sur le choc d'une automotrice
contre un isolateur pendant de la caténaire
le 1^{er} février 2012 à Sevrans (93)**

Bordereau documentaire

Organisme commanditaire : Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE)

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

Titre du document : Rapport d'enquête technique sur le choc d'une automotrice contre un isolateur pendant de la caténaire le 1^{er} février 2012 à Sevrans (93)

N° ISRN : EQ-BEAT--13-5--FR

Proposition de mots-clés : automotrice, caténaire, isolateur, vitrage

Avertissement

L'enquête technique faisant l'objet du présent rapport est réalisée dans le cadre des articles L. 1621-1 à 1622-2 du titre II du livre VI du code des transports et du décret n° 2004-85 du 26 janvier 2004, relatifs notamment aux enquêtes techniques après accident ou incident de transport terrestre.

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

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

SOMMAIRE

GLOSSAIRE.....	9
RÉSUMÉ.....	11
1 - CONSTATS IMMÉDIATS ET ENGAGEMENT DE L'ENQUÊTE.....	13
1.1 - L'accident.....	13
1.2 - Les secours et le bilan.....	14
1.3 - Les mesures prises après l'accident.....	14
1.4 - L'engagement et l'organisation de l'enquête.....	15
2 - CONTEXTE DE L'ACCIDENT.....	17
2.1 - La ligne ferroviaire.....	17
2.2 - Le train n° 121508.....	18
2.3 - Le train n° 121504.....	19
2.4 - Le pantographe.....	20
2.5 - La caténaire.....	20
2.5.1 -Généralités sur la caténaire 25 kV.....	20
2.5.2 -Le sectionnement électrique de la caténaire 25kV.....	21
3 - COMPTE RENDU DES INVESTIGATIONS EFFECTUÉES.....	23
3.1 - Les résumés des déclarations et des témoignages.....	23
3.1.1 -Les déclarations de l'agent de conduite voyageant dans la cabine du train accidenté.....	23
3.1.2 -Les déclarations du conducteur du train précédent.....	23
3.2 - L'examen des enregistrements graphiques des trains.....	24
3.2.1 -La bande graphique du train n° 121504.....	24
3.2.2 -La bande graphique du train accidenté.....	24
3.3 - Le registre d'incidents du central sous-stations.....	25
3.4 - L'exploitation des enregistrements de la radio sol-train.....	25
3.5 - L'emplacement et la provenance des pièces retrouvées sur les lieux.....	25
3.6 - Les investigations concernant les isolateurs.....	27
3.6.1 -L'examen visuel des isolateurs brisés.....	27
3.6.2 -L'expertise de l'isolateur brisé du câble porteur.....	29
3.6.3 -Les essais mécaniques effectués sur un échantillon d'isolateurs.....	29
3.6.4 -La maintenance et la traçabilité des isolateurs.....	30
3.6.5 -Le retour d'expérience.....	31
3.6.6 -Conclusion des investigations effectuées sur les isolateurs.....	31
3.7 - Les investigations concernant l'ensemble de la caténaire.....	31
3.7.1 -La maintenance préventive.....	31
3.7.2 -Les autres travaux.....	32

3.8 - Les investigations portant sur le matériel roulant.....	33
3.8.1 -L'examen du pantographe et de la toiture de la BB 17084.....	33
3.8.2 -L'examen du pantographe et de la toiture de la Z 6155.....	33
3.8.3 -L'examen de la face avant de la Z 6155.....	34
3.8.4 -L'examen de l'intérieur de la cabine de conduite de la Z 6155.....	35
3.8.5 -La résistance aux chocs des vitres frontales.....	35
3.8.6 -Le retour d'expérience.....	40
3.9 - La mécanique de l'accident.....	41
3.9.1 -La mécanique de la défaillance de la caténaire.....	41
3.9.2 -L'énergie mise en jeu dans le choc.....	42
3.9.3 -La mécanique des dommages dans la cabine.....	43
4 - DÉROULEMENT DE L'ACCIDENT.....	45
4.1 - La circulation du train n° 121508.....	45
4.2 - Les mesures immédiates et les secours.....	45
5 - ANALYSE DES CAUSES ET FACTEURS ASSOCIÉS, ORIENTATIONS PRÉVENTIVES.....	47
5.1 - Les causes de l'accident.....	47
5.2 - Le suivi de la tenue dans le temps des isolateurs en céramique.....	48
5.3 - La protection offerte par les vitres frontales par temps froid.....	48
6 - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	51
6.1 - Les conclusions.....	51
6.2 - Les recommandations.....	51
ANNEXES.....	53
Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête.....	55
Annexe 2 : Extrait du registre d'incidents du régulateur sous-stations.....	56
Annexe 3 : Compte rendu de l'expertise de l'isolateur brisé.....	57
Annexe 4 : Rapport des essais de traction effectués sur un échantillon d'isolateurs.....	60
Annexe 5 : Retour d'expérience sur les ruptures d'isolateurs de type Vt 200233.....	64
Annexe 6 : Éléments sur la résistance aux chocs des vitrages ferroviaires.....	65

Glossaire

- **AC** : Agent Circulation
- **AEF** : Agence d'Essai Ferroviaire
- **BAL** : Block Automatique Lumineux
- **CG** : Conduite Générale de frein
- **CIM** : Centre d'Ingénierie du Matériel de la SNCF
- **COGC** : Centre Opérationnel de Gestion des Circulations
- **EPSF** : Établissement Public de Sécurité Ferroviaire
- **PVB** : Polyvinyle de Butyral
- **RFN** : Réseau Ferré National
- **RST** : Radio Sol-Train
- **SNCF** : Société Nationale des Chemins de fer Français
- **STM** : Spécification Technique du Matériel (de la SNCF)
- **STI** : Spécification Technique d'Interopérabilité
- **UIC** : Union Internationale des Chemins de fer

Résumé

Le 1^{er} février 2012 à 6h10, le train de banlieue SNCF n° 121508 circulant entre Crépy-en-Valois et Paris-Nord, sur la voie 2, percute peu avant la gare de Sevran-Livry en Seine-Saint-Denis, un isolateur en céramique provenant de la caténaire, qui pendait au-dessus de la voie à hauteur des vitres de la cabine de conduite.

L'isolateur traverse la vitre frontale gauche de cette cabine et blesse très grièvement le conducteur du train qui perd connaissance.

Cet accident est dû à la rupture de l'isolateur d'ancrage du câble porteur de la caténaire situé sur le sectionnement électrique du km 18,176, isolateur qui a d'abord été heurté par le pantographe de la locomotive du train n° 121504 avant de pendre à hauteur de la vitre frontale de l'automotrice de tête du train accidenté.

Cette rupture est la conséquence d'un défaut de fabrication de la céramique de l'isolateur concerné, se traduisant par la présence de porosités qui y ont favorisé le développement de fissures diminuant progressivement sa résistance mécanique.

Les conséquences du choc ont été aggravées par le fait que ce vitrage, fragilisé par le froid, n'a pu absorber qu'une partie de l'énergie du choc et n'a donc pas pu empêcher des morceaux d'isolateur d'être projetés violemment à l'intérieur de la cabine.

L'analyse de cet accident conduit le BEA-TT à formuler trois recommandations portant :

- pour la première, sur la surveillance de la tenue dans le temps des isolateurs en céramique ;
- pour les deux autres, sur la protection offerte, par temps froid, par les vitres frontales des matériels ferroviaires.

1 - Constats immédiats et engagement de l'enquête

1.1 - L'accident

Le 1^{er} février 2012 à 6h10, le train de banlieue SNCF n° 121508 circulant entre Crépy-en-Valois et Paris-Nord, sur la voie 2, percute peu avant la gare de Sevrans-Livry en Seine-Saint-Denis, un isolateur en céramique provenant de la caténaire, qui pendait au-dessus de la voie à hauteur des vitres de la cabine de conduite.

L'isolateur traverse la vitre frontale gauche de cette cabine et blesse très grièvement le conducteur du train qui perd connaissance.

Le train arrache la caténaire et provoque la disjonction des installations d'alimentation électrique de la section de ligne concernée.

Son troisième pantographe est arraché et pend sur le côté de la rame, engageant le gabarit de la voie 1 adjacente.

Le freinage de la rame se déclenche sous l'effet du dispositif de veille automatique et le train s'arrête à hauteur des quais de la gare de Sevrans-Livry.

L'alerte est donnée à l'aide de la radio par un deuxième agent voyageant en cabine.

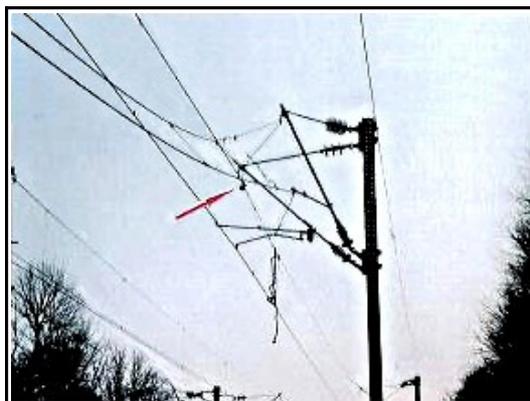


Figure 1 : L'avant du train n° 121508 arrêté en gare de Sevrans-Livry



Figure 2 : Morceau d'isolateur retrouvé sur le plancher de la cabine

L'enquête immédiate a rapidement montré que l'isolateur en cause provenait du sectionnement électrique (voir paragraphe 2.5.2) situé immédiatement en amont du km 18.



*Figure 3 : Le sectionnement électrique détérioré ;
la flèche indique le morceau d'isolateur resté accroché au câble porteur*

1.2 - Les secours et le bilan

Les secours sont appelés à 6h13 par le centre opérationnel de gestion des circulations de Paris-Nord.

Les pompiers du centre de secours de Livry sont sur place à 6h23. Ils sont rejoints peu après par une équipe du centre d'Aulnay et par le service mobile d'urgence et de réanimation de Bobigny (SMUR 93).

Le conducteur grièvement blessé est acheminé par l'ambulance du SMUR vers l'hôpital Beaujon à Clichy (92).

L'agent de conduite qui voyageait dans la cabine du train, commotionné et choqué, est conduit à l'hôpital Ballanger de Villepinte (93).

Les voyageurs, dont aucun n'est blessé, sont évacués de la rame accidentée en gare de Sevrans-Livry.

Outre les dégâts occasionnés à la rame et à la caténaire de la voie 2, cet accident a fortement perturbé les circulations ferroviaires : 463 trains de banlieue ont été retardés, 25 ont été supprimés et 17 ont vu leur parcours limité.

1.3 - Les mesures prises après l'accident

Après démontage du pantographe endommagé, la rame accidentée est évacuée vers le dépôt de La-Chapelle à partir de 14h00.

La caténaire de la voie 2, qui a été arrachée sur 150 m environ, est réparée dans la soirée et une partie de la nuit. La voie est rendue à la circulation le 2 février à 1h30.

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

Au vu des circonstances et du contexte de cet accident, le directeur du bureau d'enquêtes sur les accidents de transport terrestre (BEA-TT) a ouvert le 11 février 2012 une enquête technique en application des dispositions du deuxième alinéa de l'article 20, devenu depuis le 4 mai 2012 l'article 20-1, du décret n° 2004-85 modifié du 26 janvier 2004 relatif notamment aux enquêtes techniques après accident de transport terrestre.

L'enquêteur a eu communication, par le procureur de la République près le tribunal de grande instance de Bobigny, des pièces de la procédure judiciaire en cours.

Les expertises et essais nécessaires à la présente enquête technique ont été réalisés en lien avec l'expert désigné dans le cadre de cette procédure.

2 - Contexte de l'accident

2.1 - La ligne ferroviaire

L'accident s'est produit sur la voie 2 de la ligne de Paris-Nord à Ormoy-Villers peu avant la gare de Sevrans-Livry, approximativement au km 18,500.

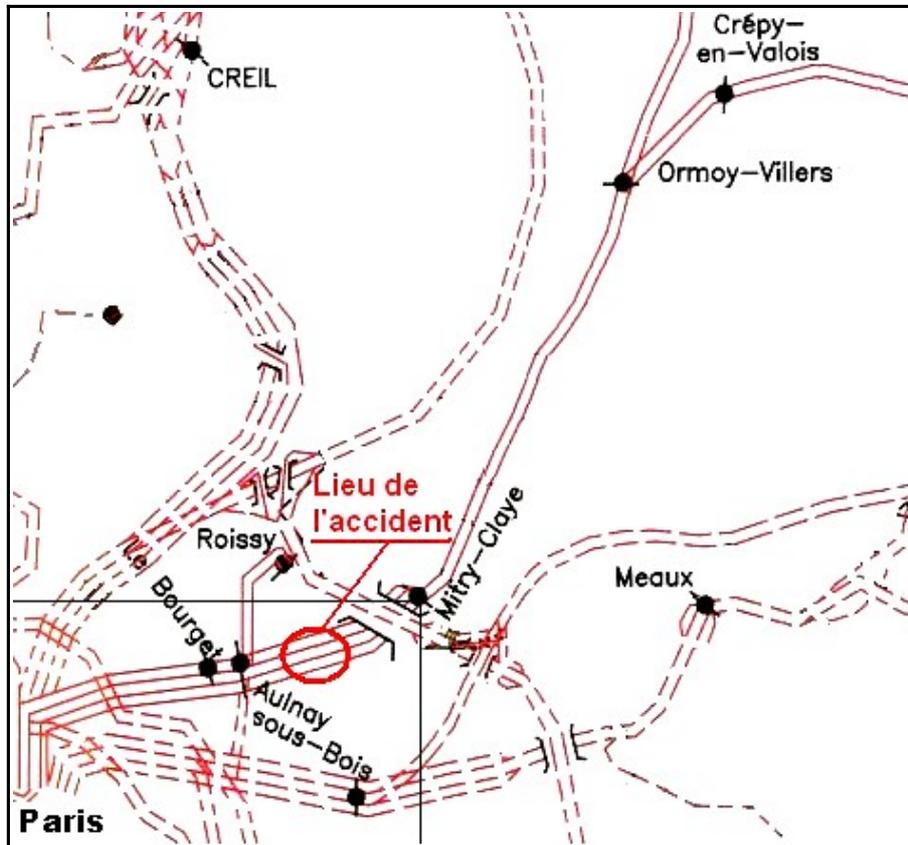


Figure 4 : Schéma d'ensemble de la ligne

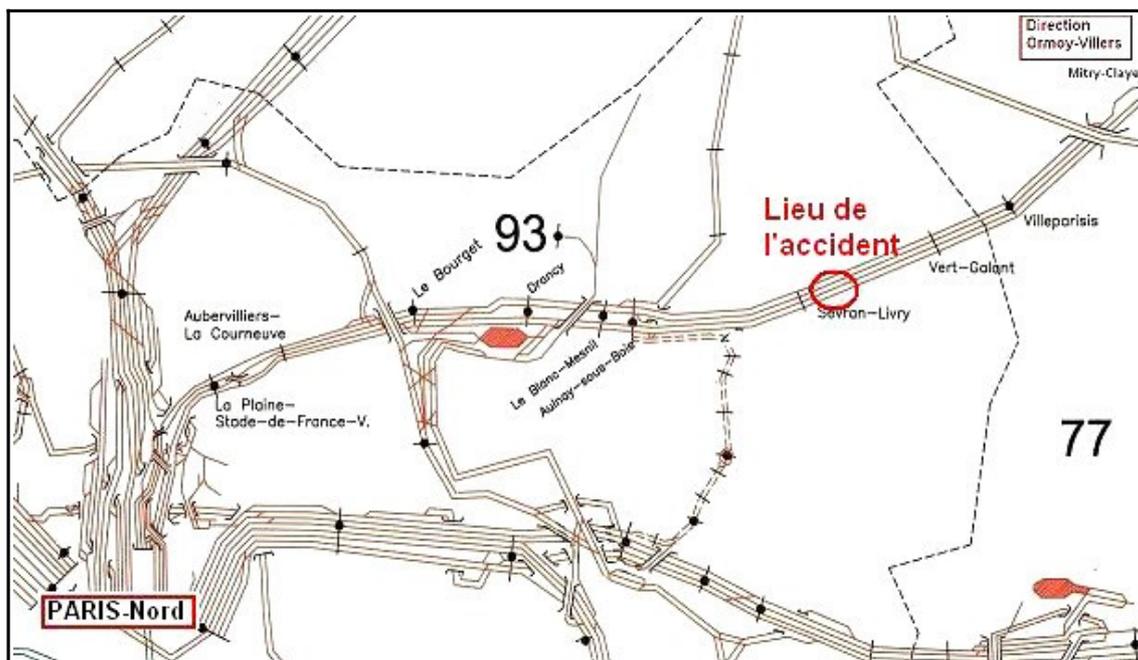


Figure 5 : Schéma de la ligne entre Paris-Nord et Mitry-Claye

Cette ligne est très chargée, étant commune à la ligne B du RER dont elle constitue la branche B5 entre Paris-Nord et Mitry-Claye, et à la ligne K du Transilien entre Paris-Nord et Crépy-en-Valois.

Outre des trains de banlieue, elle supporte le trafic de fret entre la région parisienne et le Nord-Est ainsi que des trains régionaux des régions Picardie et Champagne-Ardennes.

Au total, à hauteur de Sevan, environ 350 trains y circulent quotidiennement dans chaque sens.

Depuis la gare de Paris-Nord, cette ligne comporte quatre voies jusqu'à Mitry-Claye et deux voies au-delà.

Elle est électrifiée en courant alternatif 25 kV. Le cantonnement des trains y est assuré par le block automatique lumineux (BAL) et elle est équipée de la radio sol-train (RST).

À hauteur de Sevan-Livry, elle peut être parcourue à la vitesse maximale de 140 km/h sur les voies 1 et 2 et de 110 km/h sur les voies 1 bis et 2 bis.

Elle est régulée par le centre opérationnel de gestion des circulations (COGC) de Paris-Nord.

2.2 - Le train n° 121508

Le train Transilien¹ n° 121508 circule du lundi au samedi entre Crépy-en-Valois et Paris-Nord. Il part de Crépy-en-Valois à 5h33 pour arriver à Paris à 6h26.

Le 1^{er} février 2012, il est composé de trois éléments automoteurs de banlieue du type Z 6100 : l'automotrice Z 6155 en tête, puis la Z 6171 et la Z 6148.

Les éléments Z 6100 comportent chacun trois caisses. Sur la région de Paris-Nord, ils circulent avec leur motrice située du côté Paris.



Figure 6 : Triplette d'éléments Z 6100 avec motrice en tête

1 « Transilien » est l'appellation des trains SNCF de la banlieue parisienne.

La composition de la rame accidentée est donc la suivante :

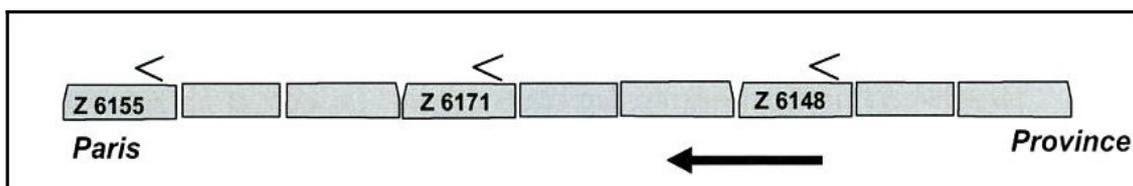


Figure 7 : La composition du train n° 121508

2.3 - Le train n° 121504

Le 1^{er} février 2012, le train n° 121504 est le dernier train à avoir circulé voie 2 avant l'accident. Parti de Crépy-en-Valois, il précédait le train n° 121508 d'environ une demi-heure. Il est arrivé à Paris-Nord sans encombre, mais l'enquête a montré qu'en réalité son pantographe a heurté un élément de caténaire à hauteur de Sevran. Reparti à vide en direction de la province sous le n° 746183, ce train a arraché la caténaire au niveau du km 7,2 près de la gare d'Aubervilliers-La Courneuve.

Il était composé d'une rame réversible de 7 voitures de type VB2N et de la locomotive BB 17084 située côté province.

Dans les deux sens de circulation, le pantographe actif de la locomotive était celui situé du côté de la rame.



Figure 8 : Une locomotive BB 17000 en tête d'une rame de voitures VB2N

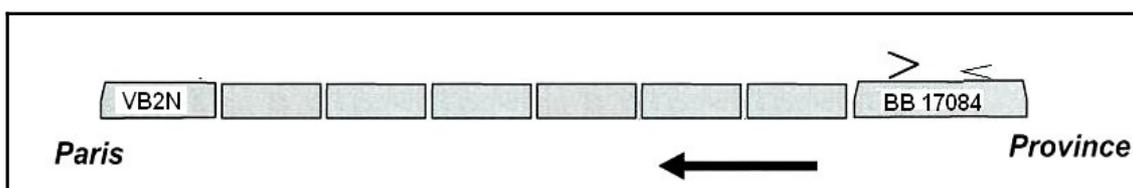


Figure 9 : La composition du train n° 121504

2.4 - Le pantographe

Pour assurer le captage du courant de traction, les types d'engins impliqués, l'automotrice Z 6100 comme la locomotive BB 17000, sont équipés du pantographe AM 18 qui est le plus répandu sur le matériel 25 kV classique.

Son archet est en acier comme l'ensemble de sa structure. Il est prolongé de part et d'autre par des cornes isolantes en fibre de verre.

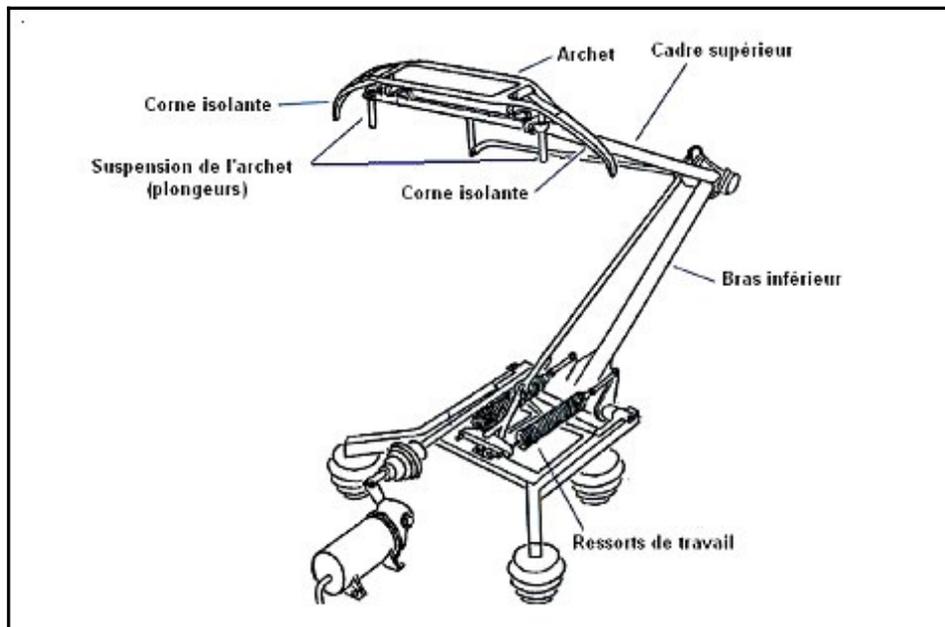


Figure 10 : Pantographe AM 18 équipant les engins moteurs 25 kV

2.5 - La caténaire

2.5.1 - Généralités sur la caténaire 25 kV

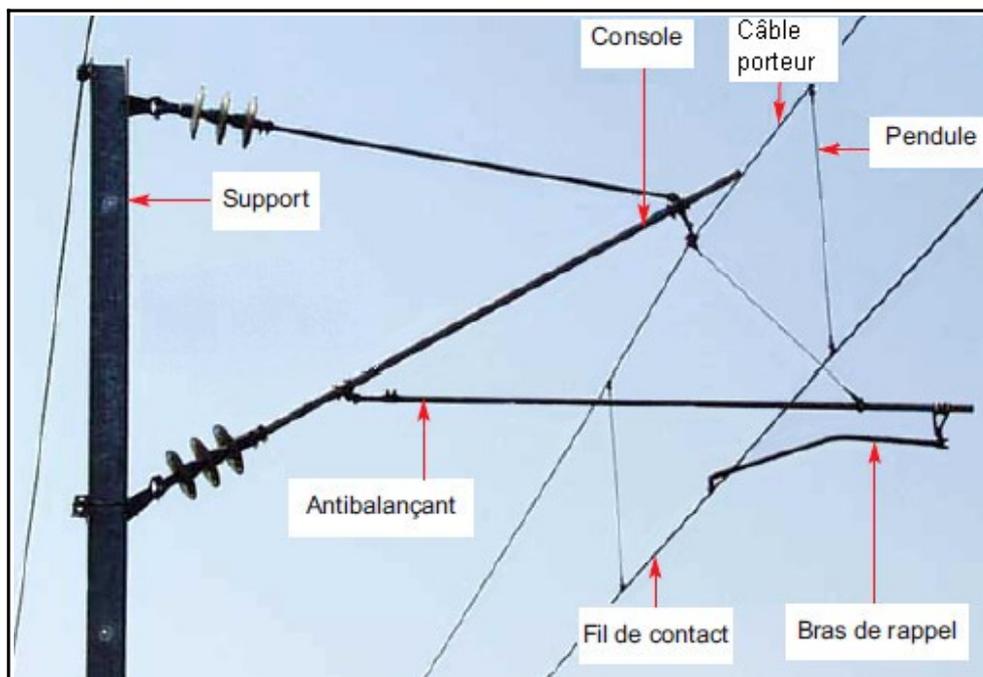


Figure 11 : Éléments de la caténaire 25 kV

La caténaire équipant les voies électrifiées en 25 kV est constituée de tronçons successifs appelés « *cantons de pose* », d'une longueur maximale de 1 400 m, dotés à chaque extrémité d'un appareil tendeur. Le milieu de chaque canton est immobilisé par un point d'ancrage appelé « *anticheminement* ».

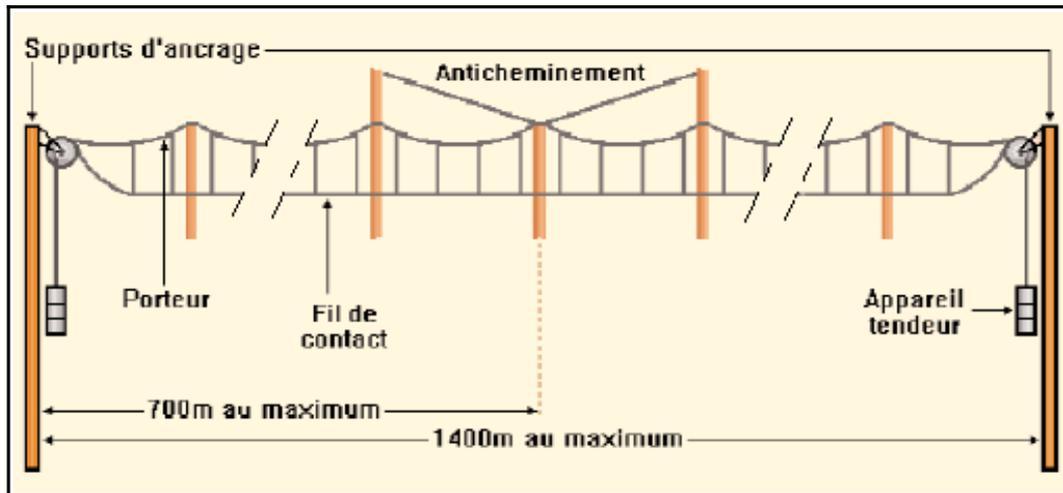


Figure 12 : Schéma d'un canton de pose de caténaire 25 kV

2.5.2 - Le sectionnement électrique de la caténaire 25kV

Les extrémités de deux cantons de pose successifs se chevauchent au sein d'un dispositif appelé « *sectionnement électrique* ». Il est conçu pour être franchi sans que les pantographes aient à être baissés. Le guidage de ces derniers s'effectue donc sans discontinuité d'un canton de pose au suivant.

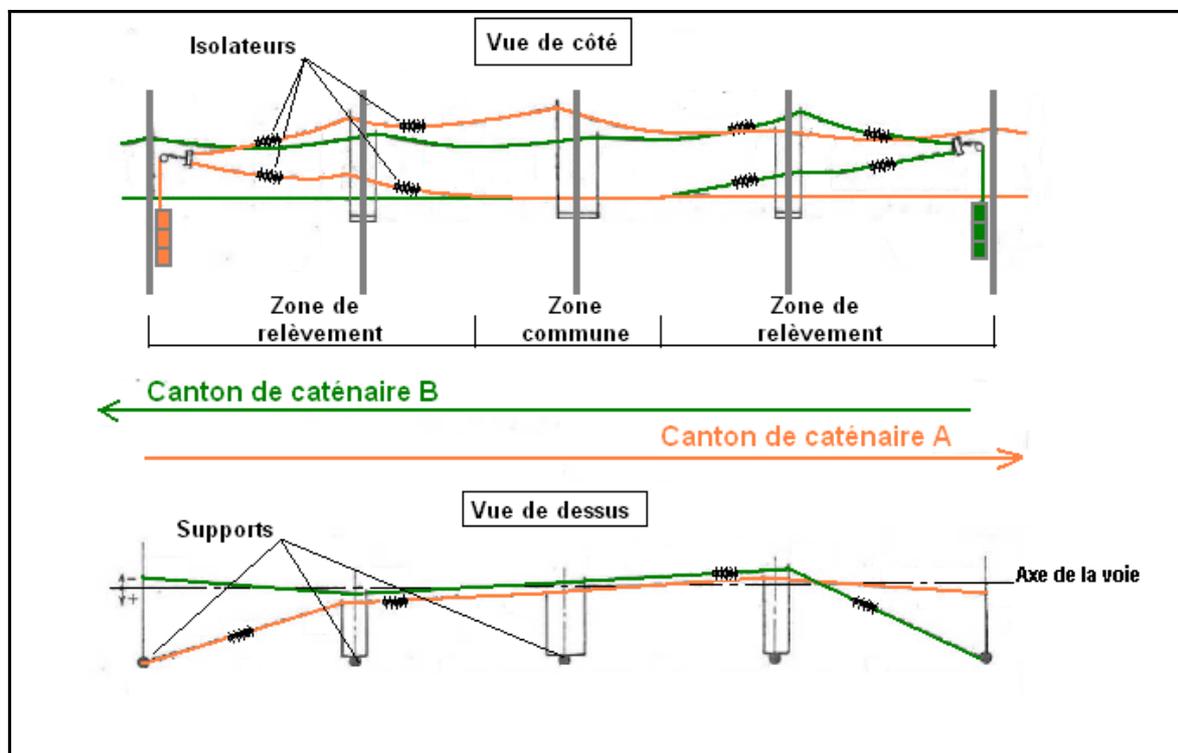


Figure 13 : Vue schématique d'un sectionnement électrique de caténaire 25 kV

C'est au niveau d'un tel sectionnement que s'est produit le choc analysé dans le présent rapport.

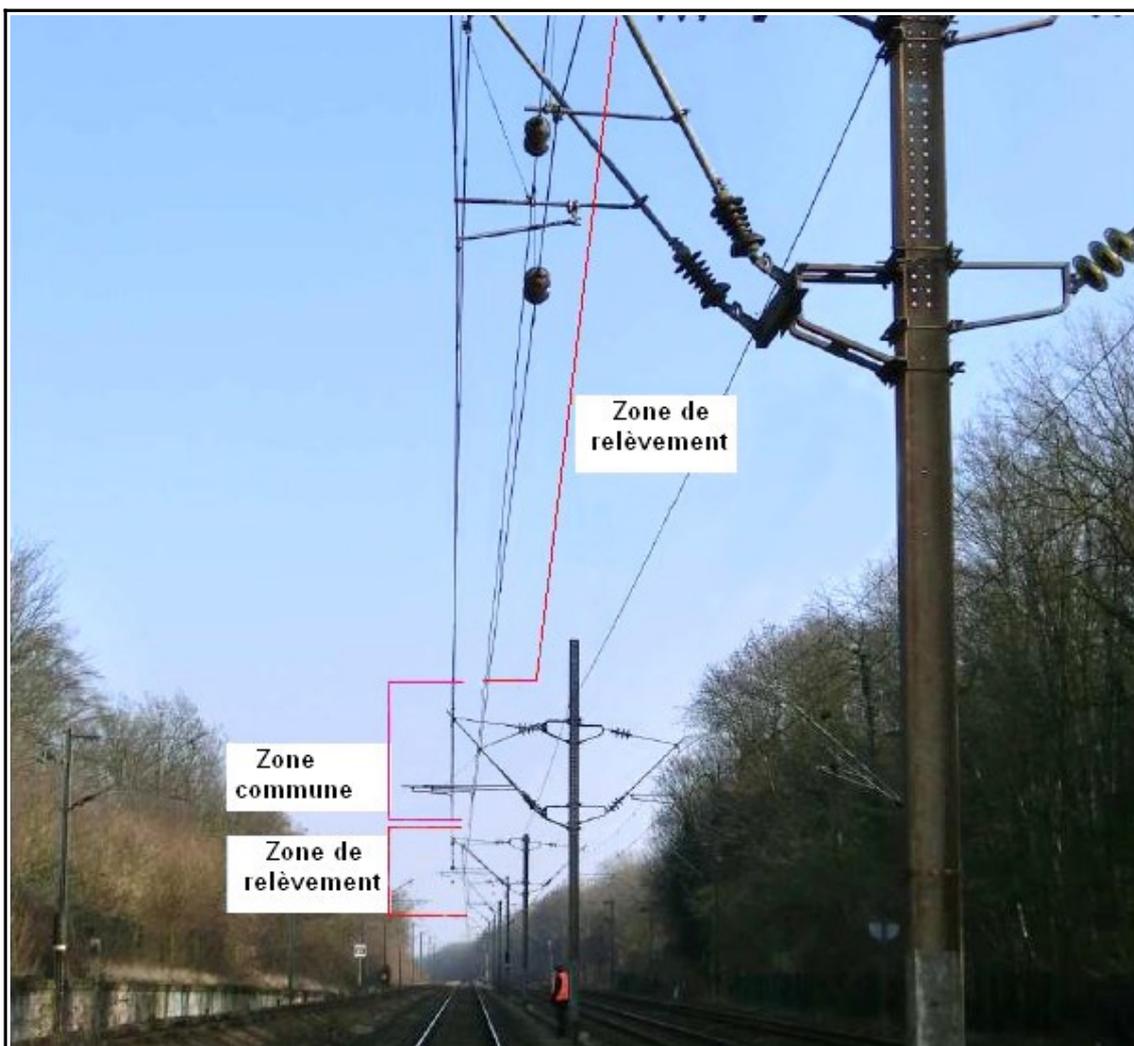


Figure 14 : Sectionnement électrique sur une caténaire 25 kV

3 - Compte rendu des investigations effectuées

3.1 - Les résumés des déclarations et des témoignages

Les résumés présentés ci-dessous sont établis par les enquêteurs techniques sur la base des déclarations et des témoignages dont ils ont eu connaissance, en retenant les éléments qui paraissent utiles à la compréhension des événements. Il peut donc y avoir des divergences entre les différents témoignages, ou avec des constats présentés par ailleurs, ou avec la description des faits retenue par les enquêteurs telle qu'elle apparaît au chapitre 4.

3.1.1 - Les déclarations de l'agent de conduite voyageant dans la cabine du train accidenté

Se rendant en voyageur à Paris-Nord pour une prise de service à 6h20, cet agent monte dans la cabine du train n° 121508 lors de son arrêt à Mitry-Claye à 6h06 et s'installe sur le siège de droite.

Le train démarre et accélère normalement jusqu'à une vitesse d'environ 110 à 120 km/h, la vitesse maximale des trains de ce type étant de 120 km/h.

L'agent consulte ses courriels et messages sur son téléphone portable quand il entend, tout à coup, un grand bruit, « *comme un coup de canon* », qui lui fait lever la tête.

L'éclairage de la cabine étant éteint, il ne voit rien mais est couvert de morceaux de verre et ressent l'air froid provenant du dehors.

La veille automatique se déclenche et provoque l'arrêt du train à hauteur des quais de Sevrans-Livry.

Il réussit à allumer l'éclairage de la cabine et constate que le conducteur est blessé et inanimé. Il alerte le régulateur par la radio sol-train et fait le nécessaire pour appeler les secours.

3.1.2 - Les déclarations du conducteur du train précédent

Le train n° 121504 part de Crépy-en-Valois à 5h05 avec 5 mn de retard. Il assure normalement la desserte des différentes gares, jusqu'à Mitry-Claye.

L'arrêt d'Aulnay-sous-Bois ayant été supprimé, le train est direct entre Mitry-Claye et Paris-Nord où il arrive à l'heure, à 5h56.

Le conducteur ne constate rien d'anormal pendant ce parcours. Il précise que, la locomotive étant en queue, il ne pouvait pas entendre, depuis la cabine où il se trouvait en tête du train, un éventuel choc au niveau des pantographes.

Pendant le stationnement en gare de Paris-Nord, il remonte le quai et prend place dans la cabine de conduite de la locomotive pour repartir à vide vers Crépy-en-Valois avec la même rame.

Il effectue les essais de remise en service de la cabine sans rien constater d'anormal.

Le départ de son train prévu à 6h15 a lieu avec 5 mn de retard.

Au niveau du poste 8, peu avant la gare de la Plaine-Stade-de-France, le disjoncteur de la locomotive se déclenche et le voltmètre de la cabine de conduite indique une absence de tension en ligne. Comme la tension ne se rétablit pas, le conducteur arrête son train conformément à la réglementation nationale en vigueur.

Informé par l'agent du poste 8 que la caténaire est normalement alimentée, il vérifie visuellement la position du pantographe arrière de sa locomotive qui est celui normalement en service. Il constate qu'il se trouve dans une position anormale, ni complètement déployé ni complètement replié, et que son archet ne touche pas la caténaire.

Appliquant le guide de dépannage de l'engin, le conducteur isole le pantographe défectueux et met en service le pantographe avant.

Cette manœuvre rétablit la tension dans la locomotive. Le conducteur achemine alors son train à faible vitesse jusqu'à la gare de la Plaine-Stade-de-France distante d'environ un kilomètre. Profitant de l'éclairage de cette gare, il vérifie l'état du pantographe défectueux et constate qu'il est désaxé d'environ 50 cm.

En accord avec le régulateur, il repart à faible vitesse en direction de la gare de triage du Bourget pour y garer son train.

Après Aubervilliers, passant sous un pont où la caténaire est plus basse qu'en pleine voie, il se produit un amorçage et la caténaire est arrachée.

3.2 - L'examen des enregistrements graphiques des trains

3.2.1 - La bande graphique du train n° 121504

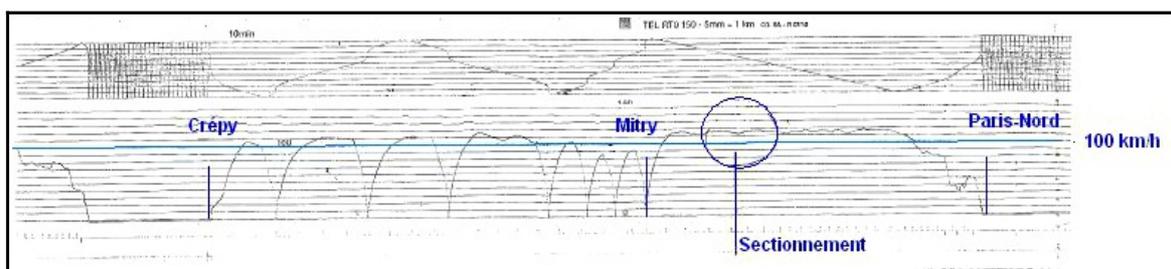


Figure 15 : Extrait de la bande graphique du train n° 121504

L'extrait ci-dessus montre que la vitesse limite de 120 km/h est bien respectée.

On observe une légère baisse de la vitesse du train vers le km 18,500, au franchissement du sectionnement de Sevrans. La suite du parcours jusqu'à Paris ne présente pas de particularité notable.

3.2.2 - La bande graphique du train accidenté

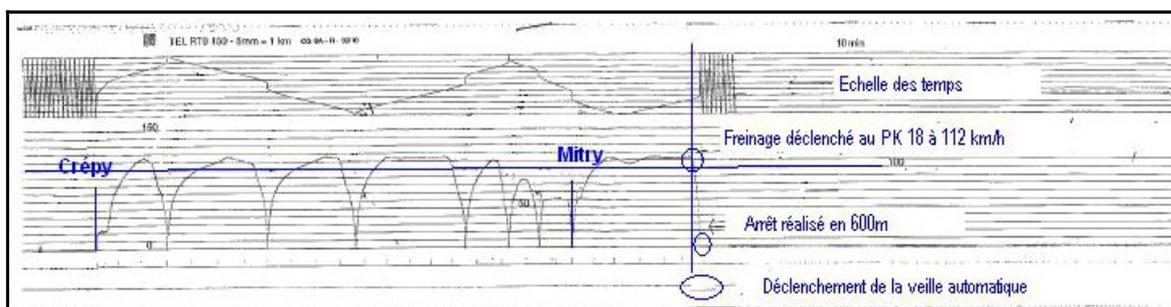


Figure 16 : Extrait de la bande graphique du train n° 121508

Il apparaît que la vitesse limite de 120 km/h est bien respectée tout au long du parcours. Le sectionnement de Sevrans où l'accident s'est produit est abordé à 112 km/h.

3.3 - Le registre d'incidents du central sous-stations

Le central sous-stations (CSS) de Paris-Nord pilote l'ensemble des installations de traction électrique de cette région. Dans ce cadre, le régulateur sous-stations note, sur un registre prévu à cet effet, les déclenchements de disjoncteurs et les incidents qui se produisent pendant sa vacation ainsi que les interventions qu'il est amené à effectuer.

Les pages de ce registre correspondant à la journée du 1^{er} février 2012 figurent en annexe 2 au présent rapport.

Il y apparaît qu'aucune disjonction n'a été observée vers 5h40, lors du passage du train n° 121504 dans la zone de l'accident. Ceci prouve que les caisses de ce train n'ont pas été touchées par un élément de caténaire sous tension, que la tension caténaire n'a pas été interrompue et que, par conséquent, le conducteur de ce train n'avait aucun moyen de soupçonner quoi que ce soit.

En revanche, des disjonctions de la sous-station de Mitry ont été constatées à 6h11. Elles correspondent à l'arrachage de la caténaire par le train n° 121508 lors de l'accident.

Des disjonctions ont également été enregistrées à 6h56 à la sous-station de Revest. Elles ont été provoquées par l'arrachage de la caténaire par le train n° 746183 évoqué au point 2.3.

Par ailleurs, l'examen des enregistrements des jours précédents montre qu'il n'y a pas eu de disjonction dans le secteur concerné par l'accident depuis le 23 janvier 2012. Aucun indice ne laissait donc présumer de la présence d'un défaut dans la caténaire.

3.4 - L'exploitation des enregistrements de la radio sol-train

L'écoute des enregistrements confirme les déclarations de l'agent de conduite présent en cabine. Elle n'apporte pas de complément significatif pour la compréhension des causes de l'accident ni sur les mesures immédiates d'alerte et de protection.

3.5 - L'emplacement et la provenance des pièces retrouvées sur les lieux

À l'intérieur de la cabine du train accidenté, il a été constaté la présence d'un gros morceau de céramique d'isolateur ainsi que de trois tessons de même provenance.



Figure 17 : Morceau et tessons d'isolateur retrouvés en cabine

À l'extérieur, différents éléments provenant de la caténaire ou des pantographes des engins concernés ont été retrouvés à proximité du lieu de l'accident.

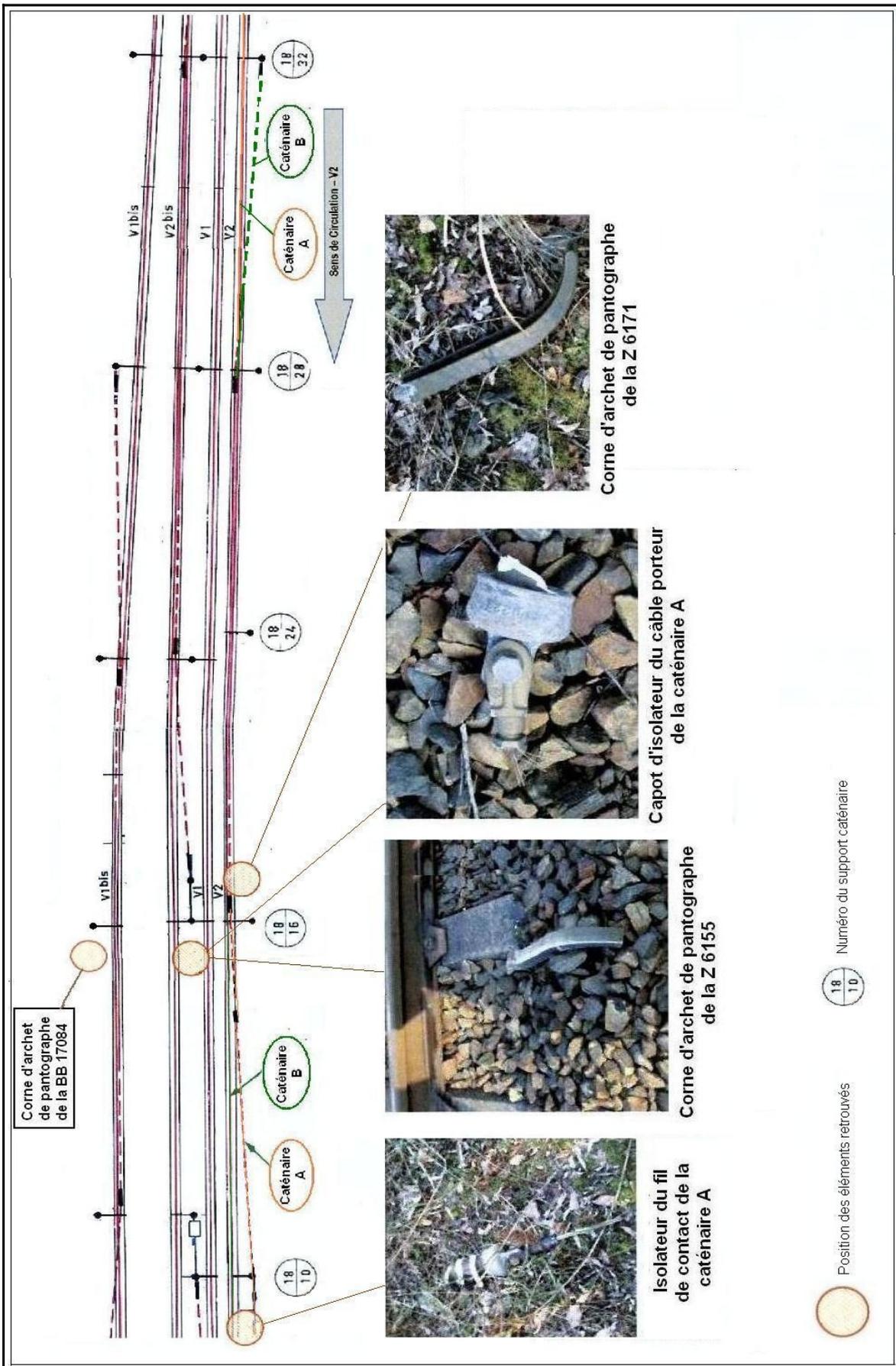
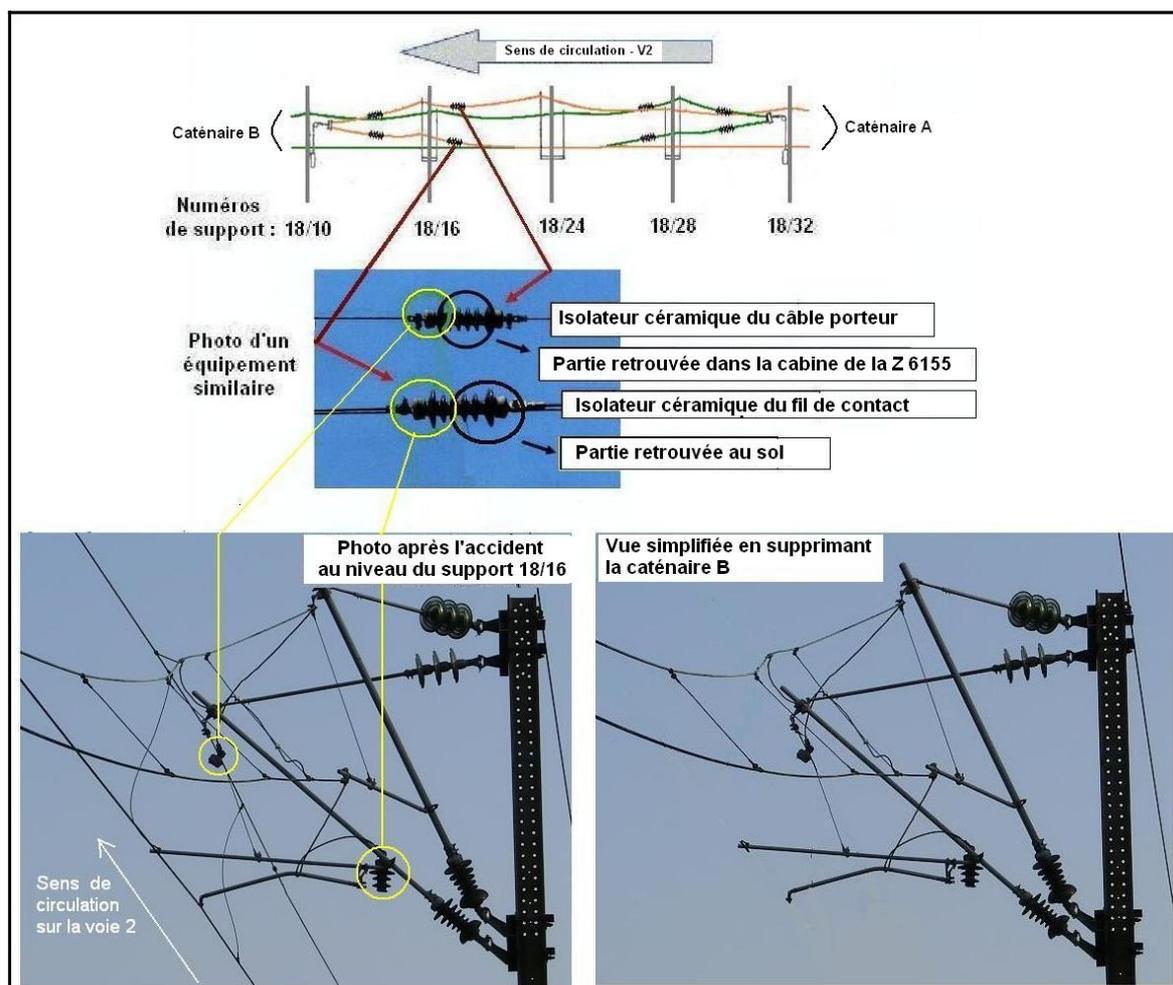


Figure 18 : Positionnement des éléments retrouvés au sol après l'accident

La figure 18 indique la position de ces éléments ainsi que la disposition des voies et des caténaires au niveau du sectionnement concerné par l'accident qui s'étend sur 200 m environ entre les supports caténaires 18/10 et 18/32.

Deux isolateurs ont été retrouvés brisés après l'accident : un isolateur du câble porteur et un isolateur du fil de contact.

Le rapprochement des morceaux retrouvés dans la cabine et au sol avec ceux restés accrochés à la caténaire au niveau du support 18/16 permet de déterminer, sans ambiguïté, l'origine des premiers et de conclure que c'est l'isolateur du câble porteur qui a pénétré dans la cabine.



3.6 - Les investigations concernant les isolateurs

3.6.1 - L'examen visuel des isolateurs brisés

Les deux isolateurs impliqués dans l'accident ont pu être reconstitués à partir des morceaux retrouvés sur place et dans la cabine de l'automotrice Z 6155.

Il s'agit d'isolateurs du type Vt 200223 en céramique émaillée d'une longueur de 40 cm et d'un poids de 11 kg. Ils sont munis, à chaque extrémité, d'un capot en fonte malléable portant un tenon d'amarrage.

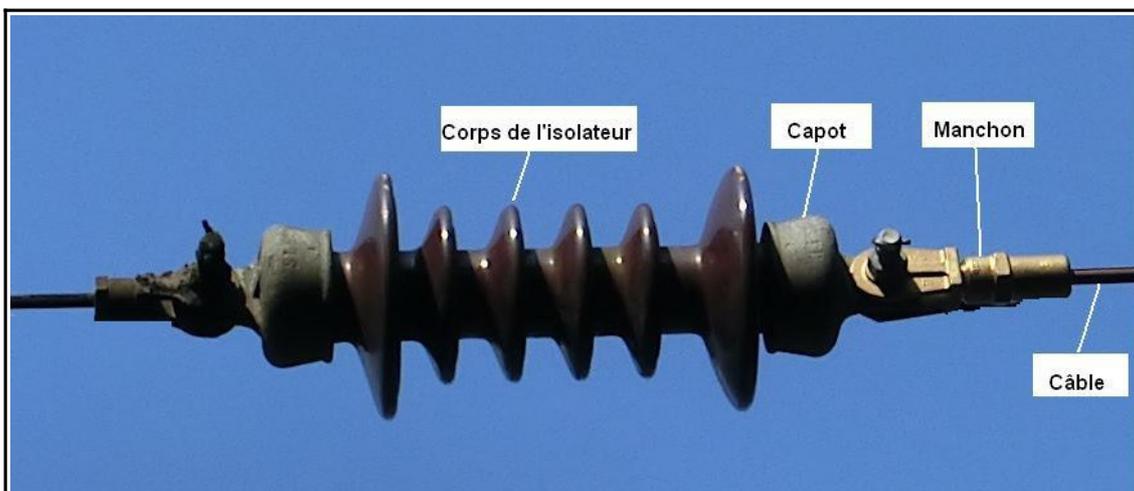


Figure 20 : Isolateur type Vt 200223 en place dans la caténaire

Ils ont été fabriqués par la Société SLEP. Ils datent de l'électrification de la ligne concernée, réalisée en 1962, et ils sont probablement en place depuis cette époque.

Leurs surfaces extérieures ne montrent pas de signe d'impact d'un éventuel projectile.

Les différentes surfaces de rupture sont très propres, signe qu'il n'y avait pas de fissure débouchant sur l'extérieur. Elles présentent un faciès lisse et régulier, sauf l'une d'entre elles qui a un aspect granuleux, dit « *en mie de pain* », indice d'un possible défaut interne de la céramique.

Il s'agit de la surface de rupture entre le morceau resté solidaire du brin aval du câble porteur et le morceau qui a pénétré dans la cabine de conduite de la Z 6155.



Figure 21 : Reconstitution de l'isolateur brisé du câble porteur

Ces constats conduisent à centrer les expertises sur l'isolateur du câble porteur qui s'est trouvé brisé ainsi que sur les isolateurs du même type utilisés dans des conditions identiques.

3.6.2 - L'expertise de l'isolateur brisé du câble porteur

L'expertise de cet isolateur a été effectuée par la société Ceralep dans le cadre de l'enquête judiciaire. Son compte rendu figure en annexe 3 du présent rapport.

L'essai de pénétration de colorant réalisé dans ce cadre montre que le cône supérieur de l'isolateur, à savoir celui qui est pris dans le capot aval, présente des traces de porosité à cœur. Ce constat est confirmé par une densité plus faible dans cette zone que dans le reste de l'isolateur.

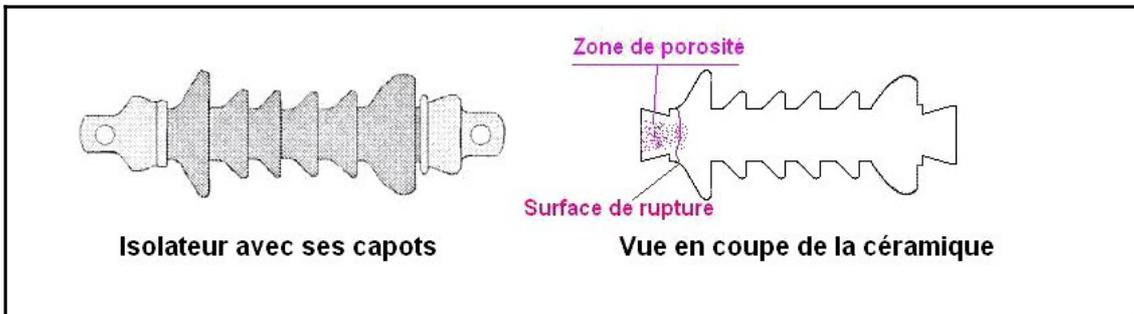


Figure 22 : Zone de porosité détectée par l'expertise

La présence de cette porosité est anormale et, étant donné le caractère inaltérable de la céramique, elle ne peut être due qu'à un défaut de fabrication.

Cette porosité permet l'infiltration de l'humidité ambiante dans la matière et, à la longue, l'apparition de fissures qui, lorsqu'elles débordent de la partie encastrée dans le capot, diminuent la résistance à la traction de l'isolateur.

De fait, l'aspect granuleux « *en mie de pain* » de la surface de rupture confirme que la défaillance de l'isolateur concerné est certainement la conséquence de cette porosité.

3.6.3 - Les essais mécaniques effectués sur un échantillon d'isolateurs

À la demande du BEA-TT, un échantillon de 14 isolateurs du même type, de la même époque, utilisés dans des fonctions semblables et installés dans le même secteur géographique que celui impliqué dans l'accident a été déposé pour expertise.

Chacun de ces isolateurs a été soumis à un essai de traction à l'agence d'essai ferroviaire (AEF).

Le compte rendu de ces essais figure en annexe 4 du présent rapport.

Pour 11 de ces isolateurs, c'est le capot en fonte qui a cédé pour des valeurs de traction comprises entre 68 et 96 kN.

Pour les 3 autres, c'est la céramique qui s'est rompue au ras du capot, pour des valeurs de traction comprises entre 90 et 106 kN.

Au total, tous les isolateurs testés ont résisté à des tractions bien supérieures à la charge de rupture de 50 kN fixée par les spécifications techniques. En outre, aucune des céramiques rompues n'a présenté un faciès de rupture « *en mie de pain* » laissant présager l'existence de porosités semblables à celles observées sur l'isolateur en cause dans l'accident.



Figure 23 : Essai de résistance à la traction

3.6.4 - La maintenance et la traçabilité des isolateurs

La céramique étant un matériau inaltérable, ses caractéristiques mécaniques et électriques n'évoluent pas avec le temps, sauf dans le cas exceptionnel où elle présente une porosité.

Sachant qu'un tel défaut de ce matériau n'est pas détectable, la maintenance des isolateurs en céramique utilisés dans l'armement des caténaires se limite à des inspections visuelles dans le cadre des tournées des agents caténaires et des nettoyages dont la périodicité est déterminée localement en fonction des conditions climatiques et environnementales.

N'étant pas considérés comme des équipements de sécurité et n'étant pas destinés à être soumis à une maintenance individualisée, ces isolateurs ne sont pas repérés individuellement.

De fait, la marque du fournisseur apparaît sur chacun d'eux, gravée sur les capots en fonte ou peinte sur l'ailette supérieure de l'isolant en céramique. La fournée ou le jour de cuisson n'y sont pas indiqués en clair ; certaines références de fabrication apparaissent, mais elles ne sont pas répertoriées.

Au final, il n'est donc pas possible de retrouver les pièces appartenant à la même fournée ou au même lot de fabrication que l'isolateur qui s'est rompu à Sevrans.

3.6.5 - Le retour d'expérience

Les isolateurs en céramique émaillée, du type de celui concerné par l'accident, sont présents en grand nombre sur les lignes du réseau ferré national électrifiées en 25 kV. Quelque 20 000 y sont installés dont la plupart est en place depuis l'électrification de ces lignes qui a commencé à la fin des années 1950, la ligne de Paris à Ormoy ayant été électrifiée en 1962.

Ils sont utilisés comme isolateurs d'ancrage, comme dans le sectionnement de Sevrans, mais aussi dans d'autres fonctions dans l'armement de la caténaire.

Pour l'ensemble de leurs utilisations, la SNCF a enregistré depuis 1992, 21 ruptures et 9 descellements de tels isolateurs et aucune augmentation de leur taux de défaillance n'a été constatée au fil des années, comme le montre l'annexe 5 au présent rapport.

Avant l'accident de Sevrans, il n'y avait eu aucun cas de rupture spontanée d'un isolateur d'ancrage sur une caténaire régularisée². En effet, ces isolateurs ne sont sollicités qu'en traction et leur niveau de charge en service, de l'ordre de 10 kN, est constant et faible par rapport à leur résistance mécanique, qui est au moins de 50 kN.

Les cas de rupture connus concernent des utilisations sur des conducteurs non-régularisés ou dans des fonctions différentes, notamment en tant qu'isolateur transversal sur portique souple.

3.6.6 - Conclusion des investigations effectuées sur les isolateurs

Il ressort de ces investigations que la rupture de l'isolateur du câble porteur en cause dans l'accident est très certainement la conséquence de la porosité constatée dans son cône supérieur, qui a conduit, sur une très longue période, à la fissuration, puis à la rupture de la céramique au ras du capot aval.

Par ailleurs, l'examen du retour d'expérience national ainsi que le bon état et la persistance des caractéristiques mécaniques des autres isolateurs du même type déposés dans le même secteur, conduisent à penser que le défaut observé sur cet isolateur présente un caractère très rare.

3.7 - Les investigations concernant l'ensemble de la caténaire

3.7.1 - La maintenance préventive

Les tournées à pied périodiques

Quatre tournées à pied d'inspection des caténaires sont normalement effectuées chaque année. Il en a été ainsi en 2011.

La dernière tournée réalisée dans le secteur de Sevrans avant l'accident date du 23 janvier 2012 ; aucune anomalie concernant l'isolateur ou, plus largement, le sectionnement en cause n'a été détectée.

² Une caténaire régularisée est une caténaire dont la tension mécanique est rendue constante par l'usage d'appareils tendeurs à contrepoids. C'est le cas des caténaires des voies principales.

L'enregistrement de la géométrie

La géométrie de la caténaire est enregistrée tous les 4 ans lors du passage de la rame de mesure.

Le dernier passage de cette rame date des 20 et 21 septembre 2011 ; aucune anomalie géométrique n'a été signalée à hauteur du sectionnement concerné.

La vérification technique entretien (VTE)

Cette vérification ne concerne pas les isolateurs. Au niveau du sectionnement concerné, seuls les appareils tendeurs (AT) y sont soumis, avec un cycle de 12 ans.

L'appareil tendeur situé immédiatement en aval de l'isolateur en cause a été vérifié le 6 septembre 2005.

La révision périodique (RP)

La révision périodique consiste à remplacer préventivement certains éléments de caténaire identifiés comme fragilisés ; sa périodicité est de 12 ans.

La dernière révision périodique de la caténaire de la voie 2 dans le secteur de l'accident est intervenue en 2005.

Pendant l'automne 2011, indépendamment des opérations préventives périodiques précitées, un diagnostic a été mené sur l'axe à 4 voies Paris-Nord – Mitry en vue d'améliorer la régularité des lignes B et K.

Les isolateurs n'ont pas été identifiés comme nécessitant une action spécifique.

Au total, les opérations de maintenance préventives de la caténaire ont été effectuées conformément au schéma en vigueur. Aucune anomalie n'a été constatée sur cette caténaire et ses isolateurs à proximité immédiate du lieu de l'accident.

3.7.2 - Les autres travaux

L'enquêteur technique a recensé les travaux qui ont été effectués, sur la caténaire incriminée ou à proximité, dans les jours et les semaines précédant l'accident et au cours desquels l'isolateur en cause ou ses connections auraient pu être fragilisés.

Dans ce cadre, il a examiné l'ensemble des fermetures de voie accordées, dans les deux mois précédant l'accident, pour des interventions de maintenance sur la voie 2 dans le secteur concerné.

Sur les 15 fermetures de voie accordées, 10 ont concerné des travaux d'entretien de la voie, sans lien avec la caténaire.

Les 5 autres fermetures de voie ont été motivées par des interventions relatives aux caténaires. Il s'est agi, plus précisément, d'opérations de vérification des mises à la terre qui ne comportent aucune intervention physique sur les installations.

Il apparaît donc qu'aucun de ces travaux n'était de nature à porter atteinte à l'intégrité de l'isolateur concerné ou à le soumettre à des contraintes compromettant sa fiabilité.

3.8 - Les investigations portant sur le matériel roulant

3.8.1 - L'examen du pantographe et de la toiture de la BB 17084

Sur la locomotive du train n° 121504, le pantographe en service était celui situé « côté Paris ». Il a été déposé à la suite de l'arrachage de la caténaire survenu à Aubervilliers lors de la circulation du train n° 746183.

Ce pantographe ainsi que la toiture de la locomotive ont été examinés le 2 avril 2012 au dépôt de La-Chapelle.

Il a été constaté que la corne gauche (par rapport au sens de la marche du train n° 121504) de son archet avait été arrachée. En présentant la corne retrouvée au niveau du sectionnement de Sevrans, près de la voie 1 bis, il est apparu clairement que celle-ci provenait de cet archet.

Une trace de choc est, par ailleurs, nettement visible sur cette corne ; elle est située à 70 cm environ du milieu de l'archet.



Figure 24 : Repositionnement de la corne brisée sur le pantographe de la BB 17084

Sur la toiture de la locomotive, aucune trace qui aurait pu être faite par le choc d'une pièce pendante n'est décelable ; seule la corne de l'archet du pantographe en service a été touchée à Sevrans.

Enfin, le carnet de bord de l'engin ne mentionne pas de signalement ou d'intervention en rapport avec d'éventuels problèmes de pantographe.

3.8.2 - L'examen du pantographe et de la toiture de la Z 6155

Le pantographe de l'automotrice est en place ; il manque la corne gauche de son archet.

De fait, la corne retrouvée sur le site de l'accident, entre les voies 1 et 2bis, correspond à la partie manquante. Elle présente une trace de choc située à 75 cm de l'axe de l'archet.

Il n'y a pas de trace de choc sur le pantographe, mais un impact important sur le caisson situé sous ce pantographe et un autre, plus petit, sur le bord d'un lanterneau, côté gauche.



Figure 25 : Vue du pantographe et de la toiture de la Z 6155 après l'accident

3.8.3 - L'examen de la face avant de la Z 6155

La vitre frontale gauche est restée en place, mais elle a été comme découpée lors du choc et elle présente un trou ovale d'une largeur d'environ 27 cm et d'une hauteur de 50 cm.

Deux traces de choc et une trace d'amorçage électrique sont visibles au-dessus de cette vitre frontale. Les traces de choc se trouvent à environ 55 et 60 cm du plan médian de la face.



Figure 26 : Face avant de l'automotrice Z 6155

3.8.4 - L'examen de l'intérieur de la cabine de conduite de la Z 6155

Une trace de choc avec une empreinte profonde est visible sur la traverse située au-dessus de la baie frontale. Les traces observées sur le capot de l'isolateur du câble porteur semblent provenir de la peinture de l'intérieur de la cabine et, de plus, la forme de ce capot correspond à celle de l'empreinte.

Aucune trace n'est discernable sur l'arrière du panneau d'instruments du pupitre de conduite, signe que l'objet pénétrant est passé au-dessus de ce pupitre sans le toucher.

Sur le haut de la cloison derrière le poste de conduite, un impact assez profond semble avoir été fait par un projectile qui aurait frappé cette paroi à grande vitesse.

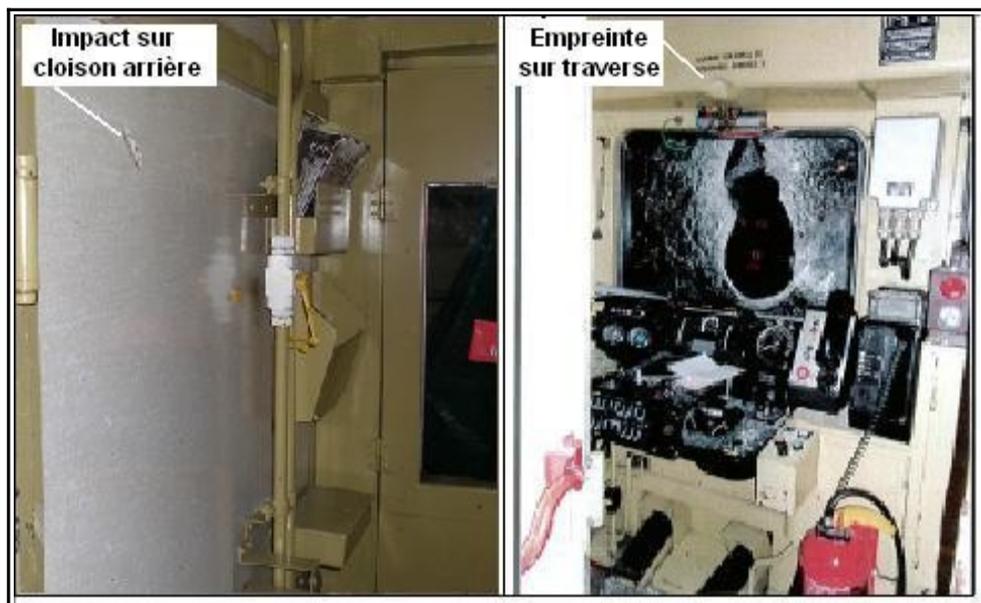


Figure 27 : Traces dans la cabine de la Z 6155

3.8.5 - La résistance aux chocs des vitres frontales

Les constatations effectuées sur la vitre frontale accidentée

La vitre frontale en cause a été examinée lors de l'expertise réalisée le 2 avril 2012 au dépôt de La-Chapelle.

Il s'agit d'une vitre de sécurité en verre feuilleté fabriquée par la société Glaverbel³.

Elle ne porte aucun marquage tel qu'un numéro de série ou une date de fabrication permettant d'identifier éventuellement un lot de fabrication.

Lors de l'accident, deux disques d'environ 27 et 15 cm de diamètre y ont été découpés. Ils ont été retrouvés dans la cabine de conduite et mis sous scellés.

Le haut de la vitre est, en outre, fendu jusqu'au bord.

Une trace de frottement d'un câble est visible sur le joint en caoutchouc de la vitre, juste au-dessus de la fente précitée, approximativement à la verticale des disques découpés.

³ Cette société s'appelle maintenant AGC Glass Europe.

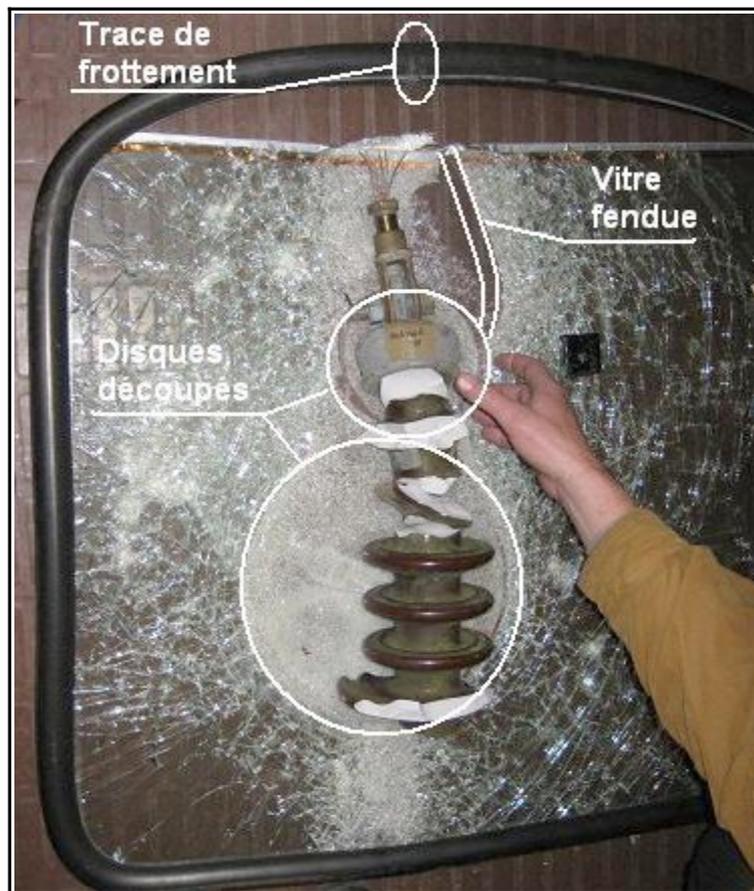


Figure 28 : Présentation de l'isolateur reconstitué sur la vitre endommagée

Les caractéristiques techniques de la vitre frontale

La vitre accidentée était d'un type homologué par la SNCF en 1991 selon la spécification STM 818 A relative aux vitres frontales des cabines de conduite.

Ce vitrage, d'une épaisseur de 14 mm, est composé :

- d'une feuille de 6 mm de verre semi-trempé, côté extérieur ;
- d'une couche chauffante ;
- d'un intercalaire en polyvinyle de butyral (PVB) de 5 mm ;
- d'une feuille de 3 mm de verre renforcé par traitement chimique.

En outre, il est équipé, comme tous les vitrages des trains de banlieue de la SNCF depuis 1995, d'un film pare-éclats en polyéthylène-téréphtalate (PET) de 125 microns collé sur sa face intérieure.

Le verre feuilleté

Le verre feuilleté ou verre laminé est constitué par un assemblage de plusieurs feuilles de verre et d'un ou plusieurs films intercalaires généralement à base de polyvinyle de butyral (PVB). Dans le cas, le plus courant, il est formé de deux couches de verre avec, entre les deux, un film en PVB. C'est le verre « *Triplex* » qui a été développé dès le début du XX^e siècle.

Par rapport au verre monolithique, le principal avantage du verre feuilleté est sa résistance à l'impact. Lors d'un choc avec un corps étranger, le verre feuilleté s'étoile, la fracture restant localisée au point d'impact sans altérer la visibilité. L'intercalaire, qui présente une bonne adhérence au verre et un taux d'allongement important avant déchirure, maintient les morceaux de verre en place, ce qui diminue le risque de coupure par les éclats. Il préserve aussi l'étanchéité de la paroi. Enfin, une partie de l'énergie d'impact est absorbée par cet intercalaire grâce à sa capacité de déformation. Ses applications sont donc principalement en rapport avec la sécurité : pare-brises de voitures et d'autres véhicules, vitrages anti-effraction, vitres pare-balles, etc.

D'autres polymères ont été progressivement mis au point et sont maintenant utilisés pour réaliser les intercalaires de certains verres laminés ; il s'agit notamment de l'éthyle-vinyle-acétate (EVA) et du polyuréthane-thermoplastique (TPU). Toutefois, le PVB reste, très largement, le polymère le plus utilisé pour la réalisation du verre laminé.

Les effets de la température sur la résistance des intercalaires en PVB

Les polymères comme le PVB présentent un état vitreux (rigide) aux basses températures et un état caoutchouteux (souple) aux températures plus élevées. La transition d'un état à l'autre ne se fait pas à une température précise comme le changement d'état d'un corps pur. Elle se fait, selon le matériau, sur un intervalle de température plus ou moins large de part et d'autre de la température de transition vitreuse « T_g », caractéristique du matériau.

La transition vitreuse se traduit par de très fortes variations des propriétés physiques du matériau et notamment de ses caractéristiques mécaniques. Par exemple, le module d'élasticité peut varier dans un rapport de 1 à 100 entre T_g-20° et T_g+20° .

Ces variations ont des effets contradictoires par rapport à l'objectif de résistance à la pénétration. Par exemple, lorsque la température baisse, le module d'élasticité augmente, accroissant la rigidité du matériau, mais l'allongement à la rupture diminue, restreignant ses capacités de déformation. Il en résulte que certains polymères voient leur résistance à la pénétration diminuer rapidement lorsque la température descend sous leur température de transition vitreuse, alors que d'autres ont une plage optimale d'utilisation plus large. Il existe même certains polymères dont la température de transition est haute et qui sont donc systématiquement à l'état vitreux aux températures courantes. Ils sont cependant très performants et utilisés comme intercalaires dans certains verres laminés spéciaux.

Pour les vitres feuilletées avec intercalaires en PVB utilisées dans les applications ferroviaires, la température de transition du polymère est comprise entre 15 et 20 °C, et la résistance du vitrage à la pénétration varie significativement avec la température lorsque celle-ci balaye la gamme des températures que l'on rencontre couramment en Europe.

Le BEA-TT a tenu plusieurs réunions de travail avec les sociétés Saint-Gobain et AGC-Glass-Europe qui sont les principaux fournisseurs des vitrages équipant les véhicules ferroviaires français, ainsi qu'avec le Centre d'Ingénierie du Matériel (CIM) de la SNCF, afin de connaître l'évolution de la résistance aux chocs des vitrages ferroviaires sur la gamme des températures rencontrées couramment en France métropolitaine.

Les principaux éléments recueillis, les avis exprimés ainsi que l'analyse qu'en fait le BEA-TT font l'objet de l'annexe 6 au présent rapport.

Il en ressort que pour un verre laminé avec intercalaire PVB :

- l'aptitude à résister à la pénétration lors d'un choc contre un projectile est optimale sur un intervalle de températures assez étroit qui s'étend approximativement entre 15 et 25 °C ;

- cette aptitude diminue aux températures situées en dehors de cet intervalle, mais l'ampleur et l'allure de cette diminution sont mal connues, car les résultats des essais dépendent de nombreux facteurs, dont la forme, la matière et la vitesse du projectile ;
- les estimations de la baisse de l'énergie de choc absorbable, lorsque la température décroît de 20 à 0 °C, varient entre 30 % et 80 % selon les sources ;
- cette baisse est également significative aux températures estivales, mais elle est moins critique pour la sécurité des conducteurs, car la température des vitrages frontaux n'atteint des niveaux élevés qu'à l'arrêt et aux basses vitesses.

Il apparaît également que des intercalaires en polyuréthane-thermoplastique (TPU) confèrent aux vitrages une meilleure résistance à la pénétration aux basses températures, mais que le comportement de ces vitrages sur l'ensemble des températures courantes n'est pas mieux connu que celui des vitrages avec intercalaires en PVB.

L'évolution des normes, spécifications et obligations réglementaires relatives aux vitrages frontaux des véhicules ferroviaires

Les deux tableaux ci-après retracent l'évolution depuis 1960 des normes, spécifications et obligations réglementaires applicables aux vitres frontales des véhicules circulant sur le réseau ferré national à la vitesse maximale de 120 km/h.

Normes et spécifications applicables aux vitres frontales d'un véhicule circulant à la vitesse maximale de 120 km/h			
Référence	Dates d'application	Exigences vis-à-vis de la pénétration des projectiles	
		Projectile	Énergie
Spécification SNCF ST 250	1960 – 1983	Exigences non spécifiées	
Spécification SNCF STM 818 A	1983 – 1995	Cylindro-pyramidal en béton	4 800 J à 20 °C 1 000 J à 0 °C
Norme française NF F 15-818	Depuis 1995	Cylindro-pyramidal en aluminium	2 600 J à 20 °C 2 600 J à 0 °C
Fiche UIC UIC 651	Depuis 1986	Hémisphérique en aluminium	3 000 J à une T° comprise entre 15 et 35 °C
Norme européenne EN 15152	Depuis 2007	Hémisphérique en aluminium	3 000 J à 20 °C 3 000 J à 0 °C

Il convient de noter que, compte tenu du caractère plus agressif du projectile cylindro-pyramidal en aluminium par rapport au projectile hémisphérique spécifié par la fiche UIC ou par la norme européenne, et par rapport au projectile en béton prescrit par la STM 818 A, la norme française NF F 15-818 est le référentiel en vigueur le plus exigeant même si le niveau d'énergie qu'elle impose est légèrement plus faible que celui de la norme européenne et nettement moindre que celui de la STM 818 A pour la température de 20 °C.

À l'inverse, la fiche UIC est le moins rigoureux de ces référentiels, car elle autorise une large plage de choix de la température d'essai, permettant ainsi aux fournisseurs de réaliser leurs essais d'homologation à la température où leurs vitrages ont le meilleur comportement.

Obligations réglementaires applicables aux vitres frontales d'un véhicule circulant sur le réseau ferré national conventionnel				
Nature	Dates d'application	Caractère	Domaine d'application	Exigences concernant les vitres frontales
Règles internes SNCF	Avant 1983	Obligatoire	Matériels SNCF	ST 250
Règles internes SNCF	1983 – 1995	Obligatoire	Matériels SNCF	STM 818 A
Règles internes SNCF	Depuis 1995	Obligatoire pour les nouveaux matériels	Matériels SNCF	NF F 15-818
Arrêté « Matériel roulant » du 5 juin 2000 puis du 1 ^{er} juillet 2004	Depuis 2000	Obligatoire pour l'admission de nouveaux matériels sur le RFN	Matériels circulant sur le RFN	NF F 15-818 ou UIC 651
Code de l'Union Internationale des Chemins de fer (UIC)	Depuis 1986	Obligatoire en trafic international	Matériels des entreprises ferroviaires et des réseaux de l'UIC	Fiche UIC 651
Spécification Technique d'Interopérabilité « STI locomotives »	Depuis 2011	Obligatoire pour les matériels neufs ou transformés	Matériels circulant sur le réseau ferroviaire transeuropéen.	EN 15152

Le cas des automotrices Z 6100 de la SNCF

Lors de leur construction dans les années 1969 à 1971, les automotrices de type Z 6100, ont été équipées de vitrages frontaux en verre feuilleté de 9 mm répondant à la spécification technique de la SNCF référencée ST 250.

À partir de 1979, ils ont été remplacés par des vitrages de 13 mm toujours selon la spécification ST 250.

À partir de 1983, la SNCF a monté sur ces rames des vitrages de 14 mm respectant la nouvelle spécification technique du matériel référencée STM 818 A.

Enfin, à partir de 1995, ces vitrages ont été équipés de films pare-éclats collés sur leur face intérieure.

Ces équipements sont conformes aux règles internes de la SNCF ainsi qu'aux réglementations nationale et internationale applicables aux matériels mis en service avant 1995.

Les effets du chauffage de la vitre frontale sur sa résistance

Les vitres frontales des matériels sont toutes équipées d'un système de dégivrage électrique inclus dans l'épaisseur du vitrage.

Le dégivrage de la vitre de la Z 6155 n'était pas en service lors de l'accident malgré une température extérieure d'environ – 4 °C. En revanche, le chauffage de la cabine fonctionnait.

Les calculs thermiques effectués par un fournisseur de vitrages de la SNCF permettent d'estimer que, pour une telle température extérieure, une vitesse du train de 120 km/h et une température de 18 °C dans la cabine, la température de l'intercalaire en PVB est de :

- – 1,1 °C lorsque le dégivrage de la vitre est éteint ;
- + 9,9 °C lorsque le dégivrage est en service.

Or, ainsi qu'il l'a été indiqué précédemment, la résistance aux chocs de ces vitres est diminuée aux basses températures. Il est donc très probable que, dans les circonstances de l'accident, l'allumage du dégivrage aurait permis au vitrage d'absorber une plus grande quantité d'énergie et, à défaut d'éviter complètement la pénétration en cabine des projectiles, de diminuer sensiblement leur vitesse et donc leur caractère dangereux.

À l'inverse, le chauffage de la vitre étant généralement démuné de thermostat, ces mêmes calculs montrent qu'avec une température extérieure de 20 °C et en présence de soleil, le fonctionnement du dégivrage peut faire monter la température de l'intercalaire à plus de 70 °C si l'engin est à l'arrêt ou circule à très faible vitesse. À ces températures, la résistance mécanique de l'intercalaire en PVB est très faible.

Or, un engin peut commencer une journée de roulement au petit matin en montagne avec une température extérieure négative et la continuer au soleil en plaine avec une température extérieure de plus de 30 °C. Si le dégivrage n'est pas arrêté en temps utile par le conducteur, la température du vitrage peut monter à un niveau qui le rend, à nouveau, très vulnérable aux chocs.

3.8.6 - *Le retour d'expérience*

Les vitres frontales du matériel ferroviaire sont souvent endommagées par des chocs d'origines diverses. Chaque année, environ 10 % de ces vitres sont remplacées.

Toutefois, il est extrêmement rare que de tels chocs aient eu des conséquences très graves pour le personnel en cabine. Avant l'accident de Sevrans, le seul cas connu date du 24 janvier 1981 où un conducteur avait été tué après le choc de son automotrice contre un bloc de béton suspendu, depuis un pont, à hauteur de sa vitre frontale.

Cet accident avait conduit la SNCF à équiper les ponts-routes de grillages de protection et à adopter la spécification STM 818 A renforçant les exigences de résistance aux chocs des vitres frontales des matériels ferroviaires.

Depuis cette date, il n'y a pas eu d'accident similaire, les vitrages s'opposant efficacement à la pénétration des projectiles. Toutefois, des projections d'éclats de verre vers l'intérieur des cabines ayant blessé des agents de conduite, un film pare-éclats est collé, depuis 1995, sur la face interne de ces vitrages.

Les organismes nationaux d'enquêtes des différents États-membres de l'Union Européenne ont également été questionnés. Aucun n'avait connaissance d'un événement grave de ce type ayant eu lieu sur son réseau.

3.9 - La mécanique de l'accident

3.9.1 - La mécanique de la défaillance de la caténaire

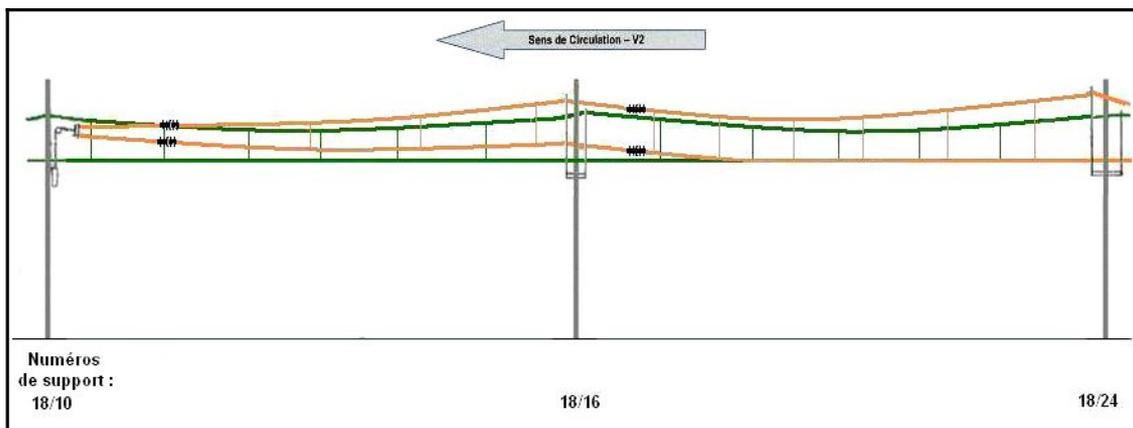


Figure 29 : Situation nominale de la caténaire

À la lumière des données exposées précédemment, il apparaît que l'origine de l'accident considéré se trouve dans la rupture de l'isolateur d'ancrage du câble porteur de la caténaire situé en amont du support 18/16. Le tronçon amont de ce câble porteur, avec la plus grande partie de l'isolateur, pend alors, soutenu par les pendules qui sont restés attachés au fil de contact.

La figure ci-après montre l'état de la caténaire au moment de l'arrivée du train n° 121504.

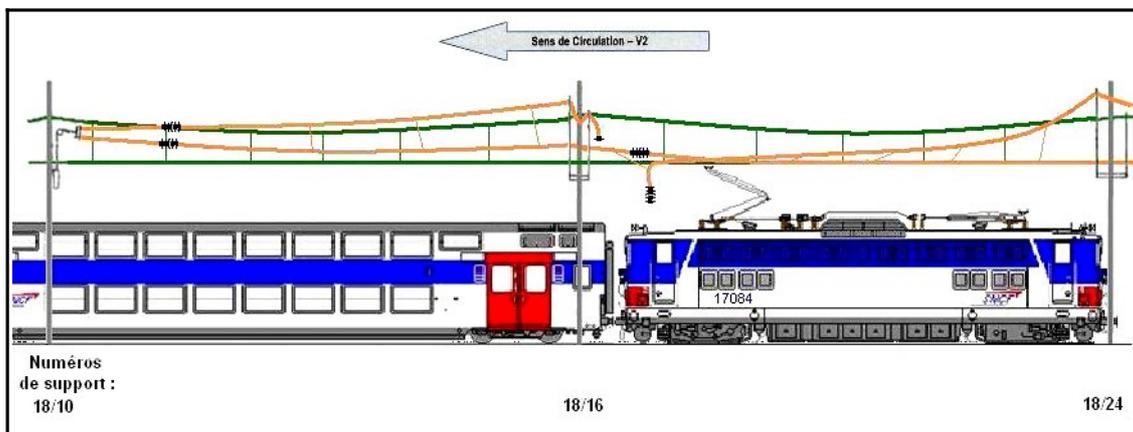


Figure 30 : Situation de la caténaire au passage du train n° 121504

Le pantographe de la BB 17084 heurte le tronçon pendant du câble porteur. La sous-station ne disjoncte pas, signe que ce câble n'a pas touché la caisse de la locomotive.

Le pantographe est détérioré et la corne isolante gauche de son archet est arrachée. Toutefois, il continue à assurer le captage et le train poursuit sa route sans que le conducteur ne s'aperçoive de l'incident.

Sous le choc, certains pendules qui soutenaient le tronçon pendant du câble porteur sont arrachés, mais le fil de contact et son isolateur d'ancrage restent en place.

Le tronçon pendant du câble porteur descend de deux mètres environ et l'isolateur se retrouve à hauteur de la vitre frontale de l'automotrice Z 6155 du train n° 121508.

La figure ci-dessous visualise la situation de la caténaire après le passage du train n° 121504 et lors de l'arrivée du train n° 121508.

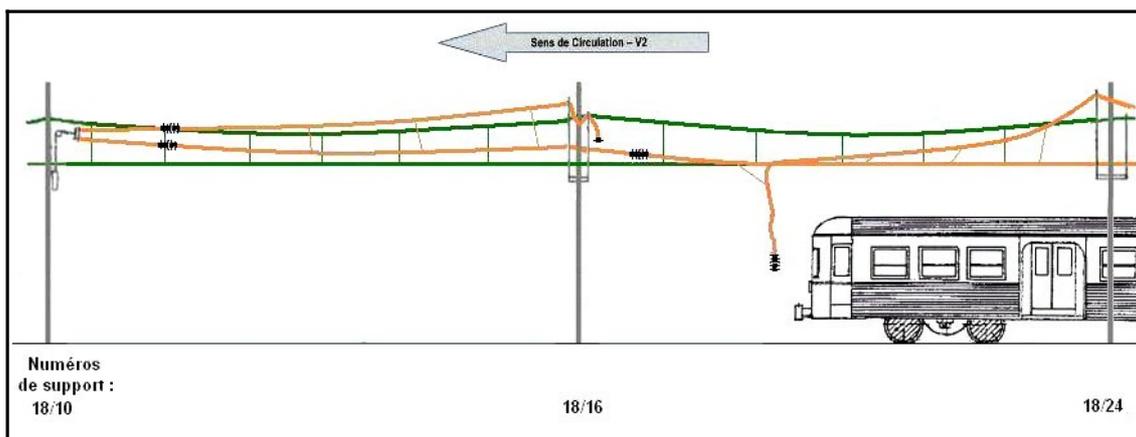


Figure 31 : Situation de la caténaire à l'arrivée du train n° 121508

Après avoir percuté l'isolateur du câble porteur, ce dernier train arrache la caténaire brisant alors l'isolateur du fil de contact.

3.9.2 - L'énergie mise en jeu dans le choc



Figure 32 : Les masses des différents morceaux de l'isolateur retrouvés

Les différents morceaux de l'isolateur du câble porteur qui ont été retrouvés ont une masse totale de 9,8 kg dont 2,5 kg étaient attachés au brin aval de ce câble.

Comme la masse nominale de l'isolateur complet est de 11 kg, les différents débris qui ont été éparpillés et qui n'ont pas été retrouvés, représentent une masse d'environ 1,2 kg.

Sachant qu'une partie de ces débris a pu être détachée lors de la rupture initiale de l'isolateur ou lors du choc contre le pantographe du premier train, il résulte que le tronçon d'isolateur qui a été percuté par le train accidenté présentait une masse comprise entre 7,3 et 8,5 kg.

La vitesse de ce train était de 112 km/h. L'énergie mise en jeu dans son choc contre l'isolateur était donc comprise entre 7,3 $(112/3,6)^2 / 2$ et 8,5 $(112/3,6)^2 / 2$, c'est-à-dire entre 3,5 et 4,1 kJ.

Sachant que la céramique de l'isolateur est une matière dure qui n'absorbe pratiquement aucune énergie lors d'un choc, il apparaît que, pour éviter l'intrusion du projectile dans la cabine, le vitrage aurait dû absorber une énergie comprise entre 3,5 et 4,1 kJ.

3.9.3 - La mécanique des dommages dans la cabine

Au moment de l'accident, la température extérieure est de $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ et le dispositif de dégivrage des vitres frontales du train n° 121508 n'est pas allumé. La résistance du vitrage étant diminuée par le froid, celui-ci ne peut absorber qu'une partie de l'énergie cinétique en jeu.

Dans le choc, le tronçon de l'isolateur percuté se brise. Les morceaux détachés du capot à tenon découpent un grand disque de 27 cm dans le vitrage et sont projetés vers le fond de la cabine blessant grièvement le conducteur et laissant un impact profond dans la paroi arrière.

Parallèlement, le capot à tenon, resté solidaire du câble, découpe dans le vitrage un cercle de 15 cm, pénètre dans la cabine et en ressort par le haut de la baie frontale après avoir heurté violemment la traverse supérieure.

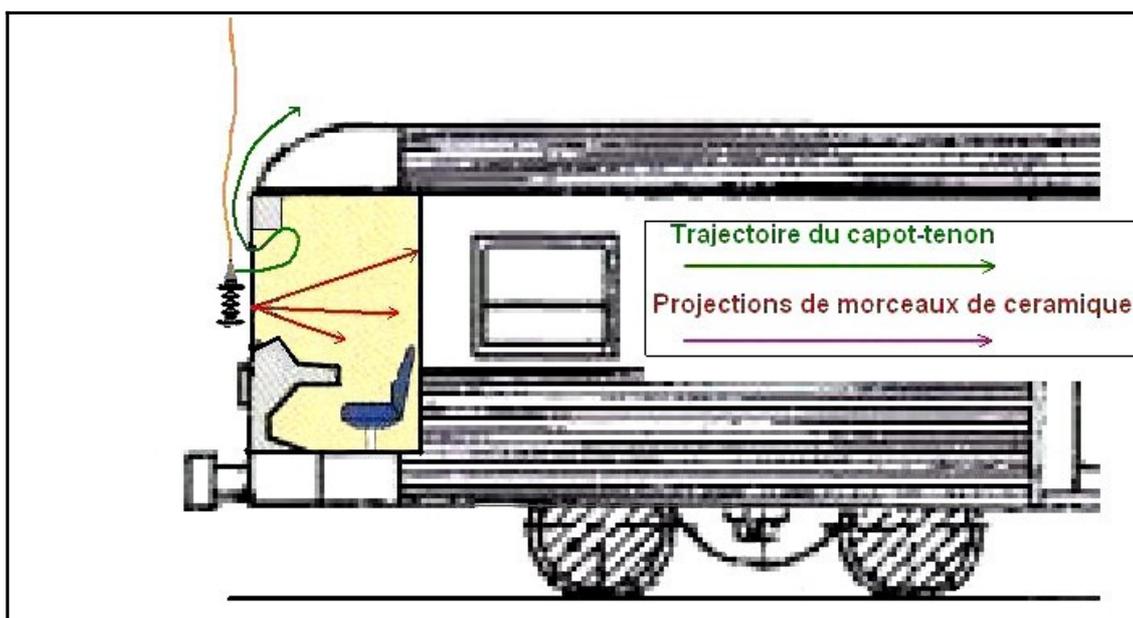


Figure 33 : La mécanique des dommages dans la cabine de conduite

4 - Déroulement de l'accident

4.1 - La circulation du train n° 121508

Dans la nuit du 31 janvier au 1^{er} février 2012, après le passage du dernier train de la soirée sur la voie 2 de la ligne de Paris-Nord à Ormoy-Villers, l'isolateur d'ancrage du câble porteur de la caténaire situé juste en amont du support 18/16 se brise au ras de son capot aval.

La plus grande partie de l'isolateur se met à pendre au bout du tronçon amont du câble, à une hauteur comprise entre celle du fil de contact et celle des toitures des matériels roulants.

Le premier train de la matinée est le train n° 121504 assuré par une rame réversible à deux niveaux avec la locomotive BB 17084 en queue.

À 5h43, le pantographe de cette locomotive heurte le tronçon pendant du câble porteur. Il subit des dommages, mais continue à assurer le captage du courant de telle sorte que le train poursuit sa route sans que le conducteur ne s'aperçoive de l'incident.

Dans le choc, certains pendules qui soutenaient le tronçon pendant du câble porteur sont arrachés. Celui-ci descend alors d'environ deux mètres et le morceau d'isolateur, qui lui est accroché, se retrouve à hauteur des vitres frontales des automotrices.

Le train n° 121508 est assuré par une unité multiple de trois automotrices avec la Z 6155 en tête. Lors de sa préparation, compte tenu de la température extérieure négative, le conducteur allume le chauffage de sa cabine ; il n'allume pas le dispositif de dégivrage.

Ce train part de Crépy-en-Valois à 5h33 ; il dessert les différentes gares de son parcours.

Lors de l'arrêt qu'il effectue à Mitry-Claye, un agent de conduite se rendant à Paris-Nord pour prendre son service monte en cabine et s'installe sur le siège de droite.

À 6h06, le train part de Mitry-Claye et accélère jusqu'à la vitesse de 114 km/h.

Quatre minutes plus tard, au km 18,176, il percute à 112 km/h l'isolateur qui pendait à hauteur de sa vitre frontale, à 60 cm environ à gauche de l'axe de la voie.

Dans le choc, l'isolateur se brise, mais le vitrage, dont la résistance est diminuée par le froid, ne peut s'opposer à la pénétration violente des morceaux de cet isolateur à l'intérieur de la cabine. L'un d'eux blesse grièvement à la tête le conducteur qui perd aussitôt connaissance.

Le train arrache la caténaire de la voie 2 sur 150 m environ et s'arrête, sous l'effet de la veille automatique, à hauteur des quais de la gare de Sevrans-Livry.

4.2 - Les mesures immédiates et les secours

L'agent de conduite qui voyageait dans la cabine du train accidenté appelle aussitôt le régulateur par la radio. Il lui signale que le conducteur est gravement blessé et demande que les secours médicaux d'urgence soient appelés.

Les pompiers du centre de secours de Livry sont sur place à 6h23. Ils sont rejoints peu après par une équipe du centre d'Aulnay et par le service mobile d'urgence et de réanimation de Bobigny (SMUR 93).

Le conducteur grièvement blessé est acheminé par l'ambulance du SMUR vers l'hôpital Beaujon à Clichy.

L'agent de conduite voyageant en cabine, commotionné et choqué, est conduit à l'hôpital Ballanger de Villepinte.

Les voyageurs, dont aucun n'est blessé, sont évacués de la rame accidentée en gare de Sevrans-Livry.

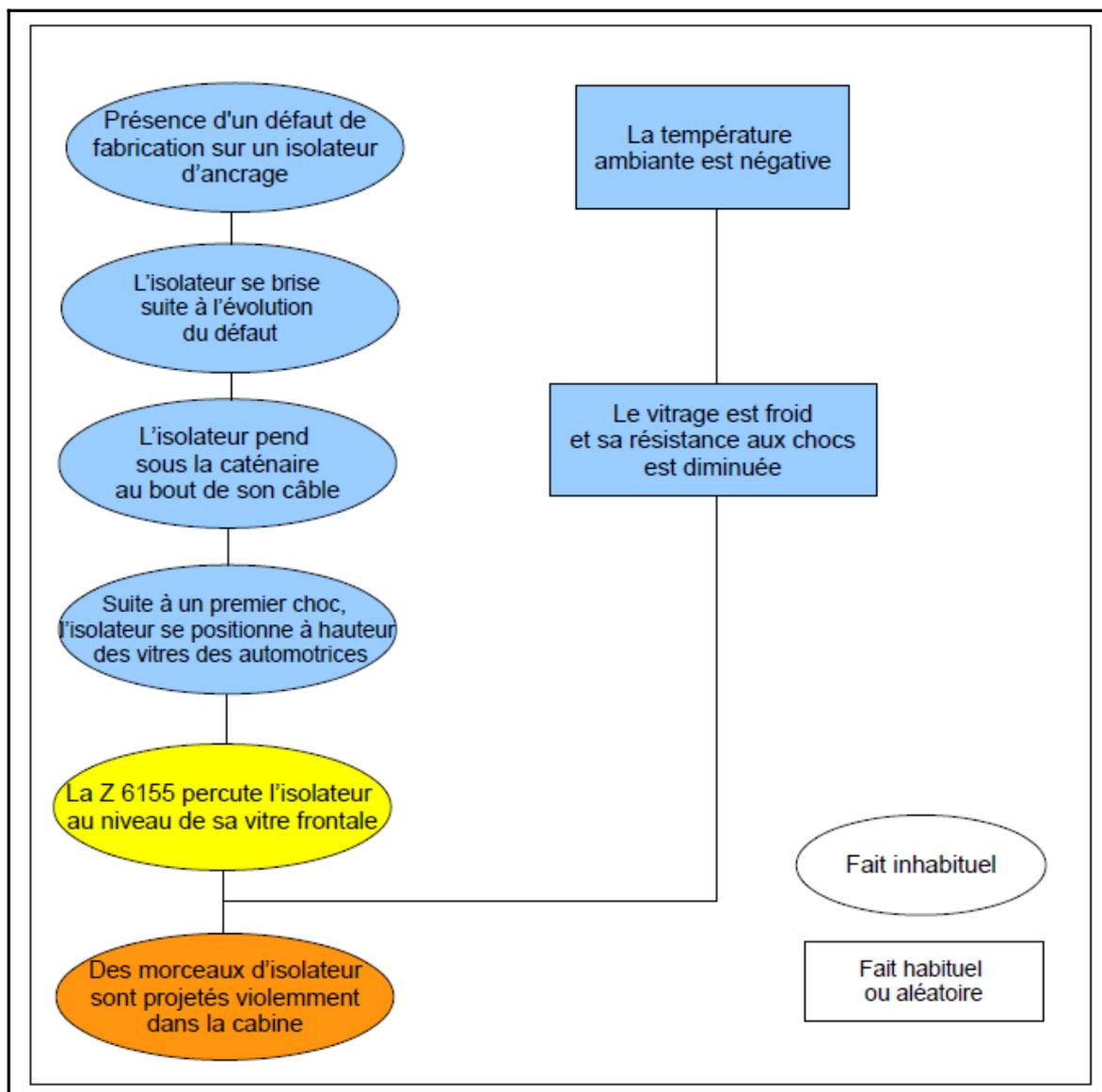
Le conducteur du train n° 849903, circulant en marche à vue sur la voie 1, constate qu'un pantographe du train n° 121508 est arraché et engage le gabarit de la voie 1.

Les voies 1 et 2 étant obstruées respectivement par le train n° 849903 et par le train n° 121508 accidenté, la circulation ferroviaire est fortement perturbée : en particulier, 463 trains de banlieue sont retardés, 25 sont supprimés et 17 voient leur parcours limité.

La caténaire est remise en état dans l'après-midi et la soirée du 1^{er} février 2012. La situation normale est rétablie le lendemain à 1h30.

5 - Analyse des causes et facteurs associés, orientations préventives

5.1 - Les causes de l'accident



L'accident est dû à la rupture de l'isolateur d'ancrage du câble porteur de la caténaire, situé sur un sectionnement électrique au km 18,176, qui a d'abord été heurté par le pantographe de la locomotive du train n° 121504 avant de pendre à hauteur de la vitre frontale gauche de l'automotrice de tête du train qui suivait.

Cette rupture est très certainement la conséquence d'un défaut de fabrication de l'isolateur concerné dont la céramique présentait des traces de porosité. Celles-ci ont favorisé le développement progressif de fissures qui ont diminué sa résistance à la traction.

Les conséquences du choc contre l'isolateur ont été aggravées par la moindre résistance que présentait, en raison du froid, le vitrage frontal de l'automotrice qui n'a pas pu empêcher que des morceaux de céramique soient violemment projetés à l'intérieur de la cabine de conduite.

Cette analyse conduit à rechercher les orientations préventives dans les deux domaines suivants :

- le suivi de la tenue dans le temps des isolateurs en céramique ;
- la protection offerte par les vitres frontales par temps froid.

5.2 - Le suivi de la tenue dans le temps des isolateurs en céramique

Il est peu probable que l'isolateur à l'origine de l'accident survenu à Sevrans soit le seul qui ait été affecté par le défaut de fabrication détaillé au paragraphe 3.6.2 du présent rapport. Les méthodes de la production industrielle en série ainsi que l'impossibilité de détecter un tel défaut lors des contrôles de fabrication et de réception autorisent à supposer que d'autres exemplaires, appartenant au même lot de fabrication ou pas, pourraient en être porteurs et donc être susceptibles de se rompre à plus ou moins long terme.

Les règles de traçabilité des isolateurs actuellement en vigueur sur le réseau ferré national ne permettent ni d'identifier ni de localiser ceux qui appartiendraient à un lot de fabrication donné ou qui auraient été produits par un fabricant déterminé, à une certaine époque. Il n'est donc pas possible de les vérifier ou de les éliminer préventivement de façon ciblée.

La vérification, à la demande du BEA-TT, d'un échantillon d'isolateurs du même type que celui de Sevrans et utilisés dans des fonctions similaires a montré que ceux-ci avaient des caractéristiques de résistance mécanique conformes à celles qui sont requises pour les pièces neuves.

L'examen du retour d'expérience tenu par la SNCF montre, par ailleurs, que le taux de défaillance de ces isolateurs est faible et n'augmente pas avec les années.

La rupture d'un isolateur ne conduit très généralement qu'à un incident de caténaire sans conséquence humaine et ce n'est qu'à la suite d'un ensemble d'événements aléatoires que l'isolateur en cause dans l'accident de Sevrans s'est retrouvé pendant à hauteur de la vitre frontale d'une cabine de conduite.

À la lumière de ces éléments, le BEA-TT formule la recommandation suivante :

Recommandation R1 (SNCF Infra, RFF) :

Surveiller l'évolution du nombre de ruptures d'isolateur en céramique de type Vt 200223.

En cas d'augmentation significative de ce nombre, déposer les isolateurs de ce type utilisés dans les caténaires de voies principales dans des positions telles qu'ils pourraient être heurtés par les circulations ferroviaires, en cas de rupture.

5.3 - La protection offerte par les vitres frontales par temps froid

Les vitres frontales des matériels ferroviaires jouent un rôle important pour la sécurité des conducteurs, notamment vis-à-vis des chocs contre des objets ou des projectiles d'origine accidentelle (pièces du matériel roulant ou de l'infrastructure, ballast, glaçons...) ou malveillante.

À cet effet, ces vitrages sont soumis à des spécifications et des normes qui se sont renforcées au fil du temps et qui ont contribué à ce que les conséquences humaines de ce type événement soient très rares, tant sur le réseau ferré national (RFN) que sur les réseaux étrangers

Dans ce cadre, les exigences de la SNCF ont toujours été et sont encore supérieures à celles qui sont en vigueur au niveau national et européen. Toutefois, les matériels actuellement en circulation sur le RFN sont de provenances et de générations diverses et leurs vitrages répondent à des normes et des spécifications dont le niveau d'exigence est très variable, notamment vis-à-vis de la résistance aux chocs aux températures inférieures ou égales à 0 °C.

Par ailleurs, les caractéristiques des chauffe-vitres sont également diverses, certains étant munis d'un thermostat et d'autres pas, et les règles d'utilisation de ces appareils, qui sont du ressort des entreprises ferroviaires, peuvent influencer sur le niveau de protection des vitrages par temps froid, mais aussi par temps chaud et ensoleillé.

Recommandation R2 (Entreprises ferroviaires autorisées à circuler sur le réseau ferré national) :

Répertorier les caractéristiques des vitrages frontaux et des chauffe-vitres équipant les matériels roulants ainsi que les règles d'utilisation de ces chauffe-vitres.

Pour les matériels équipés de vitrages frontaux ne respectant pas la norme européenne EN 15152 ou la norme française NF F 15-818 ou une norme nationale équivalente, étudier la possibilité et la pertinence d'améliorer la protection par temps froid contre la pénétration de projectiles dans les cabines de conduite, par exemple en précisant les règles d'utilisation des chauffe-vitres ou en planifiant le remplacement des vitrages par des éléments offrant une meilleure résistance aux chocs à basse température.

De plus, l'enquête a mis en évidence un manque de connaissances partagées par les fournisseurs et les prescripteurs sur la tenue aux chocs des vitrages et, notamment, sur sa sensibilité à la température. Cette méconnaissance se traduit par un risque d'évolution défavorable de la norme européenne EN 15152, la suppression des exigences à 0 °C et le passage à une seule température d'essai ayant été demandés par certains participants aux travaux de normalisation.

Recommandation R3 (Bureau de Normalisation Ferroviaire ; SNCF, Saint-Gobain, et AGC Glass en tant que participants aux travaux de normalisation nationaux et européens) :

Veiller à ce que les évolutions de la norme européenne EN 15152 relative aux vitres frontales des matériels ferroviaires tiennent compte de la variabilité en fonction de la température de la résistance aux chocs des vitrages et garantissent le maintien, voire l'amélioration, de la protection des conducteurs sur la totalité de la gamme des températures couramment rencontrées sur le réseau ferré national et plus particulièrement aux températures négatives.

Le BEA-TT invite également les entreprises ferroviaires autres que la SNCF à œuvrer dans le même sens dans les instances de normalisation nationales ou internationales auxquelles elles participent.

Compte tenu de la très large utilisation des verres laminés dans des fonctions de sécurité, non seulement dans le domaine ferroviaire mais aussi dans d'autres modes de transport, le constat du peu de données disponibles sur leur sensibilité à la température pose question.

L'amélioration de la sécurité ne peut pas se fonder uniquement sur l'augmentation du nombre ou de l'épaisseur des couches de vitrage. Des solutions optimisées couvrant l'ensemble des températures courantes rencontrées en France, voire en Europe, ne peuvent être trouvées que si les connaissances de base sont suffisantes.

C'est pourquoi le BEA-TT invite les sociétés AGC Glass et Saint-Gobain à acquérir, par des essais, des études ou tout autre moyen, une connaissance réelle de la résistance aux chocs des verres utilisés pour les vitrages frontaux des matériels ferroviaires, sur l'ensemble de la plage des températures rencontrées couramment sur le réseau ferré national, y compris par temps chaud avec le chauffe-vitre en service, et à partager ces connaissances dans le cadre des travaux de révision de la norme EN 15152.

6 - Conclusions et recommandations

6.1 - Les conclusions

L'accident est dû à la rupture de l'isolateur d'ancrage du câble porteur de la caténaire, situé sur un sectionnement électrique au km 18,176, qui a d'abord été heurté par le pantographe de la locomotive du train n° 121504 avant de pendre à hauteur de la vitre frontale gauche de l'automotrice de tête du train qui suivait.

Cette rupture est très certainement la conséquence d'un défaut de fabrication de l'isolateur concerné dont la céramique présentait des traces de porosité. Celles-ci ont favorisé le développement progressif de fissures qui ont diminué sa résistance à la traction.

Les conséquences du choc contre l'isolateur ont été aggravées par la moindre résistance que présentait, en raison du froid, le vitrage frontal de l'automotrice qui n'a pas pu empêcher que des morceaux de céramique soient violemment projetés à l'intérieur de la cabine de conduite.

6.2 - Les recommandations

Au vu de ces éléments, le BEA-TT formule les recommandations suivantes :

Recommandation R1 (SNCF Infra, RFF) :

Surveiller l'évolution du nombre de ruptures d'isolateur en céramique de type Vt 200223.

En cas d'augmentation significative de ce nombre, déposer les isolateurs de ce type utilisés dans les caténaires de voies principales dans des positions telles qu'ils pourraient être heurtés par les circulations ferroviaires, en cas de rupture.

Recommandation R2 (Entreprises ferroviaires autorisées à circuler sur le réseau ferré national) :

Répertorier les caractéristiques des vitrages frontaux et des chauffe-vitres équipant les matériels roulants ainsi que les règles d'utilisation de ces chauffe-vitres.

Pour les matériels équipés de vitrages frontaux ne respectant pas la norme européenne EN 15152 ou la norme française NF F 15-818 ou une norme nationale équivalente, étudier la possibilité et la pertinence d'améliorer la protection par temps froid contre la pénétration de projectiles dans les cabines de conduite, par exemple en précisant les règles d'utilisation des chauffe-vitres ou en planifiant le remplacement des vitrages par des éléments offrant une meilleure résistance aux chocs à basse température.

Recommandation R3 (Bureau de Normalisation Ferroviaire ; SNCF, Saint-Gobain, et AGC Glass en tant que participants aux travaux de normalisation nationaux et européens) :

Veiller à ce que les évolutions de la norme européenne EN 15152 relative aux vitres frontales des matériels ferroviaires tiennent compte de la variabilité en fonction de la température de la résistance aux chocs des vitrages et garantissent le maintien voire l'amélioration de la protection des conducteurs sur la totalité de la gamme

des températures couramment rencontrées sur le réseau ferré national et plus particulièrement aux températures négatives.

En complément de cette dernière recommandation, le BEA-TT invite également les entreprises ferroviaires autres que la SNCF à œuvrer dans le même sens dans les instances de normalisation nationales ou internationales auxquelles elles participent.

Par ailleurs, le BEA-TT invite les sociétés AGC Glass et Saint-Gobain à acquérir, par des essais, des études ou tout autre moyen, une connaissance réelle de la résistance aux chocs des verres utilisés pour les vitrages frontaux des matériels ferroviaires, sur l'ensemble de la plage des températures rencontrées couramment sur le réseau ferré national, y compris par temps chaud avec le chauffe-vitre en service, et à partager ces connaissances dans le cadre des travaux de révision de la norme EN 15152.

ANNEXES

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête

Annexe 2 : Extrait du registre d'incidents du régulateur sous-stations

Annexe 3 : Compte rendu de l'expertise de l'isolateur brisé

Annexe 4 : Rapport des essais de traction effectués sur un échantillon d'isolateurs

Annexe 5 : Retour d'expérience sur les ruptures d'isolateurs de type Vt200223

Annexe 6 : Éléments sur la résistance aux chocs des vitrages ferroviaires

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête



MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE,
DES TRANSPORTS ET DU LOGEMENT

*Bureau d'enquêtes sur les accidents
de transport terrestre*

Le Directeur

La Défense, le 11 février 2012

DECISION

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

Vu le code des transports et notamment le titre II du livre VI de la 1^{re} partie relatif à l'enquête technique après un accident ou un incident de transport ;

Vu le décret n°2004-85 du 26 janvier 2004 modifié relatif aux enquêtes techniques après accident ou incident de transport terrestre ;

Vu les circonstances de l'accident impliquant un train de voyageurs survenu le 1er février 2012 à Sevrans (Seine-Saint-Denis) ;

décide

Article 1 : Une enquête technique est ouverte en application du titre II du livre VI de la 1^{re} partie du code des transports sur le choc d'un train de voyageurs contre un isolateur décroché de la caténaire de la ligne ferroviaire de Paris à Ormoy-Villiers, survenu le 1er février 2012 à Sevrans (93).

Le directeur du BEA-TT

Claude AZAM

Annexe 2 : Extrait du registre d'incidents du régulateur sous-stations

SERVICE		h 00 à h 30		h 30 à h 00		h 00 à h 00		h 30 à h 00			
REGULATION		Masure		Houy-Van		Gousson		Masure			
D.P.P.											
I CATEGORIE RAIL											
Heures		VOIE		TRAIN		ELEMENTS		ICR			
de à								Rail			
								Rai			
DECLIENEMENTS											
HEURE		SOUS-STATION		DISJONCTEURS							
05:06		Revest		ZBP + A DC + rail							
06:11		Gitiy		ZBP + A DC + rail							
06:17		Gitiy		ADP							
N.R.C											
Heure		POSTE		VOIE		TRAIN		Reconn			
CHANGEMENTS D'ALIMENTATION											
Heures		SECOURS		DELESTE		MOTIF					
de à											
COUPURES D'URGENCE											
Secours		Durée		MOTIF							
STATISTIQUES											
TABLE		Période		CC		AI		RDCR		FSC	
1		J		14/19		A		/		/	
		N		39/68		/		/		/	
2		J		1/5		/		/		/	
		N		3/3		/		/		/	

HEURES		DEROULEMENT DES EVENEMENTS		OBSERVATIONS	
DEBUT					
FIN					
04:30		Il y a un problème sur le système de contrôle par ordinateur.		ADP	
		AD sur les signaux que le signal est en défaut.			
		sur le site lors de la circulation sur V17.			
		Depuis une autre circulation est parti sur V17 et a une copie.			
06:10		Préparation manuel du DP de Gitiy.			
		Demande arrêt des circulations et à ce que les postes soient baissés.			
06:23		Arrêt des circulations complètes.			
		Départ localisé sur V2 entre Gitiy et Souren.			
		Chô, Reg est avisé - Protection du système V2 demandée.			
06:34		CSARE avisé par ordinateur.			
06:35		Al Gitiy en avisé qu'un problème a surgi sur le site sur le système de contrôle par ordinateur.			
		Son poste semble tomber aussi d'après le régulateur.			
		Le train est en V2 et se trouve à Souren.			
06:38		Système V2.			
06:56		ADT est avisé de se rendre à Souren.			
		3 DS (avec 1 fermeture manuelle).			
		I-D entre la plaine et Auberville.			
		CR0 avisé avec demande d'arrêt des circulations.			
07:06		Départ localisé sur le site la plaine.			
		A Auberville V1, poste pris dans la caténaire.			
07:09		Départ localisé au PS 7.2.			
07:15		CR0 avisé qu'il y a un problème de caténaire au site.			
07:54		Le CR0 avisé qu'il y a un problème de caténaire au site (A1504 et 146-103) d'être à l'origine des incidents.			

Annexe 3 : Compte rendu de l'expertise de l'isolateur brisé



Z254



SAINT-VALLIER le 12/06/2012

RAPPORT Z 254

COMPTE RENDU D'EXPERTISE D'UN ISOLATEUR CERAMIQUE DE CATENAIRE 25 kV

1) MATÉRIEL CONTRÔLE :

Sur ordonnance du TGI de Bobigny, M. Forray expert désigné nous a présenté un isolateur cassé en de nombreux morceaux :



CERALEP
Isolateurs en céramique pour haute et très haute tension

1/3

2) CONTROLES à EFFECTUER :

« Découper les deux capots en fonte et le scellement en plomb antimoine dans le sens diamétral afin de dégager la zone conique de la céramique afin de découvrir les parties de la porcelaine cachées. Effectuer un ressuage à la fuchsine conformément à l'article 25 de la norme CEI 60383-1 sur les 5 morceaux »

➤ *Examen visuel avant découpe :*

Sur les 2 extrémités (parties de l'isolateur où pourraient apparaître en premier les zones poreuses), on constate :

une zone suspecte à cœur sur la partie supérieure (dans le sens des ailettes)

pas de zone suspecte à l'œil sur la partie inférieure



➤ *Découpe des 2 capots d'extrémité :*



Constat : oxydation importante de la face interne des capots avec remontée d'humidité au dessus des rondelles (probablement amiantées)

- Vérification de l'absence de porosité suivant CEI 60383 § 25:
Pression appliquée : 30×10^6 N/m² pendant 7 heures (produit 210 x 10⁶)



- Examen des échantillons:

partie supérieure



Résultats : pénétration du colorant

partie inférieure



pas de pénétration du colorant

3) CONCLUSIONS :

Les essais de porosité montrent qu'il y a des traces de porosité à cœur sur les échantillons prélevés dans la partie supérieure de l'isolateur. Il n'a pas été trouvé de porosité dans l'échantillon prélevé dans la partie inférieure.

Ces constats sont confirmés par les mesures physiques réalisées sur ces mêmes échantillons avec une différence importante de densité entre bord et cœur (2,41 contre 2,33) et une porosité à cœur estimée à 0,49 %.

Hypothèses de la rupture : la partie centrale est en partie désagrégée, favorisant l'apparition de fentes en fonction du temps, des infiltrations et des conditions climatiques. Quand les fentes dépassent la partie encadrée, il y a rupture mécanique du support

S. UCEDA

Annexe 4 : Rapport des essais de traction effectués sur un échantillon d'isolateurs

AGENCE D'ESSAI FERROVIAIRE



Laboratoire Matériaux - Environnement - Structures

21, avenue du Président ALLENDE

94407 VITRY-SUR-SEINE Cedex

TEL : 419 351 / FAX : 419 369

Essais de traction sur isolateurs en matière céramique Vt 200223

DOC029058 / MES012498

Les résultats présentés dans ce document ne se rapportent qu'aux produits soumis à l'essai, suivant les conditions indiquées dans son contenu.

INFRA – IG.TE.ZC13

A l'attention de M Alain HEGO

- Identification de l'échantillon : 14 isolateurs céramique Vt 200223 symbolisés 0.883.0215
- Conditions de prélèvement : Déposés du service dans la zone de l'accident du 01/02/2012
- Spécification d'essai : Vt 200223
- Date des essais : 7 Juin 2012

Objet :

Suite à la rupture en ligne d'un isolateur Vt 200223 le 01/02/2012, la direction de l'Ingénierie a demandé à l'AEF la réalisation d'essais de traction sur 14 isolateurs identiques déposés dans la zone de l'accident afin de vérifier leur conformité aux prescriptions du document Vt 200223.

Description :

Les essais de traction ont été effectués sur un dynamomètre RKM 250 équipé d'un capteur de force de capacité 200 kN (classe 0,5).

Les paramètres d'essai sont les suivants :

- Mise en charge à 1 mm/min,
- Maintien à 70% de la charge minimale garantie (3500 daN) pendant 1 minute,
- Mesure de la force à rupture.

L'annexe 1 reprend une photographie du montage d'essai.

Résultats :

Un tableau de synthèse ainsi qu'un exemple de courbe sont repris en annexe 2.

Commentaire :

L'ensemble des isolateurs soumis aux essais de traction présente un effort de rupture conforme aux prescriptions du document Vt 200223.

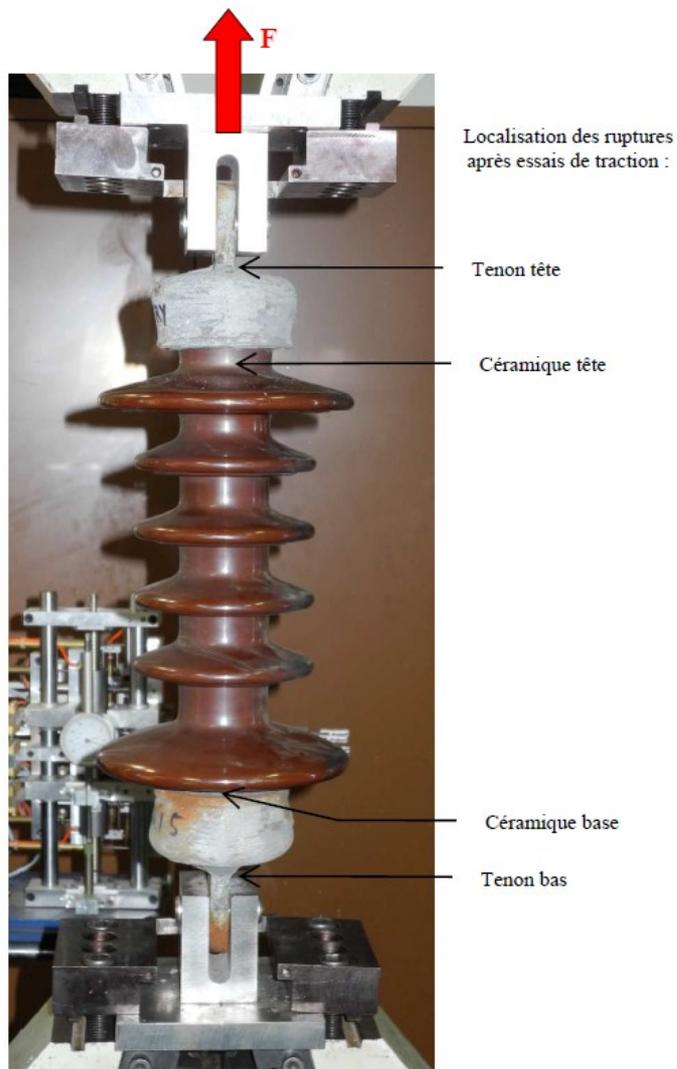
Élaboration du rapport :		Approbation du rapport :	
Nom :	Cécile VAUTIER	Nom :	Jean-Luc TRANCART
Fonction :	Chargée de prestation	Fonction :	Responsable du pôle

Document certifié numériquement par le responsable de l'unité technique :
This document has been digitally signed
It is possible to verify online that this report is genuine by clicking here
<http://www.certeurope.fr/verifier-une-signature.php>



PATRICK LALLET
Le : 15/08/2012

Montage d'essai :



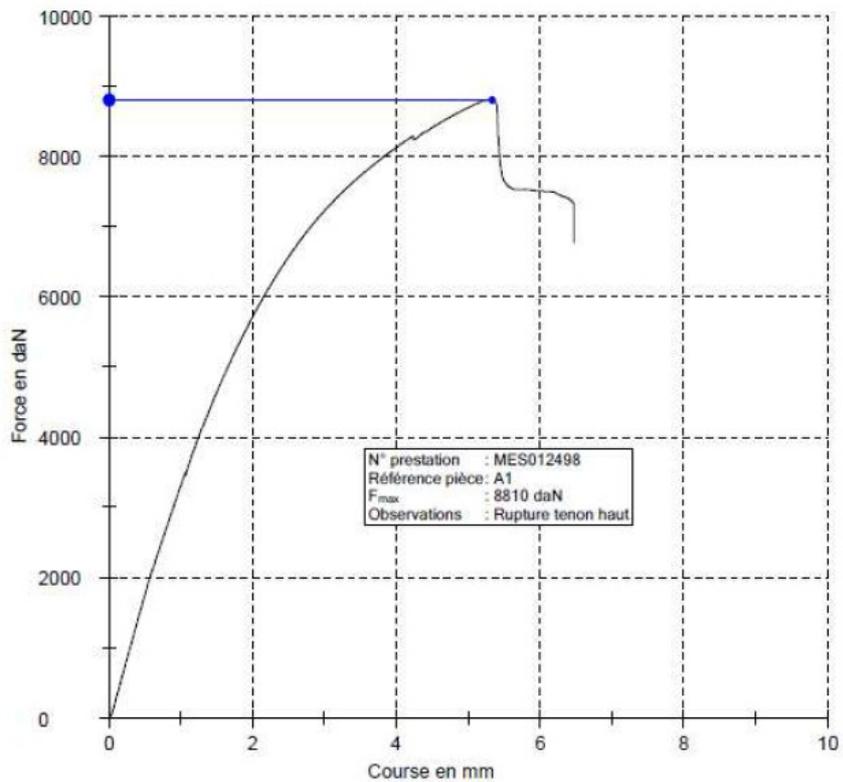
Essais de traction sur isolateurs en matière céramique Vt 200223

DOC029058 / MES012498

ANNEXE 2

Les résultats présentés dans ce document ne se rapportent qu'aux produits soumis à l'essai, suivant les conditions indiquées dans son contenu.

Exemple de courbe obtenue :



Essais de traction sur isolateurs en matière céramique Vt 200223

DOC029058 / MES012498

ANNEXE 2

Les résultats présentés dans ce document ne se rapportent qu'aux produits soumis à l'essai, suivant les conditions indiquées dans son contenu.

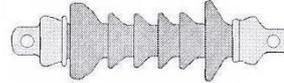
Synthèse des résultats obtenus :

Référence isolateur	Effort à rupture (daN) Prescription : ≥ 5000 daN	Localisation de la rupture
A1	8810	Rupture tenon tête
A2	9580	Rupture tenon bas
A3	8410	Rupture tenon bas
A4	8630	Rupture tenon tête
A5	10600	Rupture céramique tête
A6	8730	Rupture tenon bas
A7 *	6800	Rupture tenon bas
A8	8930	Rupture céramique base
A9	9030	Rupture tenon tête
A10	9590	Rupture céramique tête
A11	7860	Rupture tenon bas
A12	9630	Rupture tenon tête
A13 *	10000	Effort à rupture > 10000 daN
A13 bis	10200	Rupture tenon tête
A14	9260	Rupture tenon tête

* Les isolateurs réf. A7 et A13 ont été testés sur un dynamomètre ZWICK 1474 équipé d'un capteur de force de capacité 100 kN (classe 0,5) avec des paramètres d'essai identiques à ceux utilisés pour les autres isolateurs. L'effort de rupture de l'isolateur réf. A13 étant supérieur à 100 kN, l'essai de traction a été recommencé sur le dynamomètre équipé du capteur de capacité 200 kN.

Annexe 5 : Retour d'expérience sur les ruptures d'isolateurs de type Vt 200233

EVENEMENTS SUR LES ISOLATEURS CERAMIQUES D'ANCRAGE TYPE 200 223



ISOLATEURS INSTALLES SUR VS OU VP VITESSE <= 60 km/h (caténaire non-régularisée)

Années	Equipement / Famille de problème							Total
	Ancrage		Transversal console à bec	Transversal portique souple		inconnu		
	Descellement	Rupture	Rupture	Descellement	Rupture	Descellement	Rupture	
1992				1				1
1993								0
1994								0
1995								0
1996								0
1997								0
1998								0
1999				1				1
2000					2			2
2001		1					1	2
2002			1					1
2003								0
2004					2	1		3
2005	1				2			3
2006			1	1	2			4
2007	1							1
2008				1	2			3
2009								0
2010	1				2			3
2011					1			1
2012								0
Total	3	1	2	4	13	1	1	25

ISOLATEURS INSTALLES SUR VP VITESSE > 60 km/h (caténaire régularisée)

Années	Equipement / Famille de problème							Total
	Ancrage		Transversal console à bec	Transversal portique souple		inconnu		
	Descellement	Rupture	Rupture	Descellement	Rupture	Descellement	Rupture	
1992								0
1993								0
1994								0
1995								0
1996								0
1997					1			1
1998					1			1
1999								0
2000								0
2001								0
2002								0
2003								0
2004								0
2005								0
2006					1			1
2007								0
2008								0
2009								0
2010								0
2011				1				1
2012		1						1
Total	0	1	0	1	3	0	0	5

Incident Sevrans
Livry du 1/02/2012

Annexe 6 : Éléments sur la résistance aux chocs des vitrages ferroviaires

Les éléments ci-après sont tirés de la réunion du 13 novembre 2012 organisée par le BEA-TT avec des experts représentant deux fournisseurs de vitrages ferroviaires et le centre d'ingénierie du matériel de la SNCF.

1- Température de transition vitreuse Tg du PVB utilisé dans les vitrages ferroviaires

Les polymères comme le polyvinyle de butyral (PVB) présentent un état vitreux (rigide) aux basses températures et un état caoutchouteux (souple) aux températures plus élevées. La transition d'un état à l'autre ne se fait pas à une température précise comme le changement d'état d'un corps pur. Elle se fait, selon le matériau, sur un intervalle de température plus ou moins large de part et d'autre de la température de transition vitreuse Tg, caractéristique du matériau.

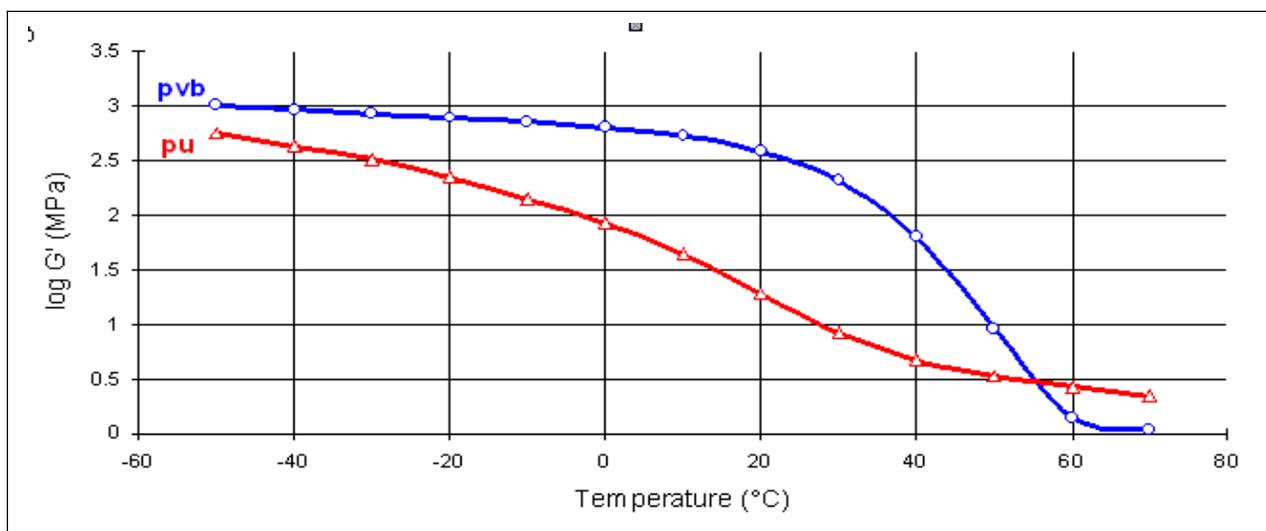
Un expert d'un fournisseur explique que la transition vitreuse du PVB ne se fait pas brutalement à une température précise, mais progressivement sur une plage comprise entre 15 et 35 °C.

Une autre expert situe cette température Tg vers 30 °C.

Pour un expert de la SNCF, la température Tg a une définition précise et les essais faits à l'agence d'essai ferroviaire (AEF) sur un échantillon de PVB utilisé dans les applications ferroviaires permettent de la situer à 15,5 °C.

2- Effets de la transition vitreuse sur les caractéristiques mécaniques du PVB

Un expert d'un fournisseur a fourni une courbe d'évolution du module d'élasticité du PVB ainsi que celle du polyuréthane (PU).

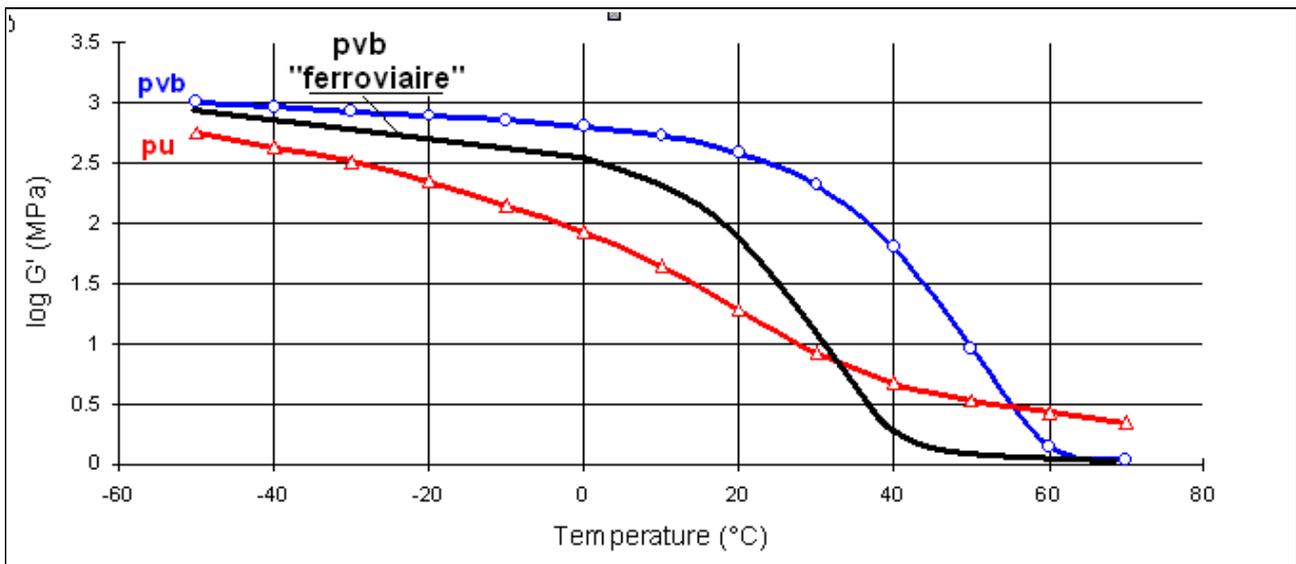


Le graphique ci-dessus montre que, dans l'intervalle de températures qui va de -10 à 60 °C et qui inclut la température de transition vitreuse du PVB, le logarithme du module d'élasticité de ce matériau varie de 0,2 à 2,8. Ce module varie donc approximativement dans un rapport de 1 à 400.

Le PU est réputé plus stable, mais, sur le même intervalle de températures, son module varie quand même dans un rapport de 1 à 70.

La courbe ci-dessus concerne un PVB générique. À la demande de la SNCF, un expert d'un fournisseur a fourni un graphique reprenant les courbes des différents PVB utilisés pour les applications ferroviaires. Il ap-

paraît que ces courbes ne sont pas fondamentalement différentes entre elles, et, par rapport au PVB générique, on observe un décalage de 20 °C lié à l'usage de plastifiants différents.



Les autres caractéristiques physiques et mécaniques du PVB (limite de rupture, allongement à la rupture...) varient également dans de larges proportions au voisinage de la température de transition.

3- Influence de la température sur la résistance aux chocs des vitrages

On a vu ci-dessus que, quand la température décroît nettement au-dessous de T_g, le PVB devient progressivement rigide et cassant. Aux températures nettement supérieures à T_g, il se ramollit et perd progressivement sa résistance mécanique.

Dans ces deux cas, son aptitude à absorber l'énergie du choc d'un projectile tend vers des niveaux mal connus, mais probablement très faibles.

Dans des conditions normales en France, la température interne d'un vitrage peut varier couramment entre -10 °C (en hiver en circulation) et 60 °C (en été au soleil à l'arrêt ou à basse vitesse). Dans cet intervalle de températures, qui est approximativement centré sur la température de transition vitreuse du PVB, il est clair que l'énergie de choc absorbable par un tel vitrage est susceptible de varier dans des proportions très importantes.

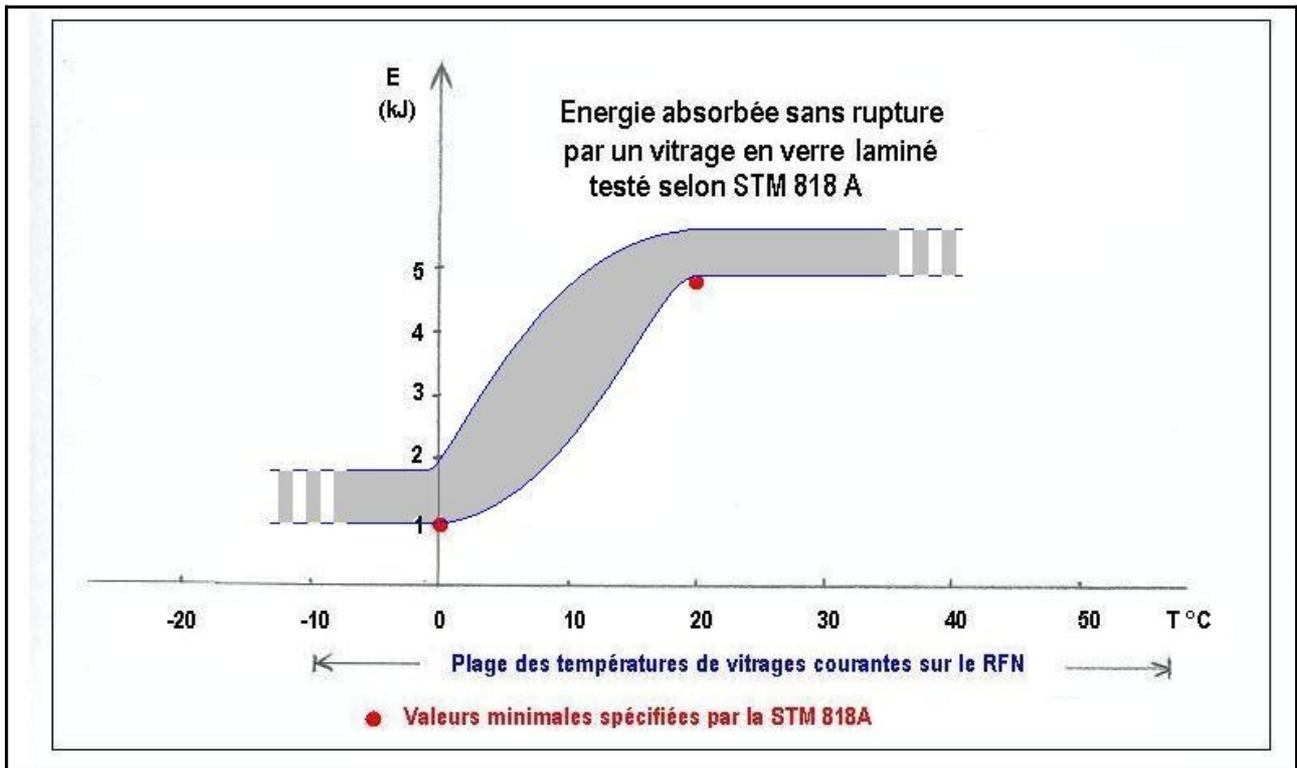
Or, il apparaît que l'amplitude et l'allure de cette variation ne font pas l'objet d'un consensus parmi les experts.

3.1- Première approche

Lors de l'élaboration par la SNCF, au début des années 80, de la spécification technique du matériel référencée STM 818 A, le niveau d'énergie à absorber à 0 °C a été fixé à 1 kJ, alors que l'énergie à absorber à 20 °C a été fixée à 4,8 kJ. La SNCF n'a plus la trace des raisonnements ayant abouti à la détermination de ces niveaux, mais il est raisonnable de penser qu'ils ont été fixés en lien avec les fournisseurs et au vu de ce que l'on pouvait raisonnablement espérer avec les meilleurs matériaux de l'époque.

Ce sont ces niveaux d'énergie qui étaient vérifiés lors des essais d'homologation des vitrages ferroviaires.

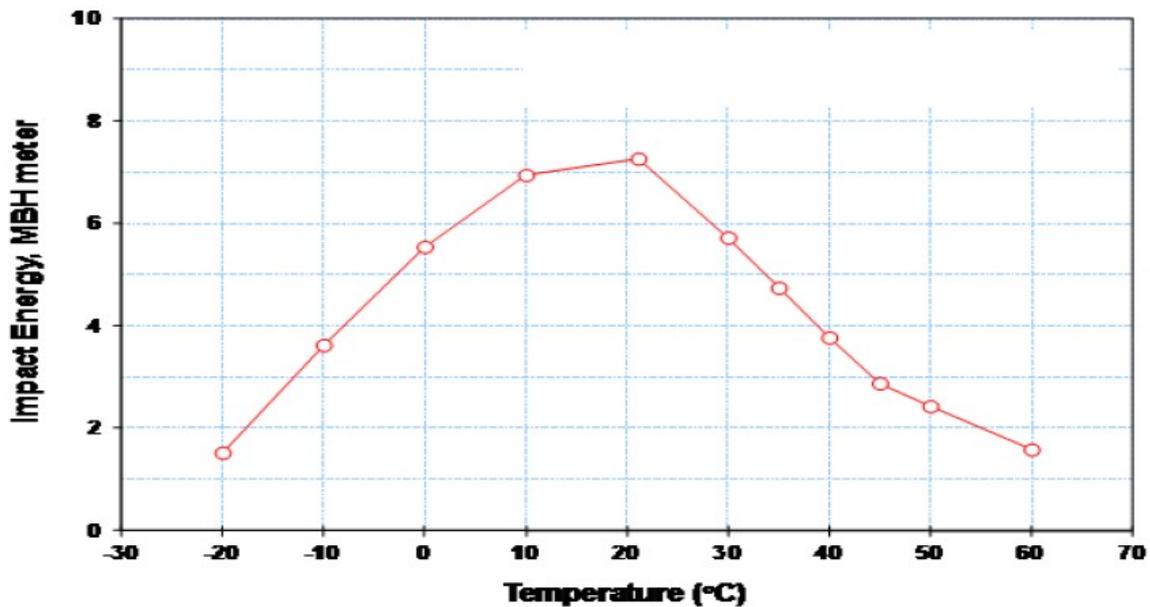
Seuls deux points de la courbe de variation de l'énergie absorbable en fonction de la température interne du vitrage étaient connus et on admettait implicitement que, pour tout vitrage homologué, la courbe réelle se situait quelque part dans la zone grisée du graphique ci-dessous.



3.2- Deuxième approche

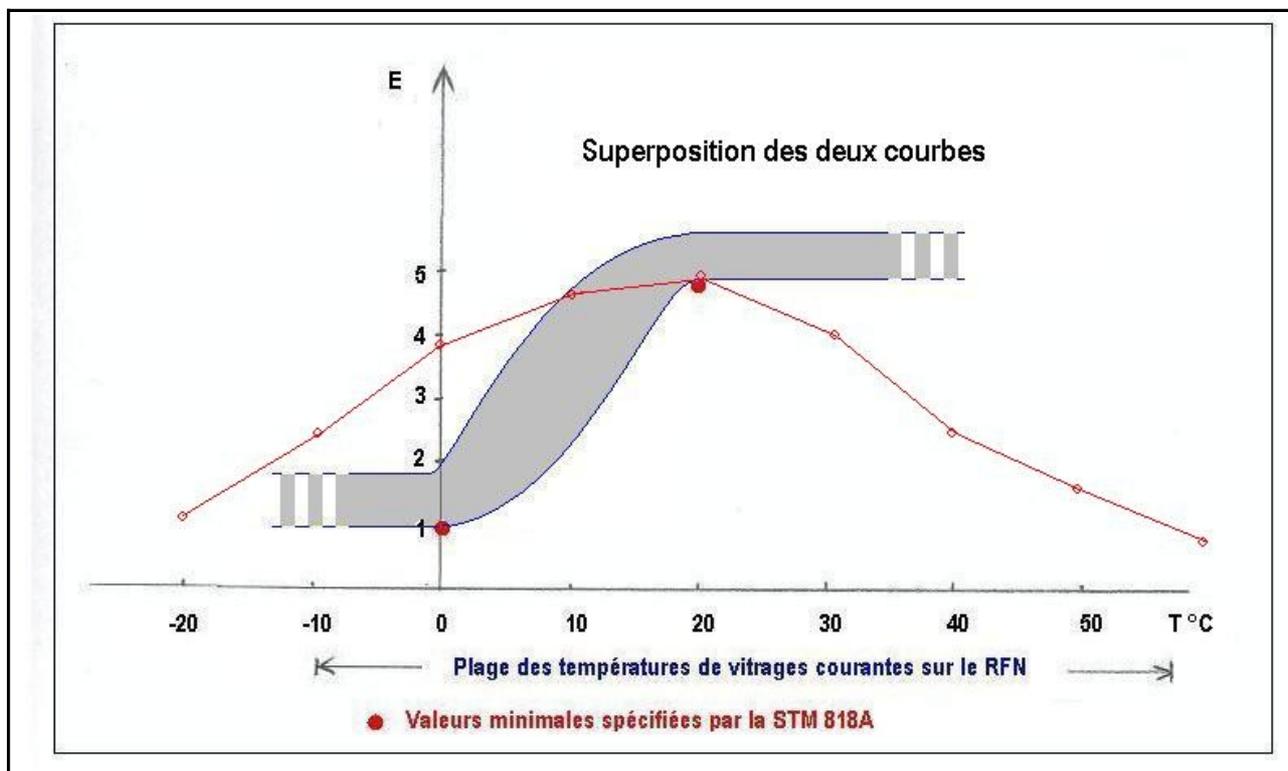
Un expert d'un fournisseur a communiqué des résultats d'essais de perforation réalisés selon la directive 92/22/CE concernant les vitrages des véhicules à moteur, avec une boule d'acier de 2,26 kg contre un verre laminé pour automobile avec intercalaire en PVB.

On constate un maximum vers 20 °C, une baisse de 25 % entre 20 et 0 °C et aussi une baisse de 50 % entre 20 et 40 °C.



Cette courbe conduit à penser que la baisse de résistance aux basses températures serait moins rapide que ce que prévoit la STM 818 A. En revanche, à des températures estivales courantes, on aurait une baisse de résistance très forte et qui n'était pas du tout attendue par les experts ferroviaires.

Si l'on essaie de superposer les deux graphiques en prenant le résultat de la mesure à 20 °C comme point commun, on se rend compte que les courbes ne sont pas compatibles.



Les différences entre les deux protocoles d'essais sont nombreuses et expliquent probablement en partie les écarts entre les deux courbes. Elles concernent notamment :

- l'épaisseur des vitrages ;
- la forme des projectiles (pointu / sphérique) ;
- leur masse (7kg, 1,750kg, 2,26 kg) ;
- leur matière et leur densité (béton, acier) ;
- leur vitesse (133 km/h, 122 km/h, 40 km/h).

Toutefois, la différence d'allure de ces deux courbes (croissante pour la première, en cloche pour la seconde) pose question.

Pour le BEA-TT, à ce stade, il apparaît que :

- l'énergie absorbable diminue aux basses températures (ce qui était connu), mais peut-être moins rapidement que prévu par la spécification STM 818 A ;
- l'énergie absorbable diminue aussi aux températures estivales (ce qui n'était pas attendu) à partir d'un maximum situé probablement vers 20 °C ;
- l'idée selon laquelle on aurait, au voisinage de T_g, une variation rapide de l'énergie absorbable entre un plateau haut pour T > T_g et un plateau bas pour T < T_g est donc à remettre en cause ;

- l'allure de la courbe d'évolution dépend probablement de la forme, de la matière et de la vitesse du projectile. Il est notamment possible que la forme agressive du projectile spécifié par la STM 818 A accentue la baisse entre 20 °C et 0 °C des énergies absorbables par rapport au projectile sphérique spécifié par la directive 92/22/CE.

Au total, on peut dire que la courbe d'évolution de l'énergie de choc absorbable par les vitrages laminés en fonction de la température est étonnamment mal connue en regard des enjeux sécuritaires des utilisations de ces vitrages et de l'ancienneté du produit.

4- Autres matières utilisables pour les intercalaires

Il existe maintenant des polymères, notamment le polyuréthane-thermoplastique (TPU), qui sont utilisables dans les vitrages et qui ont des caractéristiques permettant d'espérer a priori une stabilité de leur tenue aux chocs sur une plus large gamme de températures que ne le permet le PVB. Toutefois, à ce jour, il n'y a pas eu d'essai de type ferroviaire permettant de confirmer cette tenue.

5- Effets du dégivrage électrique sur la tenue aux chocs des vitrages

Les experts d'un fournisseur ont calculé la température interne d'une vitre frontale de type ferroviaire d'une épaisseur de 14 mm en fonction de la température extérieure, de l'ensoleillement et de la vitesse du train, selon que le dégivrage électrique est mis en service ou pas.

VITRAGES SNCF SELON STM 818			
D RIOUT 19/11/2012			
Composition de 14mm			
Calculs thermiques fait à vitesse nulle en considérant les coeff d'échange thermiques ext $H_e=23W/m^2 \cdot K$ et coeff d'échange int $H_i=8W/m^2 \cdot K$			
He et Hi varient avec la vitesse du train.			
Calculs fait avec +18°C dans la cabine			
Vitesse du train: 0km/h			
	0W/dm ²	7W/dm ²	7W/dm ² + soleil
température ext	T° PVB (°C)	T° PVB (°C)	T° PVB (°C)
-15	-6.9	19.3	45.6
-10	-3.1	23.1	49.4
-5	0.6	26.9	53.1
0	4.4	30.6	56.9
5	8.1	34.4	60.7
10	11.9	38.2	64.5
15	15.7	42	68.2
20	19.5	45.7	72
Vitesse du train: 120km/h			
	0W/dm ²	7W/dm ²	7W/dm ² + soleil
température ext	T° PVB (°C)	T° PVB (°C)	T° PVB (°C)
-15	-11.1	0	11.1
-10	-6.6	4.4	15.6
-5	-2.1	8.9	20
0	2.3	13.4	24.5
5	6.8	17.9	29
10	11.2	22.4	33.5
15	15.7	26.8	38
20	19.8	31.3	43

Il apparaît que, « *par temps froid* », l'allumage du dégivrage électrique permet de gagner une dizaine de degrés au niveau de la température interne du vitrage, ce qui est de nature à améliorer sa résistance en cas de choc.

Toutefois, comme nous l'avons vu plus haut, dans l'état actuel des connaissances, on ne sait pas évaluer les effets de ce gain en température sur l'énergie de choc absorbable par le vitrage.

A contrario, en l'absence de thermostat, si le dégivrage est maintenu en service alors que la température extérieure se réchauffe et que l'ensoleillement ajoute ses effets, la température interne du vitrage peut atteindre, notamment à l'arrêt ou aux très basses vitesses, la température de ramollissement du PVB occasionnant ainsi une baisse de sa résistance aux chocs.

Dans l'état actuel des connaissances, cette baisse n'est pas mieux chiffrable que le gain qu'on obtiendrait par temps froid.

BEA-TT - Bureau d'enquêtes sur les accidents de transport terrestre

Tour Voltaire - 92055 La Défense cedex
Tél. : 01 40 81 21 83 - Fax : 01 40 81 21 50
cgpc.beatt@developpement-durable.gouv.fr
www.bea-tt.developpement-durable.gouv.fr

