

**RAPPORT  
D'ENQUÊTE TECHNIQUE**  
sur le déraillement d'une rame de métro  
circulant sur la ligne 2 du métro parisien  
survenu le 2 décembre 2016  
à la station Barbès-Rochechouart  
à Paris (75)  
Mai 2019



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

Affaire n° BEATT-2016-009

**Rapport d'enquête technique  
sur le déraillement d'une rame de métro  
circulant sur la ligne 2 du métro parisien  
survenu le 2 décembre 2016  
à la station Barbès-Rochechouart  
à Paris (75)**

## **Bordereau documentaire**

Organisme commanditaire : Ministère de la Transition écologique et solidaire (MTES)

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

Titre du document : Rapport d'enquête technique sur le déraillement d'une rame de la ligne 2 du métro parisien survenu le 2 décembre 2016 à la station Barbès-Rochechouart

N° ISRN : EQ-BEAT--19-6--FR

Proposition de mots-clés : coffre onduleur groupe motoventilateur, autovibration, pattes de fixation, vérification

### **Avertissement**

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

Cette enquête a pour seul objet de prévenir de futurs accidents, en déterminant les circonstances et les causes certaines ou possibles 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

<b>GLOSSAIRE.....</b>	<b>11</b>
<b>RÉSUMÉ.....</b>	<b>13</b>
<b>1 - CONSTATS IMMÉDIATS ET ENGAGEMENT DE L'ENQUÊTE.....</b>	<b>15</b>
1.1 - Le déraillement en station Barbès-Rochechouart.....	15
1.2 - Le bilan de l'accident.....	15
1.2.1 -Les dégâts sur le matériel roulant.....	15
1.2.2 -Les dégâts à l'infrastructure.....	17
1.3 - Les mesures prises après l'accident.....	18
1.4 - L'engagement de l'enquête.....	18
<b>2 - CONTEXTE DE L'ACCIDENT.....</b>	<b>19</b>
2.1 - La ligne 2 Nation – Dauphine du métro parisien.....	19
2.2 - La voie.....	19
2.2.1 -La communication intervoie 114/115.....	20
2.2.2 -Le rail de sécurité sur les ouvrages d'art.....	20
2.2.3 -Le tapis « Pilotage Automatique ».....	20
2.2.4 -Le troisième rail.....	20
2.3 - Le matériel roulant de la ligne 2.....	21
2.4 - La conduite d'un train « MF01 ».....	23
2.4.1 -Le pilotage automatique.....	23
2.4.2 -Les disjonctions du courant de traction.....	23
2.4.3 -La conduite en cas de disjonction du courant de traction.....	23
2.4.4 -Le voyant « arrêt immédiat ».....	24
2.4.5 -La résistance anormale au roulement.....	24
2.5 - Le coffre onduleur et son groupe motoventilateur.....	24
2.5.1 -La fonction du coffre onduleur.....	24
2.5.2 -Le groupe motoventilateur.....	25
2.5.3 -Le montage du coffre onduleur sur la caisse.....	25
2.6 - Une autre rame de la RATP avec le même coffre onduleur.....	27
2.7 - La norme NF EN 61373.....	27
<b>3 - COMPTE RENDU DES INVESTIGATIONS EFFECTUÉES.....</b>	<b>29</b>
3.1 - Les déclarations et témoignages.....	29
3.1.1 -Les déclarations du conducteur du train.....	29
3.1.2 -Les communications du PCC.....	30
3.2 - L'examen des données de l'enregistreur de bord.....	31

3.3 - Les constats effectués sur les lieux de l'accident.....	32
3.3.1 -Les constats effectués sur l'infrastructure.....	32
3.3.2 -Les constats effectués sur le matériel roulant.....	33
3.3.3 -Conclusion sur la cause immédiate du déraillement.....	35
3.3.4 -Le scénario rejoué sur simulateur.....	35
3.3.5 -Discussion sur le traitement des disjonctions d'intensité.....	38
3.4 - Les pattes de fixation du coffre onduleur.....	38
3.4.1 -Le point de rupture des pattes.....	38
3.4.2 -La conception de la patte.....	39
3.5 - La campagne de sécurisation des rames MF01 et MP05.....	39
<b>4 - L'ANALYSE DU DÉROULEMENT DE L'ACCIDENT.....</b>	<b>41</b>
<b>5 - LES INVESTIGATIONS SUR LA RUPTURE DES PATTES DE FIXATION.....</b>	<b>43</b>
5.1 - Les analyses effectuées sur le coffre onduleur du déraillement.....	43
5.1.1 -Les constats sur les pattes de fixation.....	43
5.1.2 -Les constats sur les plots amortisseurs.....	44
5.2 - L'incident précurseur de décembre 2015 et l'influence des plots amortisseurs.....	45
5.2.1 -Les faits.....	45
5.2.2 -L'expertise a posteriori de la patte rompue en 2015.....	46
5.2.3 -L'influence des plots amortisseurs.....	47
5.2.4 -L'absence de retour d'expérience.....	48
5.3 - Les essais complémentaires réalisés par la RATP et ALSTOM.....	48
5.3.1 -Le contrôle des plots des GMV de l'ensemble du parc.....	48
5.3.2 -Les coffres onduleurs de la voiture N1 de la rame T2027.....	48
5.3.3 -Le cas du coffre onduleur MA-6159.....	49
5.3.4 -La campagne d'essai sur la ligne 2.....	49
5.4 - Les essais complémentaires du CETIM et de VIBRATEC.....	50
5.4.1 -La vibration créée par l'encrassement.....	50
5.4.2 -Les essais avec des plots dégradés.....	51
5.4.3 -Malfaçon sur les plots amortisseurs.....	52
5.4.4 -Les contraintes de pose du coffre onduleur.....	52
5.4.5 -Conclusions.....	53
5.5 - La norme NF EN 61373 de dimensionnement des pattes de fixation.....	54
5.5.1 -Champ d'application de la norme.....	54
5.5.2 -Les notes de calcul du constructeur.....	54
5.5.3 -Conclusion.....	54
5.6 - La non-vérification du coffre onduleur MA-0028 lors de la campagne post-incident 2015. .	54
5.7 - La maintenance du GMV.....	56
5.7.1 -Le prescrit.....	56
5.7.2 -Le réalisé.....	56
5.7.3 -Les écarts, le constat.....	57

5.8 - Relations constructeur / exploitant.....	57
5.8.1 -L'analyse du traitement de l'incident de 2015.....	57
5.8.2 -Les signaux faibles.....	58
5.8.3 -La situation dans le transport aérien.....	58
5.8.4 -Conclusion.....	59
5.9 - Les mesures de correction entreprises.....	60
5.9.1 -Le nouveau design retenu pour les pattes de fixation.....	60
5.9.2 -Les plots amortisseurs du GMV.....	61
5.9.3 -Le pare-chute.....	61
5.9.4 -La maintenance vis-à-vis de l'encrassement.....	61
<b>6 - ANALYSE DES CAUSES ET FACTEURS ASSOCIÉS, ORIENTATIONS PRÉVENTIVES..</b>	<b>63</b>
6.1 - Le schéma des causes et des facteurs associés.....	63
6.2 - Les causes de l'accident.....	64
6.3 - La conception de la patte et le remplacement des plots amortisseurs.....	64
6.4 - Le traitement des incidents présentant un risque pour la sécurité.....	65
6.4.1 -Les échanges d'informations sur les circonstances de l'incident.....	65
6.4.2 -La non exhaustivité de la campagne de vérification post-incident 2015.....	66
6.4.3 -La maintenance du GMV.....	66
<b>7 - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....</b>	<b>69</b>
7.1 - Les causes de l'accident.....	69
7.2 - Les recommandations.....	69
<b>ANNEXES.....</b>	<b>71</b>
Annexe 1 : décision d'ouverture d'enquête.....	73
Annexe 2 : le coffre onduleur MA-0028.....	75
Annexe 3 : synthèse des résultats des expertises réalisées par le CETIM.....	79
Annexe 4 : synthèse des coffres onduleurs présentant des plots fissurés.....	89



# Glossaire

- **AME** : Ateliers RATP de Maintenance des Equipements
- **AOT** : Autorité Organisatrice de Transports
- **CETIM** : Centre Technique des Industries Mécaniques
- **CMC** : Conduite Manuelle Contrôlée
- **DA** : Disjonction d'Alarme
- **DI** : Disjonction d'Intensité
- **EASA** : European Aviation Safety Agency - Agence Européenne de la Sécurité Aérienne
- **FDMS** : Fiabilité, Disponibilité, Maintenabilité, Sécurité
- **FU** : Freinage d'Urgence
- **GMV** : Groupe MotoVentilateur
- **IdFM** : Île-de-France Mobilités
- **IGBT** : Insulated Gate Bipolar Transistors – Transistors bipolaires à grille isolée
- **MF** : Matériel Ferroviaire
- **MP** : Matériel à Pneus
- **PA** : Pilotage Automatique
- **PCC** : Poste de Commande et de Contrôle centralisés
- **SAV** : Service Après-Vente
- **SP** : Service Provisoire (simplifié ou signalisé)
- **VIBRATEC** : laboratoire de mesures spécialisé en dynamique des structures, en bruit et vibration



## Résumé

Le vendredi 2 décembre 2016 à 12 h 01 à la station Barbès-Rochechouart sur la ligne 2 du métro parisien, les quatrième et cinquième voitures d'une rame circulant en direction de Porte Dauphine déraillent lors de l'entrée en station. Les dégâts à l'infrastructure et au matériel roulant sont importants. Aucun voyageur n'est blessé dans l'accident, ni lors de l'évacuation de la rame.

La cause directe du déraillement est la chute du coffre onduleur de la 4<sup>e</sup> voiture, situé sous caisse, au cours de l'interstation La Chapelle – Barbès-Rochechouart. Les essieux du bogie de cette voiture sont alors montés sur le coffre, ce qui a conduit au déraillement.

La désolidarisation du coffre de la rame résulte de la rupture de ses quatre pattes de fixation. Les deux pattes avant ont d'abord rompu par fatigue, puis les deux pattes arrière par limite de résistance.

Les causes ayant amené la rupture par fatigue sont :

- la présence de contraintes résiduelles de montage dans les pattes du coffre, dont la valeur n'avait pas été mesurée ;
- l'adjonction de contraintes supplémentaires liées à une autovibration générée par le ventilateur fixé sur le coffre. Cette autovibration a été considérablement amplifiée par une fissuration à la longue des plots amortisseurs des fixations. La fissuration des plots amortisseurs a été elle-même initiée par des contraintes de montage de ces plots pouvant dégénérer en fissurations lors de l'utilisation.

Un an auparavant, l'exploitant et le constructeur avaient connu un début d'incident de même nature, aux conséquences plus limitées. Les vérifications n'avaient pas été assez exhaustives.

L'analyse de cet incident a conduit le BEA-TT à adresser trois recommandations dans les domaines suivants :

- l'évolution de la norme de dimensionnement des diverses pièces constituant le matériel roulant par la prise en compte de l'autovibration ;
- la transmission des informations entre le constructeur du matériel roulant, les propriétaires, les exploitants et les mainteneurs en cas de risque d'impact sur la sécurité ;
- l'organisation des campagnes de vérifications et contrôles de la RATP.

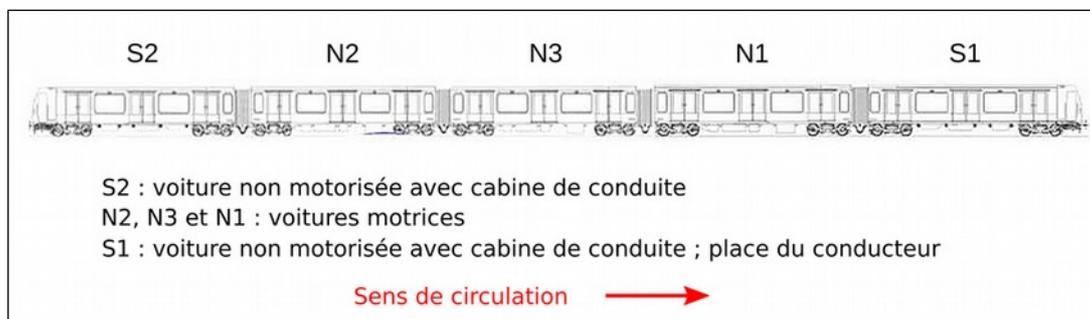
Il formule également une invitation à finaliser le processus de la maintenance de la ventilation du coffre onduleur.



# 1 - Constats immédiats et engagement de l'enquête

## 1.1 - Le déraillement en station Barbès-Rochechouart

Le vendredi 2 décembre 2016 vers midi, sur la ligne 2 du métro parisien, la rame T2025 circule en direction de Porte Dauphine sur la voie 1. À l'issue de son arrêt à la station La Chapelle, le conducteur met en mouvement son train en pilotage automatique (PA).



Vue n° 1 : composition de la rame T2025

Quinze secondes plus tard dans l'interstation La Chapelle – Barbès-Rochechouart, une coupure de courant provoque un freinage d'urgence (FU).

En parallèle, le conducteur constate l'allumage des voyants « arrêt immédiat » et « incident » sur son tableau de bord : il commande l'arrêt de son train.

Puis le courant électrique étant revenu, le conducteur reprend la circulation en conduite manuelle, conformément à la procédure. Il constate alors une capacité de traction diminuée : il atteint la vitesse de 37 km/h. En parallèle, le voyant « incident » s'affiche au tableau de bord.

À l'entrée à la station Barbès-Rochechouart, une nouvelle coupure de courant se produit et le voyant « arrêt immédiat » s'allume. Le conducteur arrête son train par un freinage d'urgence, puis procède à la visite de son train : il constate le déraillement des deux dernières voitures. (N2 et S2)

Les quatre voitures de tête sont arrêtées à quai ; la dernière voiture est hors quai. Les voyageurs évacuent le train sans dommage. Ceux qui sont dans la dernière voiture hors quai utilisent l'intercirculation avec la 4<sup>e</sup> voiture.

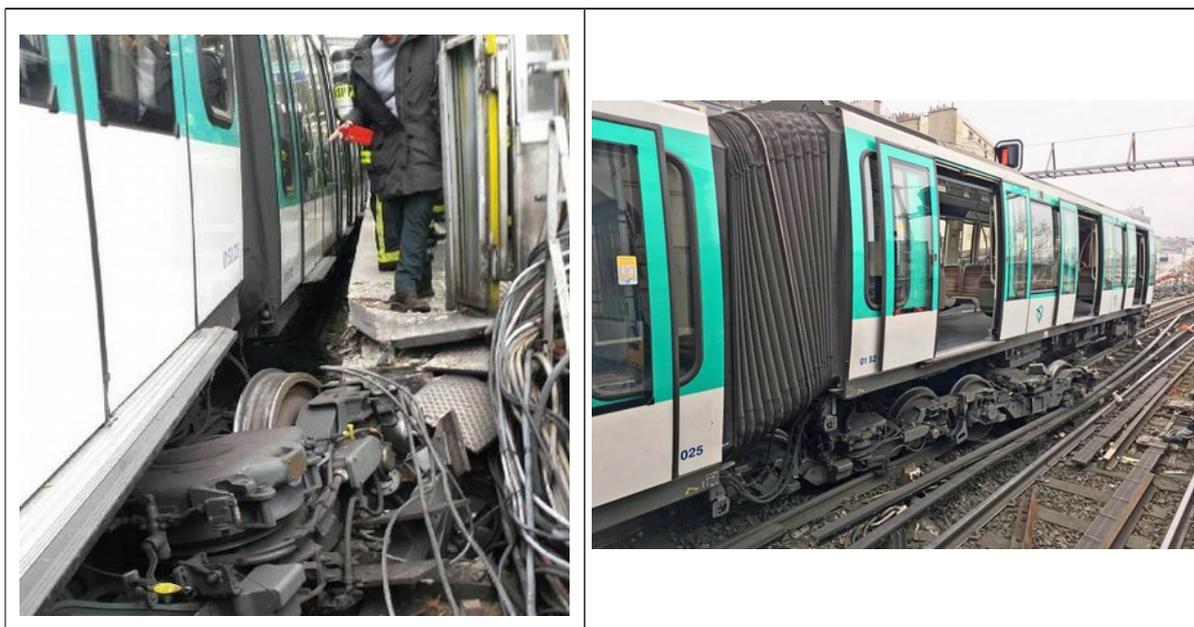
## 1.2 - Le bilan de l'accident

L'évènement n'a fait aucune victime. Les dégâts à l'infrastructure et au matériel roulant sont conséquents.

### 1.2.1 - Les dégâts sur le matériel roulant

Les 4<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> voitures du train sont seules impactées par l'accident.

Le bogie arrière de la quatrième voiture est passé sous la cinquième voiture ; il est déraillé. Le bogie avant de cette cinquième voiture est également désolidarisé de sa caisse et a également déraillé.



*Vue n°2 : le train déraillé en station Barbès-Rochechouart*

Le coffre onduleur (cet équipement est présenté en paragraphe 2.5) de la quatrième voiture repose sur la voie, en aval des bogies déraillés : il est encore maintenu à la caisse par des câbles. Il est retourné (l'extrémité d'une patte de fixation est en haut) et encastré dans le rail extérieur de la voie 1.



*Vue n° 3 : le coffre onduleur ayant provoqué le déraillement*

### 1.2.2 - Les dégâts à l'infrastructure

Les dégâts sur l'infrastructure débutent au niveau du pilier du pont enjambant les voies de la gare du Nord, une centaine de mètres après la station La Chapelle.



Vue n° 4 : dégâts sur l'infrastructure dans l'interstation La Chapelle – Barbès-Rochechouart

L'antenne continue du pilotage automatique (PA) située dans la voie, appelée « tapis PA », est arrachée sur tout le linéaire depuis environ 100 mètres en aval de la station La Chapelle. D'autres organes se trouvant au centre de la voie ont été endommagés.

L'infrastructure a subi d'importants dommages. Seront notamment remplacés :

- 2 fois 30 m de rail sur la voie circulée ;
- 55 m de rail de contact et de nombreux isolateurs ;
- 530 m de tapis PA ;
- le moteur et la tringlerie de l'aiguille se situant à l'entrée de la station Barbès-Rochechouart.

### ***La station Barbès-Rochechouart***

Le quai est endommagé en entrée de station : le nez de quai est éclaté sur environ 50 cm ainsi que l'escalier d'extrémité d'accès à la voie.



*Vue n° 5 : le train déraillé en entrée de la station Barbès-Rochechouart*

### **1.3 - Les mesures prises après l'accident**

La circulation sur la ligne 2 est interrompue après l'accident. Elle sera rétablie deux jours plus tard, le dimanche 4 décembre 2016 à 5 h 30, après remise des installations dans un état permettant l'exploitation.

Les premières analyses visuelles montrent, selon toute vraisemblance, que sur les quatre pattes supportant le coffre onduleur, deux pattes courtes ont cassé par un phénomène de fatigue et deux pattes longues ont rompu de façon brutale consécutivement à la première avarie. Le coffre est alors tombé sur la voie et a provoqué le déraillement.

RATP, l'exploitant mainteneur, et ALSTOM, le constructeur des trains, ont mis en œuvre un plan d'actions de sécurisation renforcée des pièces incriminées, pour assurer le maintien en exploitation des rames qui en sont munies et qui circulent sur les cinq lignes du métro parisien 1, 2, 5, 9 et 14.

### **1.4 - L'engagement de l'enquête**

Au vu des circonstances de cet accident, le directeur du bureau d'enquêtes sur les accidents de transport terrestre (BEA-TT) a ouvert, le 5 décembre 2016, une enquête technique en application des articles L. 1621-1 et R. 1621-22 du Code des transports.

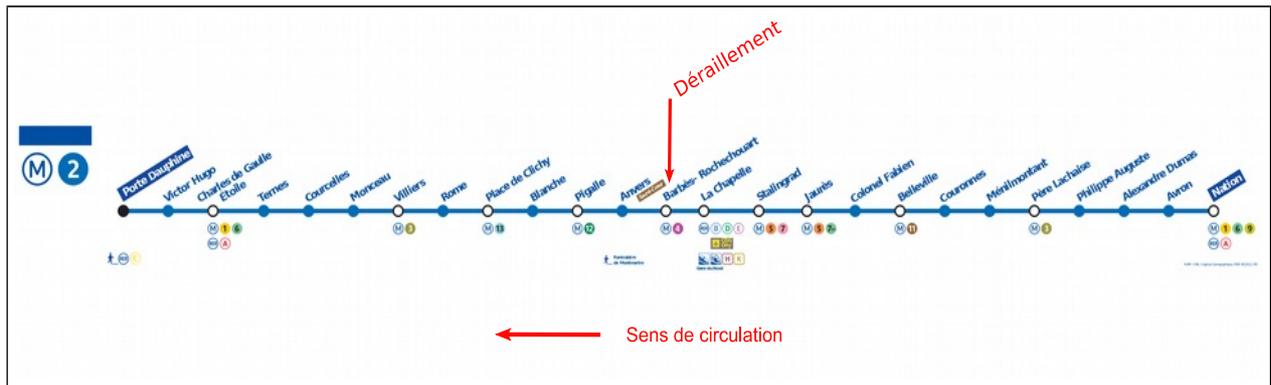
Les enquêteurs du BEA-TT se sont rendus sur place et ont rencontré le conducteur directement impliqué dans l'accident et les représentants des différents services concernés de RATP, ainsi que les représentants du constructeur ALSTOM. Ils ont pu disposer de l'ensemble des pièces et documents nécessaires à leurs analyses, et en particulier des rapports établis par ces services.

## 2 - Contexte de l'accident

### 2.1 - La ligne 2 Nation – Dauphine du métro parisien

La ligne 2 est l'une des 16 lignes du réseau métropolitain de Paris. Elle suit un parcours semi-circulaire au nord de la ville, situé en quasi-totalité sur les boulevards dits des Fermiers Généraux.

Elle est la deuxième ligne ouverte dans la capitale : son premier tronçon est mis en service en décembre 1900 et elle est achevée en avril 1903 dans son tracé actuel entre Porte Dauphine et Nation. Elle n'a connu depuis aucune modification de son parcours.



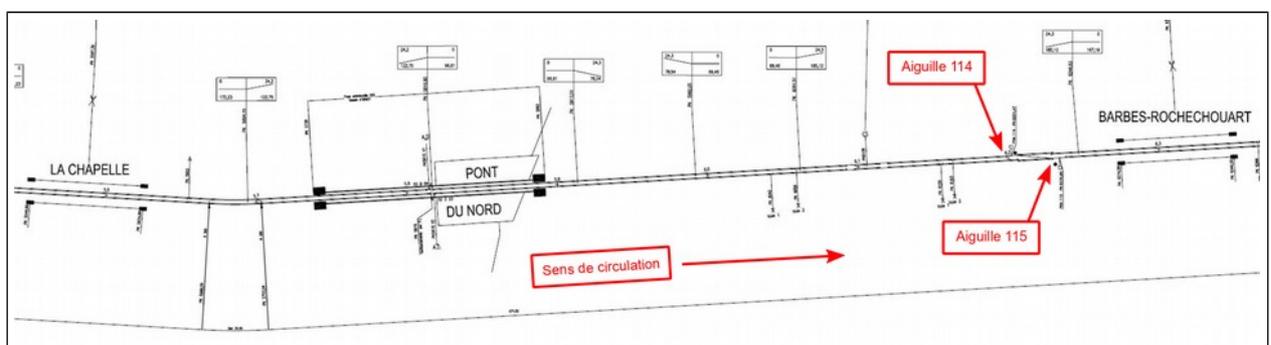
Vue n° 6 : les stations de la ligne 2 Porte Dauphine – Nation

Longue de 12,3 kilomètres, elle dispose de 25 stations. Sur un peu plus de deux kilomètres, elle est établie en viaduc, soit sur environ 20 % de sa longueur. Quatre stations sont aériennes dont les deux stations Barbès-Rochechouart et La Chapelle.

La ligne 2 se classe au neuvième rang du réseau par sa fréquentation, avec 102,5 millions de voyageurs en 2016 correspondant à 321 000 voyages par jour de semaine scolaire. Trois millions de kilomètres y ont été parcourus par les rames au cours de cette année 2016.

La gestion de la ligne est assurée par le poste de commande et contrôle centralisé (PCC) situé Boulevard Bourdon à Paris, dans le 4<sup>e</sup> arrondissement.

### 2.2 - La voie



Vue n° 7 : interstation La Chapelle – Barbès-Rochechouart

### **2.2.1 - La communication intervoie 114/115**

La communication 114/115 est une liaison entre les 2 voies, constituée des aiguilles 114 et 115 ; elle est installée à l'extrémité des quais de la station Barbès-Rochechouart, côté La Chapelle.

Cette communication est utilisée lors d'incidents d'exploitation. Elle sert pour le retournement des rames dans le cadre des services provisoires (SP) : selon le lieu de l'incident faisant obstacle à la circulation, le service est alors limité soit à la station La Chapelle, soit à la station Barbès-Rochechouart.

### **2.2.2 - Le rail de sécurité sur les ouvrages d'art**

Le rail de sécurité a pour but de réduire les conséquences d'un déraillement dans certaines zones particulièrement exposées, telles que les sections en viaduc. Ce rail permet de limiter les déplacements transversaux des véhicules dont un ou plusieurs essieux seraient déraillés, afin d'empêcher le renversement voire la chute en contrebas ou le choc avec des obstacles avoisinants. Ce rail est disposé entre les deux rails de roulement, de façon dissymétrique, vers la file opposée à la zone exposée.

Les sections en viaduc de la ligne 2 du métro parisien sont équipées d'un tel rail de sécurité.

### **2.2.3 - Le tapis « Pilotage Automatique »**

Les lignes du métro parisien<sup>1</sup> sont équipées du pilotage automatique (PA) des trains, qui permet la circulation sans intervention du conducteur, à l'exception du départ du train en station. Il permet à la rame de rouler à la vitesse optimale. Pour ce faire, l'automatisme embarqué suit un programme de marche inscrit dans la voie tout en respectant la signalisation.

C'est le tapis PA qui assure la transmission de ces informations au train, par induction. Il court dans toute la voie entre les 2 rails de roulement, légèrement désaxé.

### **2.2.4 - Le troisième rail**

Le métro parisien est entièrement alimenté par traction électrique. Le troisième rail est la technique utilisée pour le captage du courant électrique.

La voie comporte deux rails de roulement et un troisième rail placé à côté, dit « de contact », qui fournit l'électricité. Le courant électrique est transmis au train par l'intermédiaire de patins glissants, maintenus en contact avec le troisième rail.

---

1 Sauf les lignes 3bis, 7bis et 10

## 2.3 - Le matériel roulant de la ligne 2



Vue n° 8 : rame MF01

Le matériel est de type « MF01 » MF pour matériel ferroviaire par différenciation au matériel MP roulant sur pneus. Quant à 01, ce sont les deux derniers chiffres du millésime de l'année au cours de laquelle le contrat de fourniture a été signé.

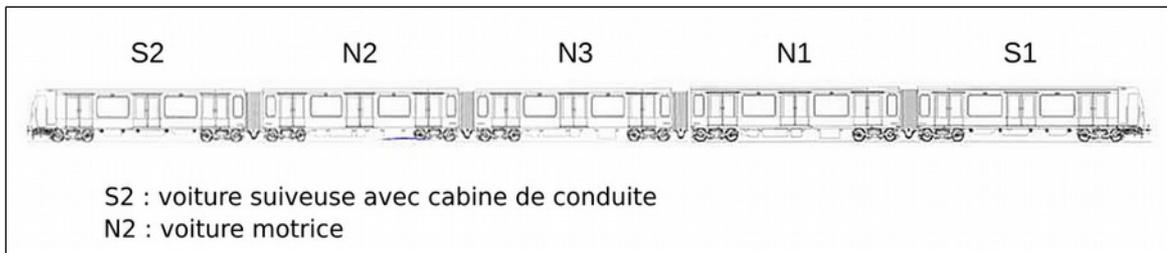
Ce matériel a été conçu pour circuler sur les lignes 2, 5 et 9 du métro parisien, en remplacement du matériel MF-67 ; il est construit par un consortium d'industriels, dont ALSTOM, responsable du lot comprenant les coffres onduleurs objet du présent rapport. La RATP en a commandé 173 exemplaires, répartis sur les 3 lignes :

- > 46 rames pour la ligne 2 ;
- > 52 rames pour la ligne 5 ;
- > 75 rames pour la ligne 9.

La première rame MF01 n° T2001 de présérie a été livrée en décembre 2006 et affectée à la ligne 2. Puis les livraisons se sont échelonnées de mai 2008 jusqu'à l'été 2017.

Ce matériel a été régulièrement autorisé à circuler sur la ligne 2 par un arrêté du préfet de la région Île-de-France en date du 8 juillet 2009. Cet arrêté précise que la conduite en pilotage automatique avec voyageurs peut être utilisée.

Un train est constitué de 5 voitures : 2 remorques d'extrémité équipées chacune d'une cabine de conduite et dénommées « S » dans la nomenclature RATP, et 3 motrices intermédiaires dénommées « N ». La conception des voitures est de type « boa », c'est-à-dire avec une intercirculation à passage libre.



Vue n° 9 : composition d'une rame MF01

La longueur d'un train est de 76 mètres, pour une masse à vide en ordre de marche de 125 tonnes. L'emport est de 557 voyageurs en heure de pointe. La vitesse maximale est de 70 km/h. Chacune des 3 motrices est équipée de 2 bogies bimoteurs ; la chaîne de traction<sup>2</sup> de chaque motrice est refroidie par air, par ventilation forcée.



Vue n° 10 : cabine de conduite du MF01

La cabine de conduite est équipée d'écrans à cristaux liquides, permettant également l'aide à l'exploitation et l'aide à la maintenance.

C'est un matériel apprécié des conducteurs : il freine bien, il réagit bien, la cabine est spacieuse et insonorisée, et on y est bien assis. Il est agréable à conduire. L'ergonomie de conduite permet une bonne position de la main sur le manipulateur.

La RATP assure seule l'exploitation et la maintenance du matériel. IdFM en est le propriétaire depuis la loi n° 2009-1503 du 8 décembre 2009 relative à l'organisation et à la régulation des transports ferroviaires (loi ORTF), et le met à disposition de la RATP dans le cadre de contrats quinquennaux d'exploitation.

La rame impliquée dans le déraillement du 2 décembre était la rame T2025, livrée le 8 février 2010.

<sup>2</sup> La chaîne de traction est l'ensemble des composants allant de la captation sur le 3<sup>e</sup> rail du courant électrique à sa transformation en des caractéristiques utilisables par les moteurs du train.

## 2.4 - La conduite d'un train « MF01 »

### 2.4.1 - *Le pilotage automatique*

Ce matériel dispose de la conduite automatique avec conducteur, dont le support technique est le tapis PA : après fermeture des portes en station par le conducteur, le PA assure l'acheminement jusqu'à l'arrêt à la station suivante. Le tapis PA, qui est posé entre les rails de la voie, indique à l'automatisme de conduite l'allure à suivre. Le mode automatique est le mode habituel.

Le train dispose aussi de la conduite manuelle contrôlée (CMC) : c'est le conducteur qui assure toutes les fonctions de conduite, dont la régulation de la vitesse. Le respect des vitesses maximales est assuré par un contrôle automatique ponctuel.

Afin de maintenir sa compétence, le conducteur doit effectuer quotidiennement au moins une course sur chaque voie en CMC.

La philosophie générale de la conduite sur le réseau métropolitain, univers en tunnel, confiné et peu éclairé, est d'amener le train à quai pour s'arrêter. Si un train est en cause dans un incident (incendie, court-circuit...), l'arrêt en interstation souterraine ou aérienne est à éviter en acheminant ce train en station afin de faciliter une éventuelle évacuation des voyageurs ou d'améliorer les conditions d'intervention des secours.

### 2.4.2 - *Les disjonctions du courant de traction*

Lorsque l'intensité du courant de traction dépasse un seuil préétabli, les disjoncteurs de protection des installations provoquent une coupure du courant appelée **disjonction d'intensité** (DI). Elle se traduit par une absence de tension dans le 3<sup>e</sup> rail d'alimentation et, donc, dans la rame.

Après une DI, un automatisme referme les disjoncteurs qui se sont ouverts. En l'absence de nouvelle DI, l'incident est clos. Sur le réseau urbain de la RATP, il y a environ 1 300 DI par an ; ce qui en fait un évènement connu et usuellement pratiqué par les opérateurs.

Si la tension est de nouveau coupée, le centre de supervision déclare un incident ligne : des investigations plus poussées sont entreprises : la cause de la disjonction doit être identifiée. Cela a été le cas le 2 décembre 2016 avec la rame T2025.

### 2.4.3 - *La conduite en cas de disjonction du courant de traction*

Lorsqu'il constate une absence de tension, le conducteur arrête son train et informe la supervision de toutes les constatations utiles à la détermination de la cause du manque de tension. Cet arrêt s'effectue avec un freinage de service, et non un freinage d'urgence.

Après une 1<sup>re</sup> DI, la remise sous tension est automatique. Le chef de régulation s'informe auprès des conducteurs de la cause origine de l'évènement. Les conducteurs impliqués ne procèdent pas à la visite de leur train.

Dès le retour de la tension, chaque conducteur se conforme aux ordres reçus du chef de régulation. En cas d'absence de communication avec la supervision, le conducteur repart de lui-même jusqu'à regagner la station suivante avec un effort de traction qu'il commande réduit de moitié.

Dans tous les cas, il redémarre en CMC jusqu'à la station suivante pour y amener son train. Dès l'arrêt à la station suivante, et si rien ne s'y oppose par ailleurs, le mode automatique peut être à nouveau utilisé.

#### 2.4.4 - Le voyant « arrêt immédiat »

Le MF01 est équipé d'un voyant d'alarme « arrêt immédiat » (voir paragraphe 3.3.4). Ce voyant s'allume en diverses circonstances, tel un incident électrique sur le train. Lorsque le conducteur constate l'allumage du voyant « arrêt immédiat », il arrête son train par un freinage d'urgence (FU) qu'il y ait ou non du courant électrique dans le 3<sup>e</sup> rail. Puis il observe ses écrans pour prendre connaissance des informations et de la situation.

#### 2.4.5 - La résistance anormale au roulement

Conformément à ses fiches de procédure, lors de la remise en mouvement consécutivement à une DI, le conducteur doit rechercher une éventuelle résistance anormale au roulement : juste après le départ, le conducteur repasse la traction au neutre afin de vérifier qu'il y a absence de retenue. Si tel n'est pas le cas, la procédure prévoit l'arrêt immédiat, y compris hors station. Puis le conducteur doit identifier l'organe de roulement en cause, bogie ou essieu, par visite du matériel, éventuellement depuis l'autre voie en demandant sa protection.

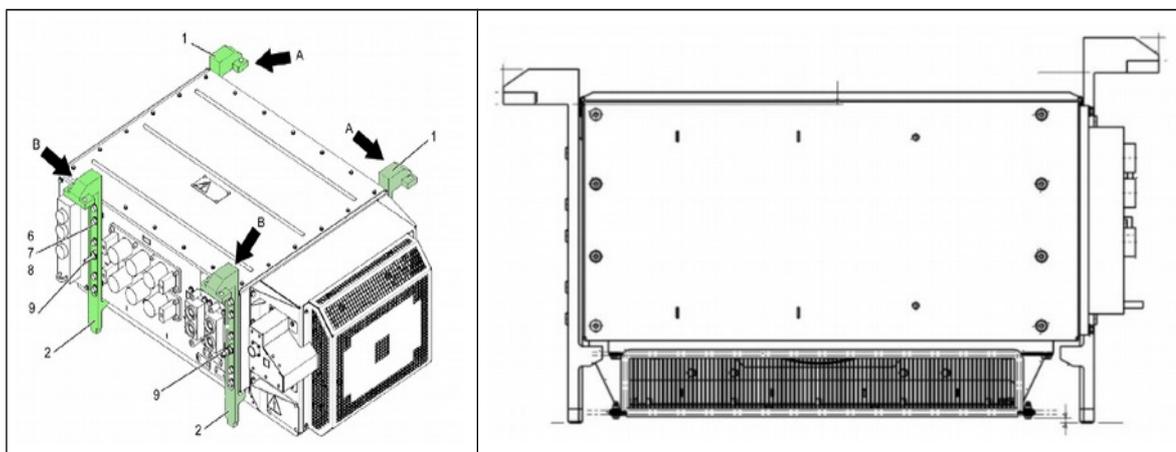
### 2.5 - Le coffre onduleur et son groupe motoventilateur

#### 2.5.1 - La fonction du coffre onduleur

Le coffre onduleur est un équipement électrique qui assure la transformation du courant 750V continu, issu du rail d'alimentation, en courant alternatif utilisable par les moteurs. La transformation est effectuée par des transistors bipolaires à grille isolée, dits IGBT, largement utilisés en électronique de puissance pour l'alimentation des moteurs électriques.

Chaque motrice du matériel MF01 est équipée de son coffre onduleur, soit 3 coffres onduleurs par rame. Chacun pèse environ 275 kg. Ses dimensions sont les suivantes :

- longueur : 1 168 mm ;
- largeur : 804 mm ;
- hauteur : 464 mm.

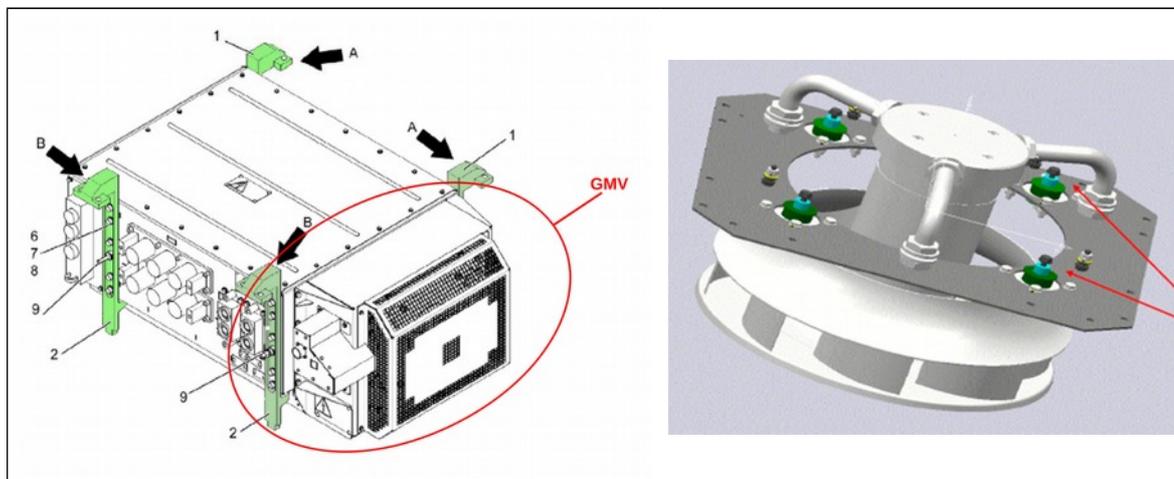


Vue n° 11 : le coffre onduleur d'un MF01

Le coffre onduleur tombé le 2 décembre 2016 portait la référence MA-0028.

### 2.5.2 - Le groupe motoventilateur

Le coffre onduleur est équipé d'un groupe motoventilateur (GMV), disposé sur l'une de ses extrémités et qui assure le refroidissement par air des équipements électroniques de puissance internes du coffre. Le GMV est constitué d'une roue à ailettes actionnée par un moteur. Le diamètre de l'hélice est de l'ordre de 300 mm.



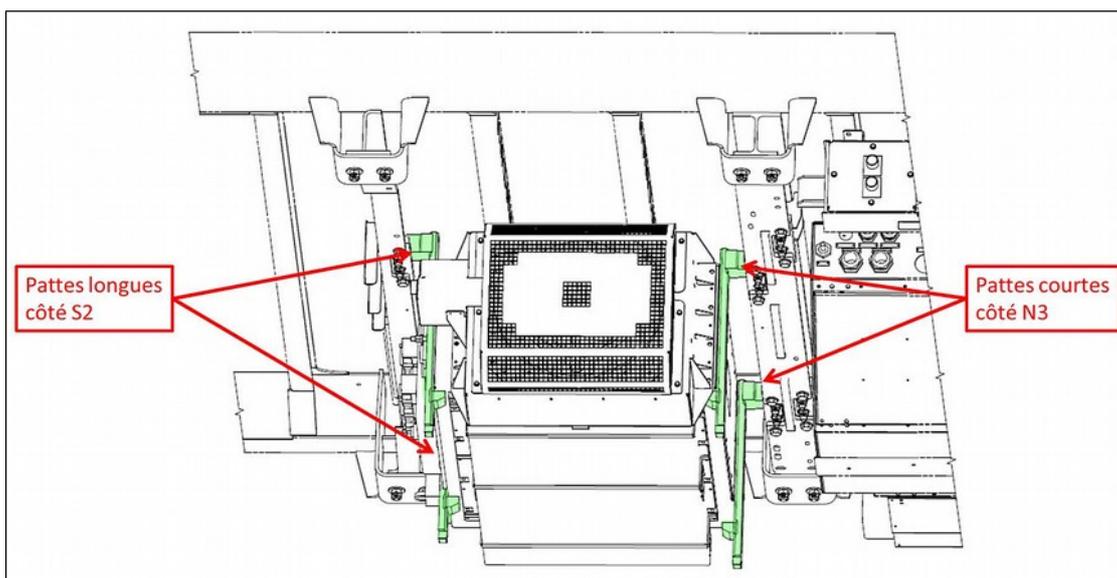
Vue n° 12 : le GMV

### 2.5.3 - Le montage du coffre onduleur sur la caisse

Le coffre onduleur est suspendu sous la motrice. Il est maintenu au moyen de 4 pattes de fixation.

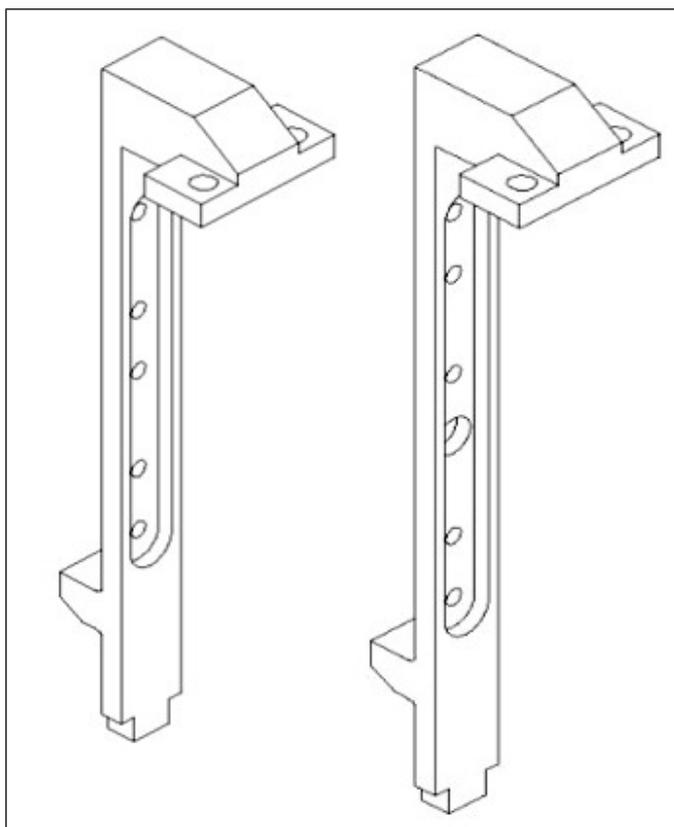
Les pattes de fixation ont pour fonction de faire l'interface entre le coffre et le train. Ces coffres onduleurs sont montés sur de nombreux autres matériels ALSTOM, vendus à travers le monde. Chaque type de matériel peut disposer de pattes aux formes, matériaux et longueurs spécifiques selon le mode de fixation sous train.

Les pattes sont fournies avec le coffre sur lequel elles sont fixées.



Vue n° 13 : positionnement des pattes courtes et longues sur le coffre onduleur

Les pattes sont en aluminium 6082 T651. Pour le matériel MF01, elles ont deux designs : d'un côté des pattes longues et de l'autre côté des pattes courtes. Pour le matériel MP05<sup>3</sup> il y a uniquement des pattes longues, identiques aux pattes longues du MF01.



*Vue n° 14 : pate courte et pate longue du coffre onduleur*

Au final, les matériels MF01 et MP05 sont équipés du même coffre onduleur à deux écarts près :

- le coffre onduleur du MP05 n'utilise que des pattes de fixation longues ;
- le coffre onduleur du MP05 est orienté longitudinalement par rapport au train.

Comme pour tout ce qui se trouve sous caisse, le montage est dit « assuré en sécurité positive » : le cisaillement des vis de fixation n'est pas suffisant pour conduire à la chute. En effet, la forme des pattes maintient en place le coffre onduleur après rupture des vis de fixation grâce à l'excroissance réalisée en partie basse de celles-ci.

Les extensions des pattes vers le sol sont utilisées lorsque le coffre est déposé : ces extensions servent de support au coffre afin de protéger les équipements en partie inférieure qui ne supporteraient pas le poids du coffre.

---

3 MP05 matériel présenté au paragraphe 2.6

## 2.6 - Une autre rame de la RATP avec le même coffre onduleur

Le présent rapport investigate également sur le matériel MP05, car cette rame dispose d'un coffre onduleur identique à celui du matériel MF01, avec cependant des accroches à la voiture et une orientation différentes.

C'est un matériel roulant sur pneus, dont l'exploitation est entièrement automatique.



Vue n° 15 : rame MP05

Matériel plus récent, il a été réceptionné de novembre 2011 à juin 2016. Ce matériel circule aujourd'hui sur les lignes 1 et 14, avec respectivement 56 et 11 exemplaires.

Une rame est constituée de 6 voitures : 4 motrices intermédiaires et 2 remorques d'extrémité.

La chaîne traction de chaque motrice est refroidie par air par ventilation forcée, comme sur le matériel MF01.

## 2.7 - La norme NF EN 61373

Les industries de construction mécanique, comme toutes les industries, s'appuient sur des normes pour dimensionner les divers constituants de leurs produits.

Une norme peut être définie de la façon suivante : « spécification technique établie avec la coopération et le consensus ou l'approbation générale de toutes les parties intéressées, fondée sur les résultats conjugués de la science, de la technologie et de l'expérience, visant à l'avantage optimal de la communauté dans son ensemble et approuvée par un organisme qualifié sur le plan national ou international. »

ALSTOM utilise la norme NF EN 61373 pour vérifier le dimensionnement correct des coffres onduleurs et de leurs composants, incluant les pattes de fixation. Elle a pour titre « Applications ferroviaires – Matériel roulant – Essais de chocs et vibrations ». Elle est

approuvée par la Commission électrotechnique internationale (CEI), par le Comité européen de normalisation électrotechnique (CENELEC) et par l'Association française de normalisation (AFNOR). Cette norme « *spécifie les exigences d'essai des matériels destinés à être utilisés sur les véhicules ferroviaires soumis à des vibrations et à des chocs dus à la nature de l'environnement d'exploitation ferroviaire* ».

## 3 - Compte rendu des investigations effectuées

### 3.1 - Les déclarations et témoignages

Les déclarations présentées ci-dessous ont été établies par les enquêteurs techniques sur la base des déclarations écrites dont ils ont eu connaissance et de celles qu'ils ont recueillies verbalement lors des auditions qu'ils ont réalisées. Ils ne retiennent que les éléments utiles pour éclairer la compréhension et l'analyse des événements et pour formuler des recommandations. Il peut exister des divergences entre ces différentes déclarations recueillies et les constats ou analyses présentés par ailleurs.

#### 3.1.1 - Les déclarations du conducteur du train

Conducteur de métro depuis 2005, il est venu sur la ligne 2 en 2010 à sa demande, car cette ligne est équipée des trains modernes MF01 qui, selon lui, sont agréables à conduire, freinant bien et bien motorisés, avec une cabine de conduite spacieuse et insonorisée et à l'ergonomie bien pensée et aboutie.

Le conducteur effectuait son premier train de la journée de service, sous le numéro de marche 228. La journée du vendredi 2 décembre 2016 était une journée courante.

La prise de service s'est faite à la station Nation à 11 h 30. La rame T2025 était à quai et elle avait déjà effectué des rotations. Le conducteur a fait le 1<sup>er</sup> tour en conduite en pilotage automatique.

Après la station La Chapelle, plusieurs voyants s'allument sur le tableau de bord ; en particulier sur l'écran central, les messages « arrêt immédiat » et « courant coupé » sont présentés. Derrière le conducteur, l'éclairage de la cabine voyageurs bascule en réduit, indiquant un passage sur batteries. Il l'identifie comme une disjonction d'intensité (DI). Le conducteur a l'habitude de la DI : il est confronté régulièrement à ce type d'incident et parfois plusieurs fois par semaine. À l'aide du système de sonorisation, il fait une annonce aux voyageurs leur indiquant la panne de courant et la nécessité de patienter.

Puis le courant électrique revient. Tout est normal : il n'y a plus de message sur les consoles ; la cabine voyageurs est de nouveau allumée complètement. La rame sur la voie en face repart.

Le conducteur applique la procédure sécuritaire du départ hors station qui prévoit la conduite en manuel afin d'être plus vigilant.

Le train repart normalement.

Puis un voyant s'allume et le train n'accélère plus aussi fortement que d'habitude. Compte tenu du profil en rampe et de la vitesse plafond à cet endroit, le conducteur envisageait d'atteindre la vitesse de 40 km/h. Le conducteur pense que 2 motrices sur 3 sont hors service. Il en informe le poste de commande et de contrôle centralisés (PCC).

Lors de l'arrivée à la station Barbès-Rochechouart, l'écran de droite flashe et une bande bleue apparaît au centre. Les messages au tableau de bord demandent l'arrêt immédiat, ce que fait le conducteur.

Le train est arrêté avant la tête de quai. Le conducteur suppose une avarie au matériel roulant.

Les voyageurs sur le quai viennent lui dire « vous avez déraillé ». Il relaie l'information au PCC. Il a conscience d'un incident grave.

Conformément à la procédure, suite à la demande du PCC de recueillir des informations complémentaires, il se rend en queue de son train par l'intercirculation de la rame. Il recherche d'éventuels blessés : aucun n'est constaté. Il constate que le plancher de la voiture 4 n'est plus plan. De retour en cabine de tête, il rend compte au PCC. Il confirme que le train 228 est déraillé.

### **3.1.2 - Les communications du PCC**

Le BEA-TT a analysé les échanges du PCC de la ligne 2 avec son environnement pour la période 12:00-12:30, le début de l'écoute se situant lorsque la rame T2025 quitte la station La Chapelle. Ce sont les communications du PCC avec le conducteur du train accidenté et les autres conducteurs présents sur la ligne, le commandement central de la RATP, les autres services de la compagnie tels que celui en charge de l'alimentation électrique, et les intervenants sur place.

Le PCC identifie les rames et les conducteurs avec leur seul numéro de marche, en l'occurrence le numéro 228 pour la rame T2025 et son conducteur.

Lors de la première mise hors tension, dont on découvrira plus tard qu'elle est consécutive à la chute du coffre onduleur de la rame 228, le PCC en recherche la cause. Mais l'alimentation électrique s'étant automatiquement rétablie, l'incident est clos.

Environ une minute plus tard, le PCC constate une nouvelle mise hors tension qui, elle, va persister. Le PCC lance les recherches pour en identifier la cause.

Immédiatement, c'est la rame 228 qui est identifiée comme étant la cause très probable de la DI, bien que la nature réelle de l'incident ne soit pas encore connue. Le PCC se concerta avec le gestionnaire de l'alimentation électrique.

Une minute 45 secondes environ après la 2<sup>nd</sup>e mise hors tension, le conducteur de la rame 228 informe le PCC qu'« il semblerait qu'un bogie en dernière voiture est déraillé. »

Cette nouvelle information reçue, en association avec le constat de la perte du contrôle de l'aiguillage de Barbès-Rochechouart, le PCC conclut à un déraillement, qui est un accident grave. Il appelle les renforts RATP et fait commander les moyens de relevage.

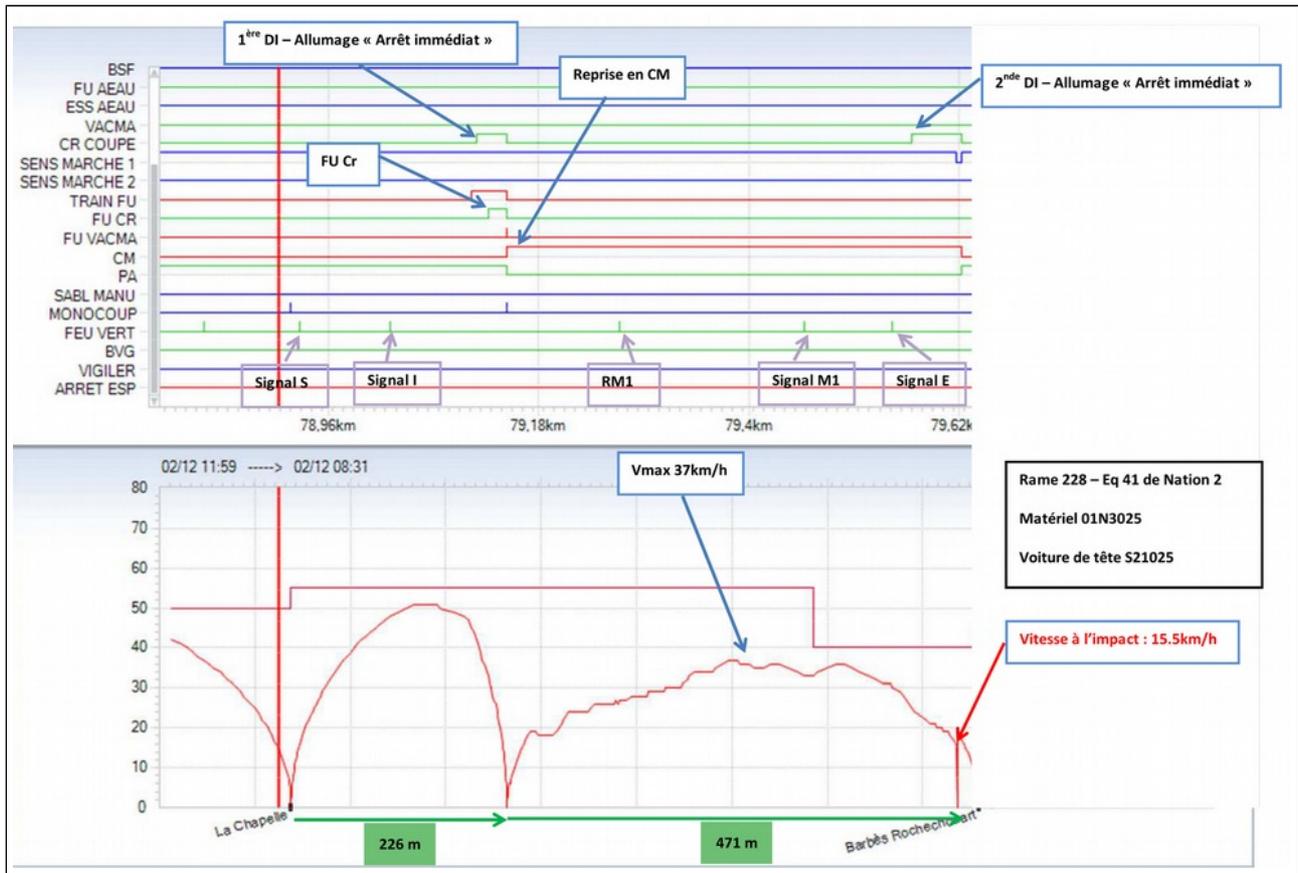
Après la mise en sécurité, en particulier électrique, et la confirmation de l'absence de blessé, le souci a été l'engagement des ressources, disponibles ou mobilisables, pour la reprise de l'exploitation sur les parties non impactées par l'accident et pour la remise en état.

Le PCC se projette sur l'exploitation dégradée de la ligne 2 et demande la manœuvre de nombreux rupteurs<sup>4</sup> pour reprendre le service sur les parties exploitables. Ce qui est la procédure en une telle circonstance.

---

4 Rupteur : appareil d'interruption permettant de modifier l'alimentation électrique du 3<sup>e</sup> rail du métro

### 3.2 - L'examen des données de l'enregistreur de bord



Vue n° 16 : les données de l'enregistreur de bord

Les données de l'enregistreur de bord ont été exploitées.

La vue n° 16 montre un extrait des données issues de l'enregistrement de la rame T2025 le jour de l'accident.

Après un arrêt à la station La Chapelle de 22 secondes, le train repart normalement ; il est 11:59:42. Le train est en conduite automatique. Une montée en vitesse jusqu'à 51,3 km/h est constatée.

Puis survient une « Anomalie informatique code = 2 ». Elle sera enregistrée cycliquement toutes les 10 minutes : cette anomalie indique des connexions interrompues, conséquence de la chute du coffe onduleur MA-0028 et de ses liaisons électriques arrachées.

À 12:00:02, le PA déclenche un FU. Puis le courant électrique d'alimentation est coupé ; alors le conducteur renouvelle l'ordre de FU par ses organes de commande.

Sur l'écran d'aide à l'exploitation en cabine, les messages suivants sont affichés :

- courant coupé ;
- FU PA (Freinage d'urgence par le pilotage automatique) ;
- une motrice inactive.

Le train s'arrête à 12:00:10. Le courant revient moins de 4 secondes après l'arrêt.

À 12:00:32, le pilotage du train est passé sur conduite manuelle. Le train avance 2 secondes plus tard.

Après une montée à la vitesse de 17 km/h, l'effort traction est relâché pendant 5 secondes. Conformément aux fiches 70 et 71 de son guide de conduite, le conducteur recherche une éventuelle résistance anormale au roulement. La courbe des vitesses ne montre pas de « dur mécanique », c'est-à-dire de résistance.

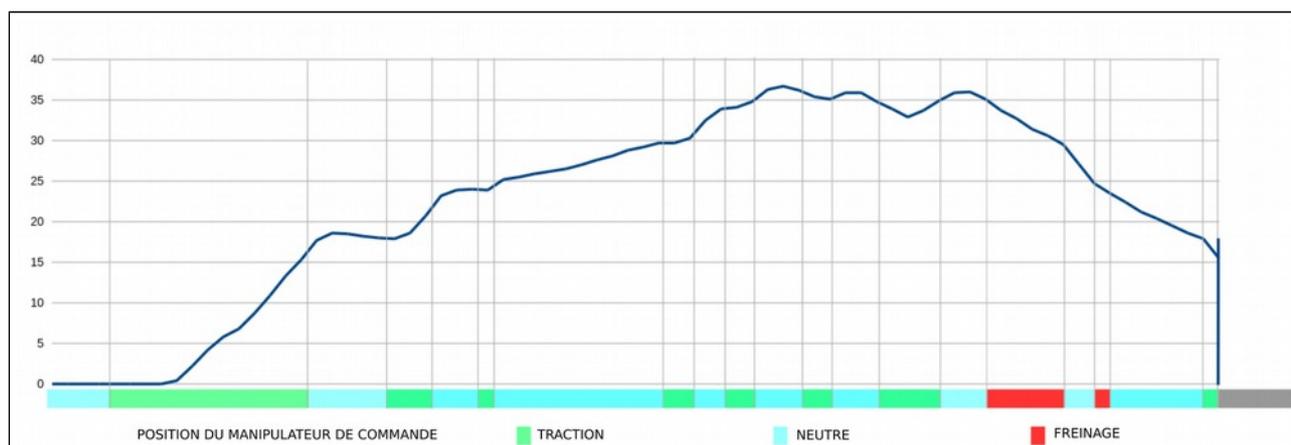
Vient ensuite une alternance de positions du manipulateur entre « traction » et « neutre » ; la vitesse monte lentement pour stagner autour de 35 km/h.

À 12:01:37, il se produit une nouvelle disjonction ; la vitesse décroît lentement.

Le dernier enregistrement exploitable est effectué à 12:01:45 ; la vitesse est alors de 15,5 km/h. Puis, suite au choc et à l'arrachage de câbles électriques, les données enregistrées deviennent incohérentes, donc inexploitables.

Les dernières informations présentes dans l'enregistreur laissent penser que l'encastrement dans le quai du 2<sup>e</sup> bogie de la quatrième voiture s'est produit à la vitesse d'environ 15 km/h.

Le schéma suivant présente de façon chronologique la relation entre la position du manipulateur « Traction-Freinage » et la vitesse de la rame depuis le passage en conduite manuelle jusqu'à l'arrêt à Barbès-Rochechouart.



Vue n° 17 : manipulateur de commande et vitesse depuis l'interstation jusqu'à Barbès-Rochechouart

### 3.3 - Les constats effectués sur les lieux de l'accident

L'ensemble des éléments recueillis permet de dresser un scénario assez précis des événements ayant entraîné le déraillement de la rame T2025.

#### 3.3.1 - Les constats effectués sur l'infrastructure

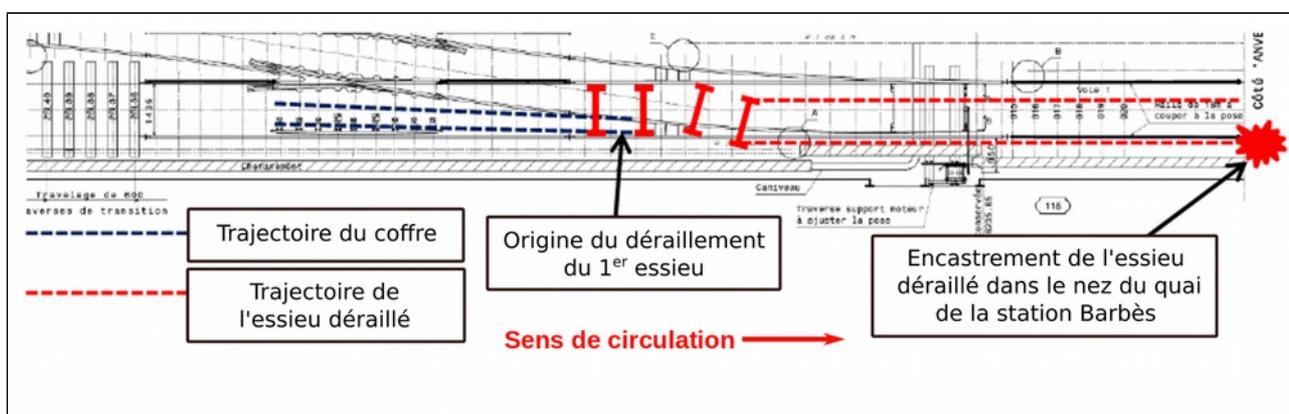
Des premiers constats, la pièce à l'origine de la détérioration des éléments d'infrastructure est suffisamment large pour toucher à la fois le rail de sécurité, le tapis PA et les fixations des traverses au tablier du pont, soit quasiment toute la largeur de la voie.

Une centaine de mètres après le départ de la station La Chapelle, les premières traces de dégradations de l'infrastructure apparaissent. Le coffre onduleur se désolidarise de la caisse à ce moment-là. Entre ce point et l'appareil 115, soit environ 380 m, le coffre onduleur est resté en appui sur le rail de sécurité et le tapis PA, ce qui lui a permis d'être

poussé par le bogie arrière de la voiture N2. Quelques mètres en amont de l'appareil 115, la fin du rail de sécurité conduit le coffre onduleur à descendre sous la table de roulement côté rail de gauche dans le sens de la marche. L'essieu avant du bogie roule sur le coffre encore maintenu par ses câbles et reste dessus. L'aiguille de voie déviée guide le coffre vers le rail de droite et le bogie positionné dessus hors de la voie. Ensuite, le coffre reste bloqué sous le bogie jusqu'à l'entrée à quai. Étant en dehors du gabarit, le bogie frappe le nez de quai, cassant les fixations caisse / bogie et laissant le coffre avancer plus avant toujours traîné par les câbles. Le bogie avant de la dernière remorque S2 vient à son tour heurter le bogie déjà encastré dans le quai ; ses fixations caisse / bogie se rompent également.

Le train s'arrête.

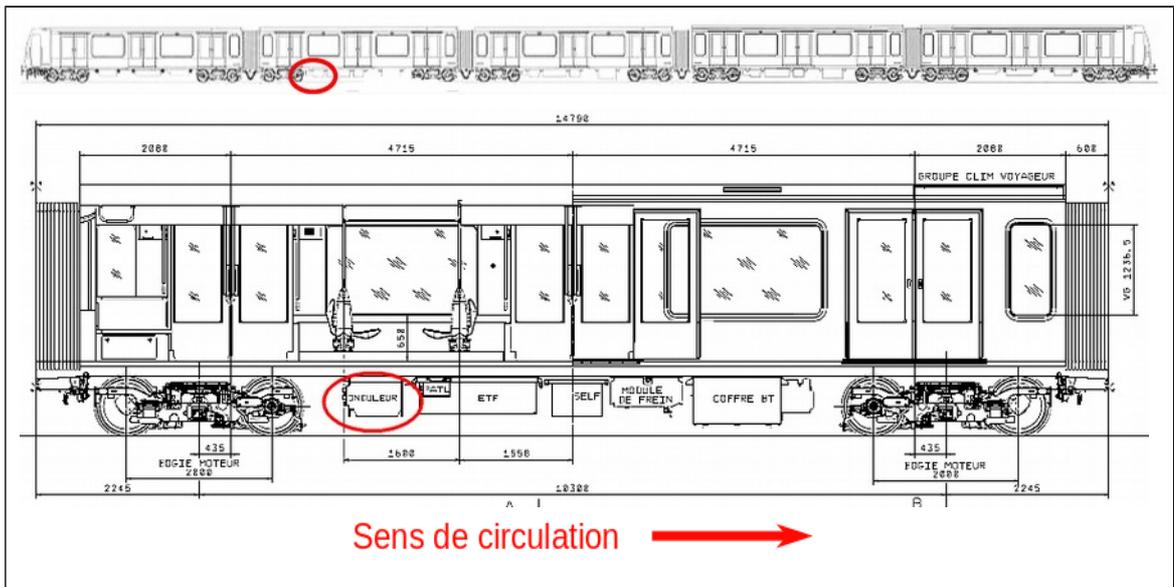
Il n'y a aussi aucune trace de montée de roue sur le rail, pas plus que de trace de roue sur les traverses. L'absence de ces traces est un indice fort que le train est resté en voie jusqu'à la station Barbès-Rochechouart. Le bogie arrière de sa 4<sup>e</sup> voiture n'a déraillé que lors de son passage sur l'appareil de voie 115 avant l'entrée en station.



Vue n° 18 : déraillement sur la communication 114/115

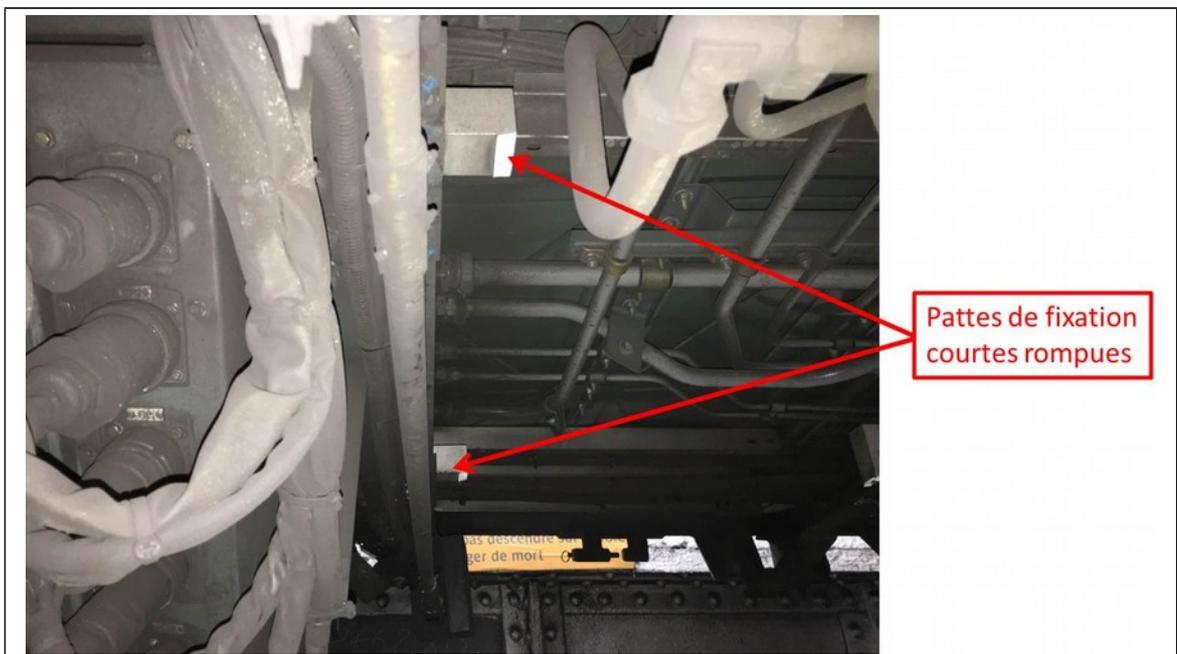
### 3.3.2 - Les constats effectués sur le matériel roulant

Le coffre onduleur de la motrice N2 s'est désolidarisé par rupture de ses quatre fixations au sortir de la station La Chapelle, au niveau du pont enjambant les voies de la gare du Nord. Ce coffre, toujours maintenu par ses câbles et poussé par l'essieu, a été traîné par la rame en glissant d'un côté sur le rail de sécurité et de l'autre sur le tapis PA. Le support du tapis PA composé essentiellement de bois a cédé sous le poids du coffre et le tapis en caoutchouc a été arraché. Au passage de l'aiguille 115, le coffre est guidé vers l'extérieur de la voie. Au niveau de la convergence des rails, le coffre se bloque. Le 2<sup>e</sup> bogie de la voiture le percute et déraillé au niveau du talon de l'aiguillage. Le bogie déraillé engage le gabarit et vient percuter le nez de quai de la station Barbès-Rochechouart, ce qui l'arrête ; le bogie suivant, de la dernière voiture, vient s'encastrer dans le bogie déraillé et déraillé à son tour avant que le train ne s'arrête.

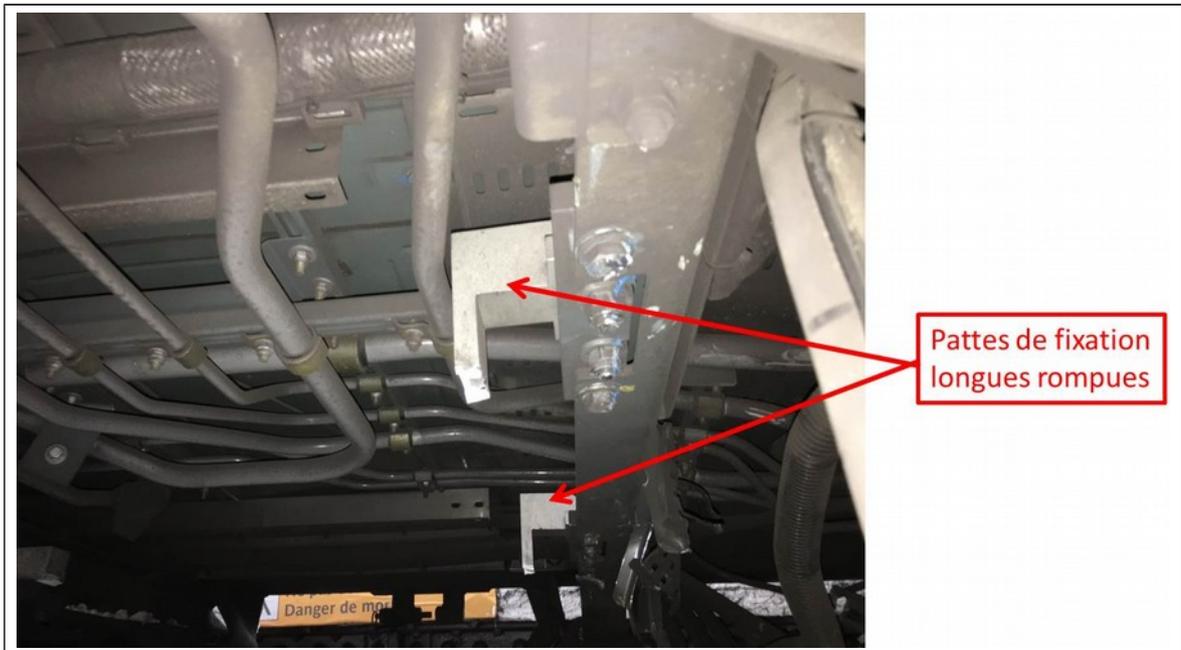


Vue n° 19 : position du coffre onduleur sous la motrice N2

Sous la 4<sup>e</sup> voiture, les 4 pattes de fixation du coffre onduleur sont rompues, comme le montrent les 2 vues suivantes. Les 2 pattes avant, pattes courtes, sont rompues en fatigue au niveau du congé. Les 2 pattes arrière, pattes longues, sont rompues par flexion au premier point de fixation du coffre, sur un trou de passage de vis.



Vue n° 20 : les pattes courtes du coffre onduleur sous la motrice N2



Vue n° 21 : les pattes longues du coffre onduleur sous la motrice N2

Les témoins peints sur les liaisons ne sont pas rompues, permettant de conclure qu'il n'y a pas eu desserrage des liaisons.

### **3.3.3 - Conclusion sur la cause immédiate du déraillement**

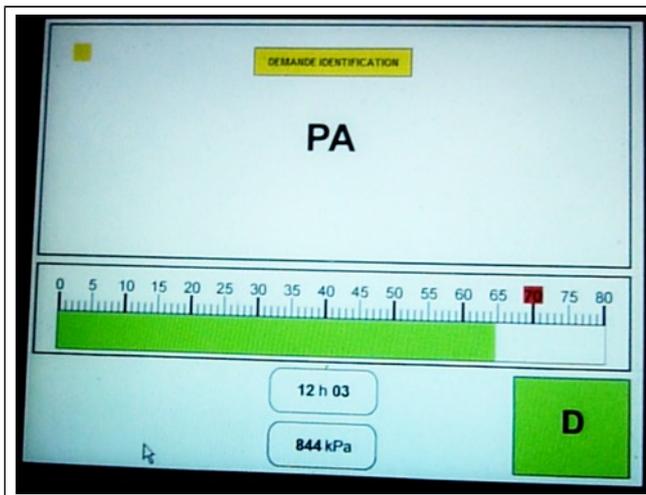
Le coffre onduleur a chuté sur la voie à la suite de la rupture de ses 4 pattes de fixation. Puis le bogie arrière de la voiture l'a poussé vers l'aiguille 115.

C'est le coffre onduleur bloqué en talon de cette aiguille qui a provoqué le soulèvement du 1<sup>er</sup> essieu du bogie arrière de la voiture et sa sortie du gabarit. Ensuite lors de l'entrée en station, ce bogie s'est arrêté brusquement lorsqu'il a heurté le quai.

### **3.3.4 - Le scénario rejoué sur simulateur**

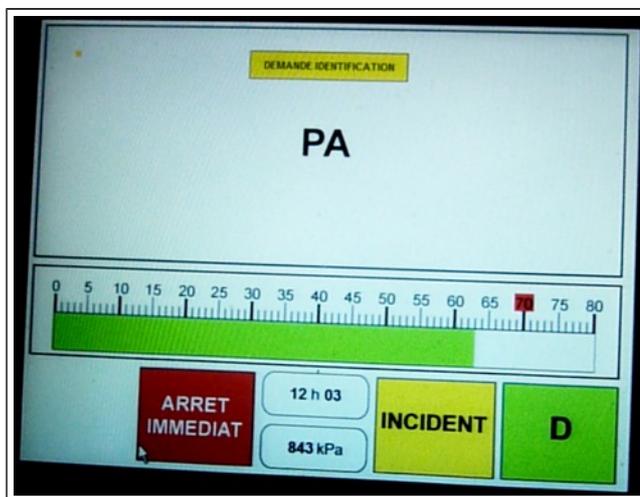
La RATP dispose d'un simulateur dynamique du MF01, sur lequel les conducteurs sont formés et entraînés. Ce simulateur a permis de reconstituer, à partir des enregistrements de la rame accidentée, les diverses phases précédant le déraillement du 2 décembre 2016.

Les vues suivantes présentent l'affichage de l'écran central (voir vue n° 10) lors des diverses phases de circulation entre les stations La Chapelle et Barbès-Rochechouart.



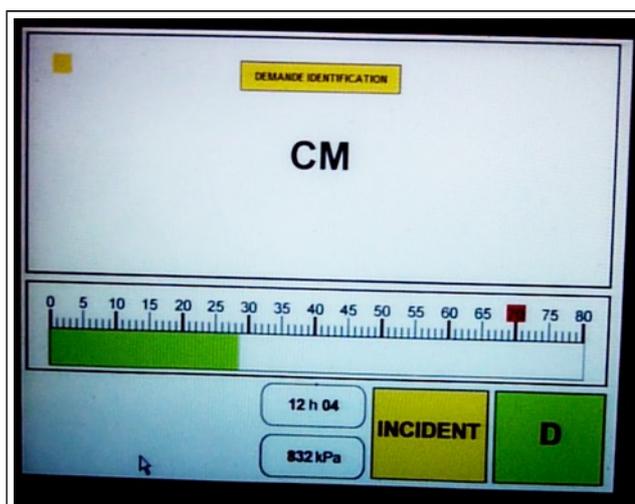
Après que le conducteur a commandé la fermeture des portes, le pilotage automatique (PA) amène le train jusqu'à l'arrêt dans la station suivante.

*Vue n° 22 : le train roule sous pilotage automatique*



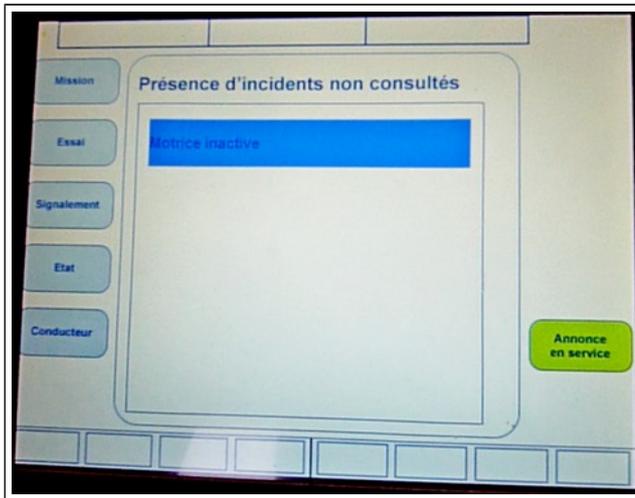
Le coffre onduleur vient de tomber sur la voie, provoquant un court-circuit dans le rail d'alimentation. Cela se traduit par les messages « **incident** » et « **arrêt immédiat** » présentés sur l'écran frontal. Le conducteur a pour consigne de commander un freinage d'urgence. En parallèle, le PA déclenche un freinage d'urgence.

*Vue n° 23 : une absence de tension est détectée par le train*



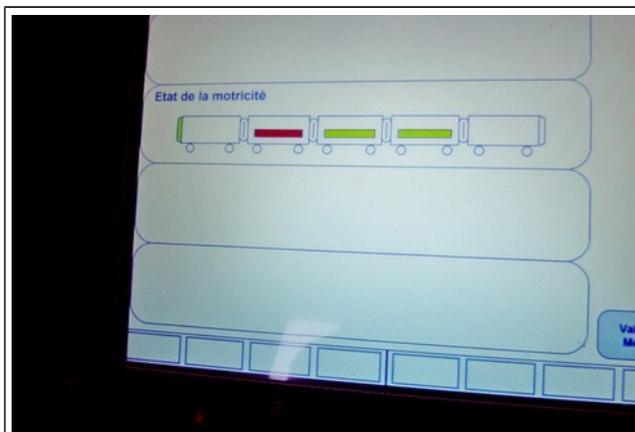
Le conducteur est passé en conduite manuelle : c'est lui qui commande toutes les fonctions du train. Il a le message « **incident** » qui est présenté en permanence : la procédure prévoit de regagner la station suivante si la rame ne présente pas de difficulté au roulage. Puis il devra effectuer des sondages pour déterminer l'origine de l'incident.

*Vue n° 24 : le train est reparti sous l'action du conducteur.*



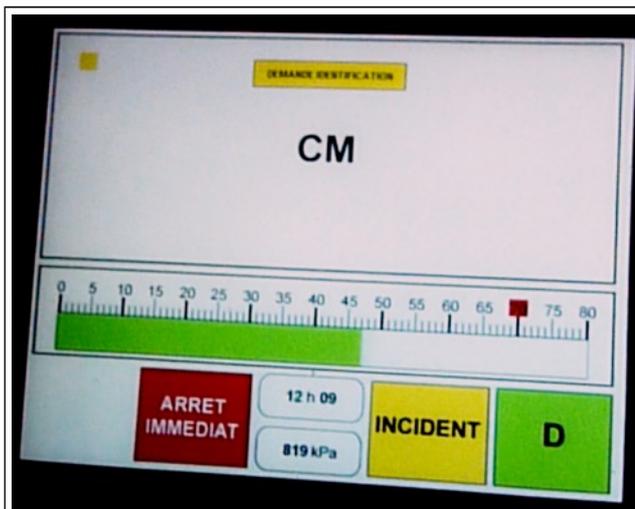
Les informations présentées par l'écran de droite renseignent sur les messages d'alarme. Ici, le message « Motrice inactive » est affiché, invitant le conducteur à rentrer dans le message.

*Vue n° 25 : écran récapitulant les messages à consulter*



Le train affiche un autodiagnostic sur son état afin de renseigner le conducteur. En l'état, c'est la dernière motrice qui est inactive.

*Vue n° 26 : état du train*



Le train vient de dérailler lors de l'entrée en station Barbès-Rochechouart avec un nouveau court-circuit. Ce qui affiche le message « **arrêt immédiat** ».

*Remarque : la vitesse affichée n'est pas la vitesse réelle, cela par commodité dans l'utilisation du simulateur.*

*Vue n° 27 : l'affichage lors du déraillement*

### 3.3.5 - Discussion sur le traitement des disjonctions d'intensité

Le 2 décembre 2016, la première DI n'a pas conduit à l'immobilisation du train. La tension d'alimentation rétablie automatiquement, l'application des règles de conduite de la RATP a abouti à la remise en marche. Puis le conducteur a fait une recherche de retenue au roulement<sup>5</sup> qui s'est révélée négative.

En effet, il est essentiel de ne pas séjourner en tunnel hors station, compte tenu des conséquences d'un incendie et des difficultés d'évacuation. D'ailleurs, ce principe explique l'inhibition du frein de secours sur les métros en interstation.

Comparée aux procédures des réseaux similaires de l'UITP<sup>6</sup>, la procédure RATP est plutôt plus restrictive que la moyenne : sur la majorité des réseaux, la DI n'est pas synonyme d'arrêt immédiat, mais de ralliement de la station suivante.

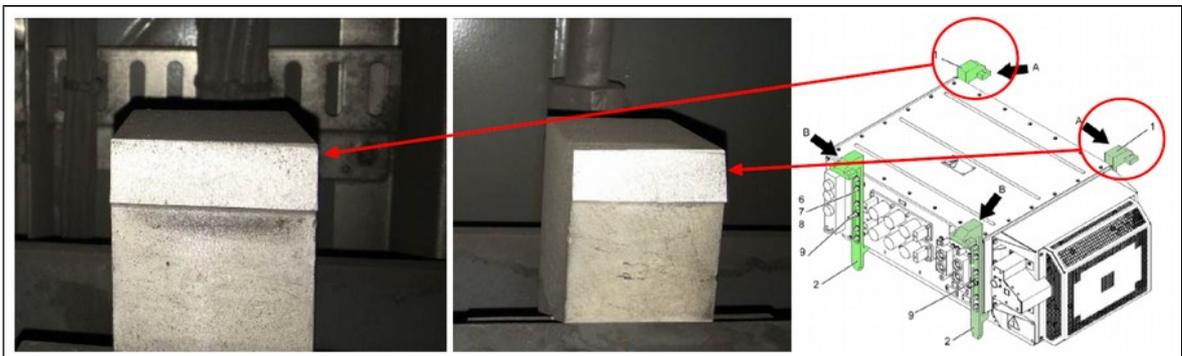
Compte tenu des avantages et des inconvénients potentiels de chaque option, rien ne montre aujourd'hui que la procédure de la RATP doive évoluer.

## 3.4 - Les pattes de fixation du coffre onduleur

### 3.4.1 - Le point de rupture des pattes

Les 4 pattes du coffre onduleur de la motrice N2 sont rompues :

- les 2 pattes courtes sont rompues au niveau du congé avec le faciès habituel d'une rupture en fatigue ;



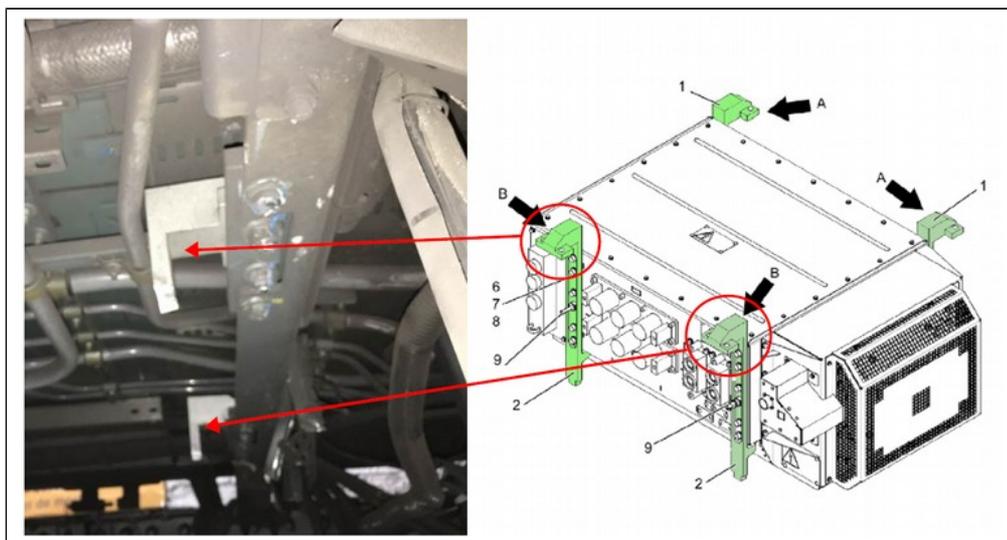
Vue n° 28 : position des pattes courtes sur le coffre

- les 2 pattes longues sont rompues plus bas, par flexion au niveau du premier trou de passage de vis sur la zone de lamage.

Compte tenu du sens de marche du train, les pattes longues se trouvaient à l'arrière. Celle à gauche est tordue laissant penser à un basculement du coffre vers l'avant.

5 La résistance anormale au roulement et le défaut de motricité à l'accélération sont 2 notions différentes.

6 Union Internationale des Transports Publics



Vue n° 29 : position des pattes longues sur le coffre

Aucune vis n'est manquante dans la fixation des pattes de maintien / poutre support.

### 3.4.2 - La conception de la patte

Le design et la nature de la matière des pattes ont évolué au cours du temps :

- au début des études de conception, les pattes étaient mécano-soudées en inox. Elles ont ensuite évolué en pièces usinées en aluminium.
- pendant la phase de conception et au début de la série, la nature de l'aluminium a évolué plusieurs fois, la dernière nuance référencée 6082-T651 étant la plus dure ; les changements de nuance ont fait suite à un problème de matage aux points de vissage et à une modification de la législation sur la protection des salariés vis-à-vis des substances utilisées pour le traitement de surface ;
- le rayon du congé, initialement à 15 mm sur les pattes mécano-soudées a évolué à 2 mm sur les pattes en aluminium.

Au final tous les trains ont été livrés avec des pattes en aluminium monobloc, obtenues par filage et usinage. Les premiers éléments de la flotte des MF01 ont fait l'objet d'un rétrofit pour recevoir des pattes au dernier design de juin 2009.

## 3.5 - La campagne de sécurisation des rames MF01 et MP05

Sans attendre la fin des enquêtes qui se sont orientées dès le début des investigations vers une rupture des pattes courtes par fatigue (confirmé par la suite), la RATP et ALSTOM ont mis en œuvre des mesures afin de reprendre l'exploitation.

La campagne de sécurisation a été orientée suivant trois axes :

- l'inspection visuelle de toutes les pattes de fixation sur l'ensemble de la flotte, orientée sur la recherche de ruptures ou de fissures détectables visuellement ;
- la mise en place d'un système provisoire de pare-chute du coffre onduleur indépendant afin de pallier les conséquences d'une nouvelle défaillance sur une patte : sanglage des coffres onduleurs pour l'ensemble des parcs MF01 et MP05 ;



*Vue n° 30 : coffre onduleur de MF01 sanglé*

- le contrôle par ressuage des 4 pattes de fixation de l'ensemble du parc des coffres onduleurs de MF01. Les quelques cas suspectés de fissuration ont fait l'objet de déposes immédiates systématiques et d'un nouveau contrôle par ressuage sur organes déposés ; ces derniers n'ont toutefois pas révélé de spectres de fissuration ou de fissures avérées.

## 4 - L'analyse du déroulement de l'accident

Les constats immédiats effectués après l'accident, rapportés dans le chapitre précédent, permettent de reconstituer le déroulement de l'accident.

Le vendredi 2 décembre 2016, le conducteur débute sa journée de service à la station Nation, où il prend la rame T2025 pour la marche 228 ; cette rame a déjà assuré plusieurs rotations. La circulation se fait en pilotage automatique et tout se passe conformément à ce qui est prévu jusqu'à la station La Chapelle.

À 11:59:42, après un arrêt à la station La Chapelle de 22 secondes, le train repart normalement. Le train est en conduite automatique. Une montée en vitesse jusqu'à 51,3 km/h est assurée, la vitesse limite étant à cet endroit de 55 km/h.

À 12:00:02, au passage du viaduc enjambant les voies de la gare du Nord, les pattes courtes du coffre onduleur situé sous la 4<sup>e</sup> voiture se rompent par fatigue. Il pivote vers l'avant. Les pattes longues subissent alors un effort de flexion au-delà de leur limite élastique et rompent brutalement. Ses quatre pattes de fixation étant rompues, le coffre onduleur se détache, chute sur la voie et provoque un court circuit, mettant hors tension le 3<sup>e</sup> rail. Conformément à ce qui est prévu en une telle circonstance, le pilotage automatique (PA) déclenche un freinage d'urgence (FU).

À 12:00:05, les voyants « arrêt immédiat » et « incident » s'allument sur le tableau de bord. Conformément à la procédure sur MF01, le conducteur commande, pendant la phase d'arrêt du pilotage automatique, un FU à l'aide de ses commandes en cabine.

À 12:00:10, le train est immobilisé sur le viaduc à 226 m environ en aval de la station La Chapelle. Le conducteur constate alors l'allumage du voyant « courant coupé » ; à l'aide du système de sonorisation, il fait une annonce aux voyageurs leur indiquant la panne de courant et la nécessité de patienter.

À 12:00:13, le court-circuit a disparu et le courant d'alimentation est rétabli automatiquement. Les voyants d'alarme s'éteignent en cabine de conduite.

À 12:00:32, conformément à la procédure, et comme aucune information ne s'oppose alors à la remise en mouvement de la rame, le conducteur passe en conduite manuelle contrôlée (CMC). A 12:00:38, le conducteur redémarre.

Après recherche par le PCC, le conducteur de la rame 228 signale qu'il doit être à l'origine de la DI. Constatant une perte de motricité et le voyant « incident » allumé sur son tableau de bord, il estime avoir deux motrices inactives. Le conducteur continue sa marche, car il applique la procédure consistant à rejoindre le quai le plus proche pour mettre en sécurité les voyageurs.

Pendant ce temps, le coffre est tiré, maintenu par ses câbles ou poussé par le bogie arrière de la 4<sup>e</sup> voiture, pour partie sur le rail de sécurité et pour partie sur le tapis PA.

À 12:00:47 : la vitesse est de l'ordre de 17 km/h ; le conducteur met en position neutre le manipulateur de traction, afin de détecter une éventuelle résistance à l'avancement. La vitesse reste constante, montrant ainsi l'absence de dureté mécanique contrariant le roulage du train.

Pendant les 50 secondes suivantes, il y a une succession d'accélération et de roulages sur l'erre, la vitesse montant à 37 km/h, pour un maximum autorisé de 55, puis de 40 km/h.

À 12:01:35, la vitesse est de 30 km/h ; le conducteur freine légèrement à l'approche de la station Barbès-Rochechouart.

Arrivé au niveau de l'appareil de voie n° 115, l'interruption naturelle du rail de sécurité a permis au coffre de descendre sur les traverses côté rail gauche. Le rail de la voie déviée entraîne alors le coffre vers le rail droit : le coffre se bloque dans la convergence, le bogie déraile en montant sur le coffre et sort de la voie.

À 12:01:37, le bogie arrière déraillé de la 4<sup>e</sup> voiture du train provoque un court-circuit en sortant du gabarit. Ce qui fait disjoncter à nouveau l'alimentation électrique. La vitesse du train est alors de 25 km/h.

À 12:01:45, le bogie déraillé et engageant le gabarit heurte le nez de quai de la station Barbès-Rochechouart ; la vitesse est alors de 15 km/h. Le train s'arrête sèchement avec les quatre premières voitures à quai et la dernière voiture totalement hors quai.

En parallèle, observant l'allumage du voyant « arrêt immédiat » à son tableau de bord, le conducteur arrête d'urgence son train, puis va à la visite de sa rame. Il constate le déraillement d'un bogie.<sup>7</sup>

Le PCC de la ligne 2 perd le contrôle de l'aiguille 115, située sur la voie circulée par la rame 228 à l'entrée de la station Barbès-Rochechouart. Après échange avec le conducteur de la rame 228, il identifie cette rame comme la cause de la disjonction suite au déraillement.

À 12:07, la police nationale et la brigade des sapeurs-pompiers de Paris arrivent sur place.

Aucun voyageur n'est blessé dans l'accident, ni lors de l'évacuation de la rame.

Le service complet de la ligne 2 sera rétabli le dimanche 4 décembre 2016 à 5 h 30 après remise en état des installations.

La cause immédiate du déraillement étant la chute du coffre onduleur suite à la rupture de ses pattes de fixation, nos investigations se sont concentrées sur la recherche de l'origine de cette rupture.

---

7 Le déraillement d'un second bogie sera constaté par une équipe d'intervention RATP.

## 5 - Les investigations sur la rupture des pattes de fixation

La **fatigue** d'un matériau peut être définie de la sorte : « la fatigue est l'endommagement du matériau par la répétition de sollicitations mécaniques alternées telles que celles produites par des vibrations. C'est un phénomène distinct de l'usure. Alors que la pièce est conçue pour résister à des efforts donnés, l'application répétée d'efforts plus faibles peut provoquer sa rupture. La rupture n'apparaît qu'au bout d'un temps considérable, fonction du niveau et du nombre de sollicitations. L'origine de la rupture réside dans une fissure minuscule, qui s'étend progressivement jusqu'à ce qu'il ne reste plus assez de métal sain dans la section transversale pour supporter l'effort appliqué. »

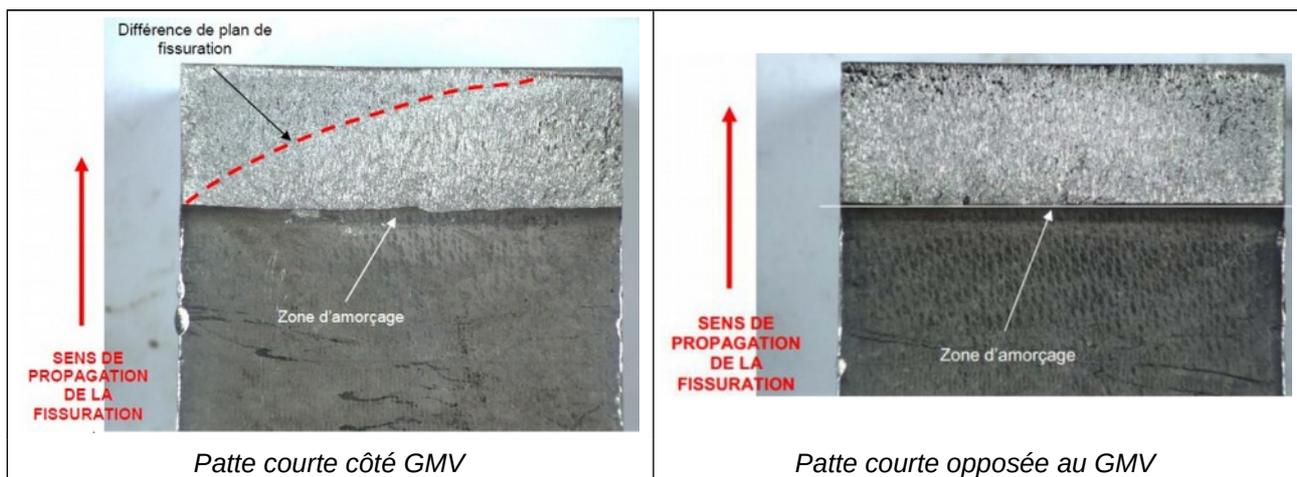
### 5.1 - Les analyses effectuées sur le coffre onduleur du déraillement

Des investigations ont été entreprises par la RATP et ALSTOM afin d'appréhender l'ensemble des phénomènes amenant à la rupture des pattes. Les quatre pattes du coffre MA-0028 ont été analysées par le laboratoire CETIM<sup>8</sup> de Senlis (60). Un extrait des travaux figure en annexe 3.

#### 5.1.1 - Les constats sur les pattes de fixation

Le CETIM a établi les constats suivants :

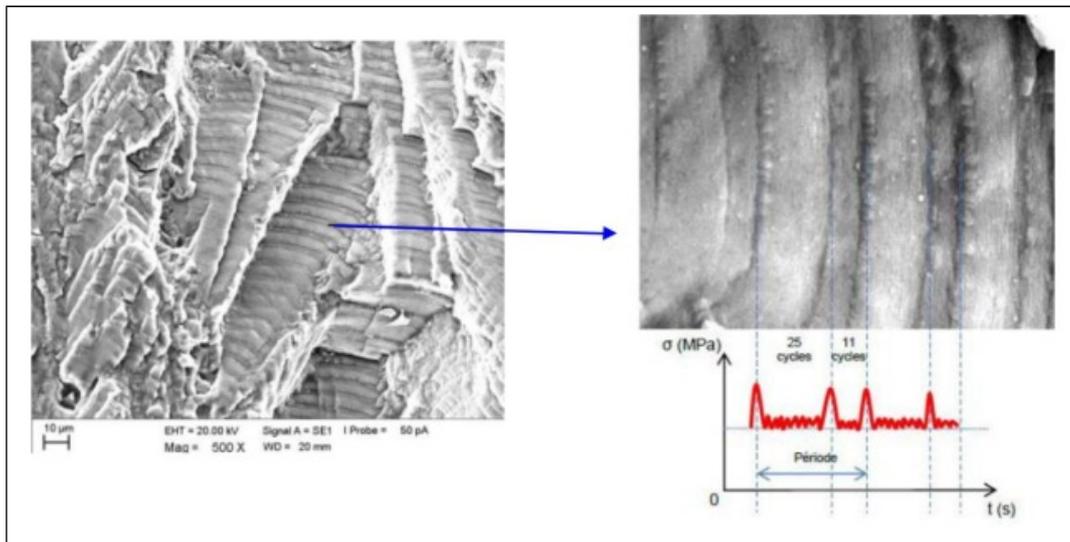
- Le matériau des pattes ne présente aucune anomalie et est conforme au référentiel technique ; l'analyse métallurgique a permis d'écarter la piste d'un défaut de fabrication ou d'une corrosion liée à l'environnement.
- Le faciès de rupture des pattes courtes est exclusivement constitué d'une **fissuration en fatigue**.
- Le faciès de rupture des pattes longues est de type rupture fragile par flexion. La rupture a résulté de l'application d'un effort important qui n'a pu se produire qu'après le déséquilibre du coffre, et donc la rupture des pattes courtes.
- Les pattes courtes ont rompu en premier, suivies ensuite par les pattes longues. Les pattes courtes ont commencé à se fissurer dans la zone du rayon entre la partie supérieure et la partie en appui sur le coffre onduleur.



Vue n° 31 : faciès de rupture en fatigue des pattes courtes

8 CEntre Technique des Industries Mécaniques : organisme professionnel des industries mécaniques, de recherches et développements et d'expertises

Sur les pattes courtes, un motif répétitif de stries, caractéristique de la rupture en fatigue, a été observé sur toute la zone de propagation de la fissure, avant la phase de rupture brutale. Ce motif répétitif se compose par un enchaînement de 25 puis de 11 cycles. Le CETIM a estimé le nombre de cycles avant la rupture à une valeur comprise entre 400 000 et 1 200 000 cycles.

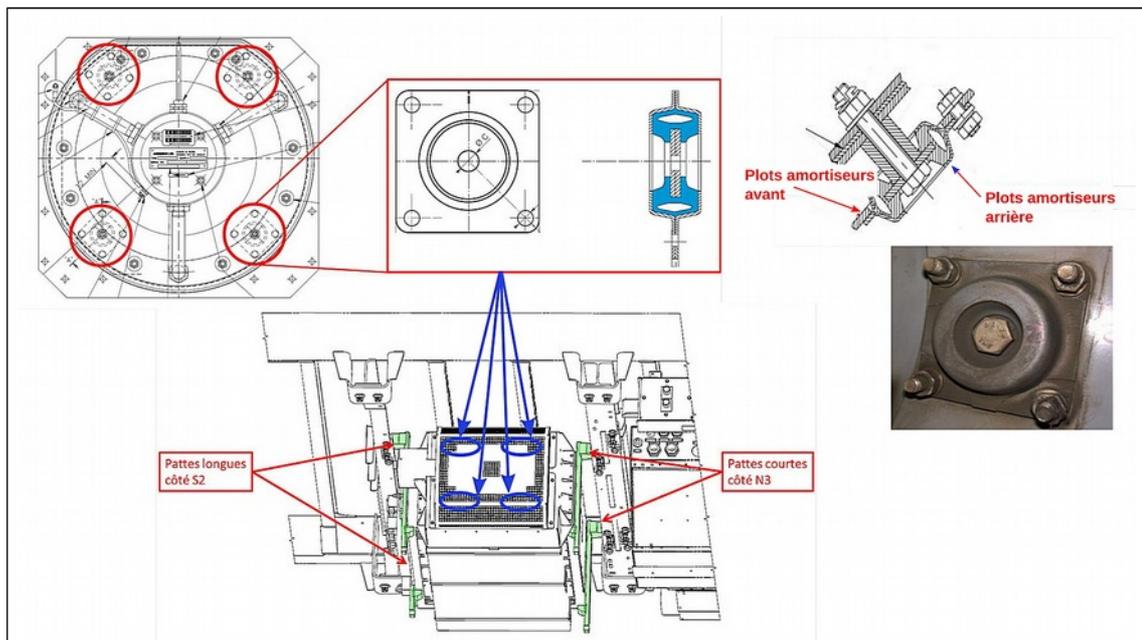


Vue n° 32 : motif périodique observé lors de l'analyse du faciès de rupture

### 5.1.2 - Les constats sur les plots amortisseurs

Comme nous l'avons vu au paragraphe 2.5.2, le coffre onduleur est muni d'un groupe motoventilateur (GMV) fixé en porte-à-faux en extrémité et qui assure son refroidissement.

En mécanique, les machines tournantes sont isolées de leur structure porteuse pour réduire le niveau vibratoire transmis. Dans le cas du coffre onduleur, l'isolation entre le coffre et le GMV est faite au moyen de quatre paires de plots amortisseurs. (voir vue suivante).



Vue n° 33 : les plots amortisseurs du GMV

Chaque plot est constitué de 2 demi-plots, assemblés en recto-verso ; dit plot double.

Les conclusions du CETIM indiquent que :

- la matière a conservé les qualités initiales d'amortissement et de dureté ;
- des traces de fatigue sont visibles sur le caoutchouc ;
- des zones d'amorçage de fissure en fatigue sont visibles sur les parties métalliques.

## 5.2 - L'incident précurseur de décembre 2015 et l'influence des plots amortisseurs

### 5.2.1 - Les faits

Le 16 décembre 2015, lors d'une opération de maintenance courante sous caisse, une patte courte fissurée a été découverte inopinément sur un train MF01 sans qu'il y ait eu chute. Elle fixait le coffre onduleur référencé MA-0062 à la motrice N1 de la rame T2027 de la ligne 2.



*Vue n° 34 : patte cassée du coffre onduleur MA-0062 découverte le 16 décembre 2015*

Une campagne de vérification d'intégrité des pattes est alors lancée par la RATP sur tous les coffres onduleurs identiques de son parc ; c'est-à-dire ceux en service sur les MF01 et les MP05, ainsi que tous les coffres onduleurs en maintenance ou en stock, soit environ 850 coffres onduleurs. Cette campagne est terminée, sur la ligne 2, le 12 avril 2016. La campagne, qui n'a pas identifié d'autre cas de casse, se voulait exhaustive ; on verra au paragraphe 5.6 que ce ne fut pas le cas.

Par ailleurs, des investigations ont été menées par la RATP en début 2016, avec l'appui de son Laboratoire d'Essais et Mesures. Il en est ressorti que :

- la fissure se révèle être une rupture ; il n'a pas été fait cas de faciès de rupture en fatigue ;
- l'autre patte courte était intègre ;
- les analyses matières et morphologiques se sont révélées conformes ;
- un défaut de positionnement angulaire entre le coffre onduleur et le support rompu est avancé comme une des hypothèses possibles de la rupture.

La RATP informe ALSTOM de l'évènement. Cette dernière indique ne pas avoir connaissance de problème similaire sur d'autres projets et conclut que le cas rencontré sur MF01 est, à date, un cas isolé.

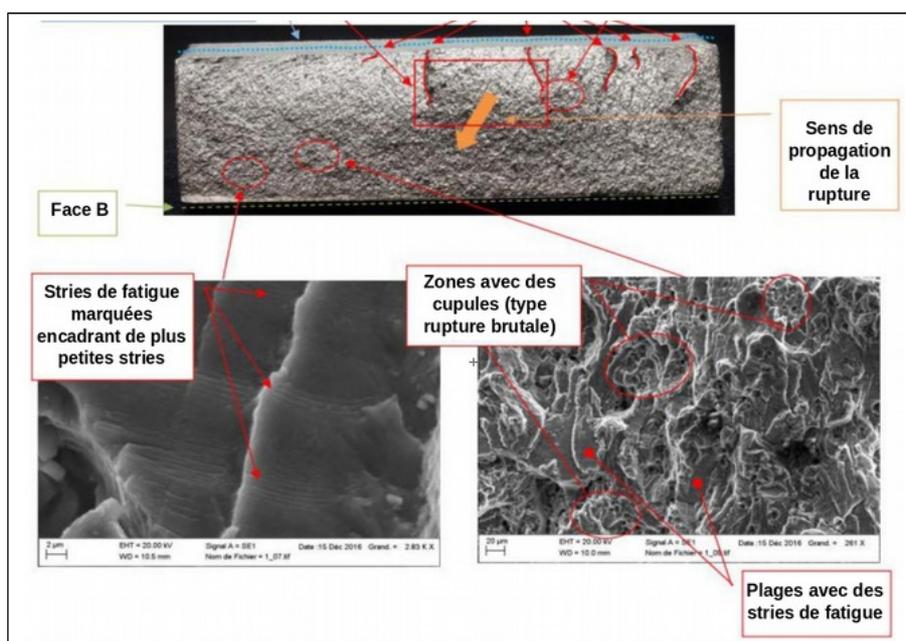
Début janvier 2016, ALSTOM ouvre également une procédure interne d'investigation sur cette rupture, en attente d'informations complémentaires de la RATP. En avril 2016, suite au retour de la RATP confirmant qu'aucun autre cas n'avait été observé sur les rames MF01 et MP05 (les autres cas identifiés comme suspects au cours de la campagne de vérification n'ont finalement pas été confirmés), la rame T2027 étant sortie de garantie depuis 2 ans et n'ayant pas d'autre élément permettant d'avancer, la procédure est clôturée par ALSTOM.

De son côté, la RATP a clos l'incident en mars 2016, privilégiant l'hypothèse d'une rupture brutale liée à l'application d'un effort excessif.

Le rapport d'expertise réalisé par le Laboratoire d'Essais et Mesures de la RATP sera diffusé à ALSTOM en décembre 2016, consécutivement au déraillement du 2 décembre 2016.

### 5.2.2 - L'expertise a posteriori de la patte rompue en 2015

Après le déraillement de décembre 2016, le faciès de rupture de la patte rompue en 2015 (qui avait été conservée) est ré-analysé avec un microscope électronique à balayage, plus puissant que lors de la précédente étude. Des traces de fatigue sont identifiées.



Vue n° 35 : faciès de rupture de la patte courte du coffre onduleur MA-0062

L'analyse a mis en évidence que le faciès de rupture présente des plages de fatigue, similaires à celles observées sur le cas de 2016. Le faciès présente également des traces de ruptures brutales.

### 5.2.3 - L'influence des plots amortisseurs

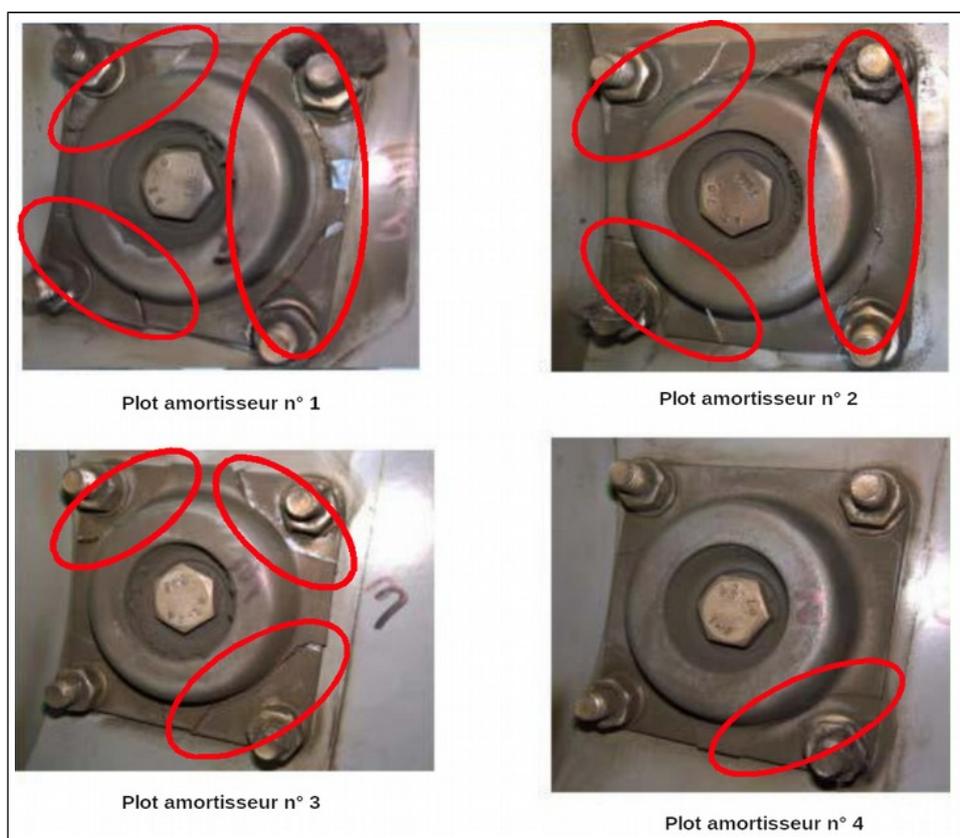
Le coffre onduleur MA-0062 qui a été déposé en décembre 2015 et conservé tel quel en stock RATP a été expertisé par ALSTOM le 21 décembre 2016. Les résultats sont :

- la mesure du niveau vibratoire du GMV est conforme aux prescriptions du constructeur (voir paragraphe 5.4.1) ;
- le GMV est peu encrassé, contrairement au radiateur ;
- les plots supportant le moteur du GMV monté sur ce coffre sont **déchirés** dans la partie en caoutchouc et **fissurés** dans la partie métallique.

Nota : un plot est déchiré lorsque le composant élastique est altéré ; il est fissuré lorsque sa partie métallique est altérée.

En ce qui concerne les coquilles de fixation, c'est la première fois qu'ALSTOM a connaissance sur ce type de GMV d'une telle fissuration des coquilles métalliques des plots amortisseurs, en retour d'exploitation ou suite à des essais de qualification ou d'investigations.

En ce qui concerne les plots amortisseurs, des déchirures de caoutchouc avaient été observées à la fin des essais de qualification en endurance au balourd pour un nouveau design de GMV réalisés par VIBRATECH<sup>9</sup> en 2009. Les déchirures sont considérées être le mode attendu de dégradation de ce composant.



Vue n° 36 : fissures sur les plots du coffre onduleur MA-0062

9 VIBRATEC : laboratoire de mesures spécialisé en dynamique des structures, en bruit et vibration

L'expertise montre que, sur les deux coffres onduleurs qui ont subi une rupture de patte de fixation, ceux-ci connaissaient également une fissuration des plots amortisseurs des GMV.

Cela montre que la fixation du GMV est soumise à un niveau de contraintes anormal.

#### **5.2.4 - L'absence de retour d'expérience**

L'évènement de décembre 2015 rassemble les éléments identifiés dans les causes du déraillement de décembre 2016 :

- une rupture de la patte de fixation par fatigue ;
- des plots amortisseurs fissurés.

Or, ces deux éléments ne seront identifiés que postérieurement au déraillement de décembre 2016. Il nous semble que les échanges entre ALSTOM et la RATP sur ce quasi-incident n'ont pas été suffisants.

Au regard du déraillement de Barbès-Rochechouart, l'évènement de décembre 2015 n'a été traité ni par l'exploitant, ni par le constructeur, avec la profondeur nécessaire à un enrichissement du retour d'expérience.

Nous y reviendrons dans le paragraphe 5.8 traitant des échanges entre ALSTOM et la RATP.

### **5.3 - Les essais complémentaires réalisés par la RATP et ALSTOM**

À la suite des nouveaux résultats sur l'incident de 2015, la RATP et ALSTOM ont entrepris une série d'investigations afin de cerner l'influence de la détérioration des plots amortisseurs des GMV.

#### **5.3.1 - Le contrôle des plots des GMV de l'ensemble du parc**

Les plots de tous les GMV ont été contrôlés ; c'est-à-dire ceux en service comme ceux en stock ou en maintenance. À fin août 2017 :

- 417 coffres onduleurs en service sur 139 rames avaient été contrôlés :
  - 4 GMV ont été détectés avec un ou plusieurs plots déchirés (3 cas sur la ligne 2 et 1 cas sur la ligne 9) ;
  - 2 autres GMV ont été détectés avec des plots fissurés (coffres onduleurs MA-0023 et MA-0046) ;
- 18 coffres onduleurs MF01 en maintenance avaient été contrôlés. Un seul coffre présentait des plots déchirés, mais non fissurés.

#### **5.3.2 - Les coffres onduleurs de la voiture N1 de la rame T2027**

Les deux coffres onduleurs MA-0028 (2016) et MA-0062 (2015) ont en commun, en plus de la rupture de la patte de fixation, d'être passés sur la rame T2027 en position motrice N1 (voir en annexe 2). La RATP et ALSTOM ont contrôlé les plots des différents coffres onduleurs qui sont passés sur ce véhicule.

Des déchirures et des fissures ont été trouvées sur les coffres onduleurs MA-0046 et MA-0023. Le GMV de ce dernier sera envoyé en l'état au CETIM pour les essais d'investigations (voir paragraphe 5.4.1), c'est-à-dire sans qu'il soit nettoyé.

Aucune autre découverte de cas de fissures de coquille métallique de plot amortisseur n'a été remontée depuis mars 2017.

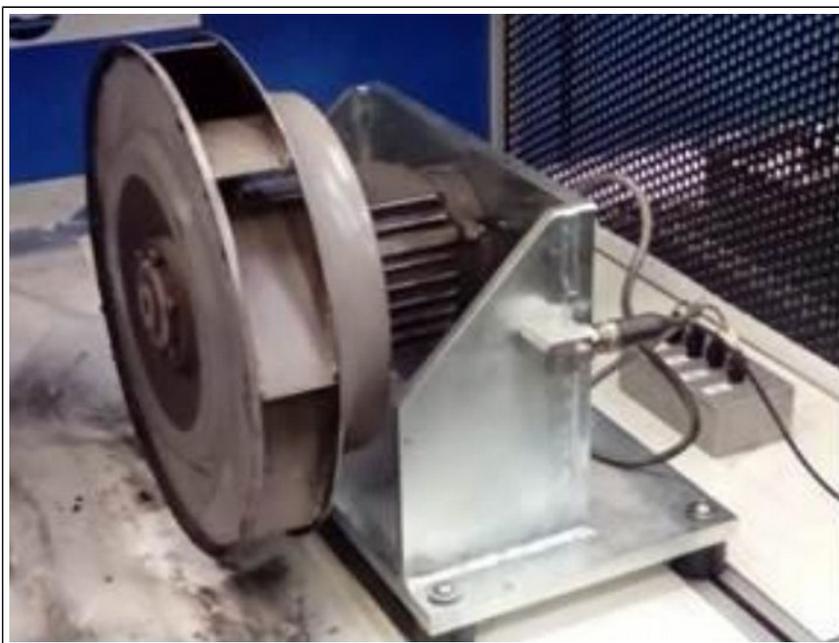
### **5.3.3 - Le cas du coffre onduleur MA-6159**

Ce coffre fait partie des quatre coffres sur lesquels des plots déchirés ont été détectés.

Il est déposé le 13 février 2017 de la rame T2135, rame mise en service en mai 2015. Cette dépose fait suite à un signalement d'un voyageur rapportant un état de vibrations excessif ressenti au niveau du train. Les mesures réalisées *in situ* confirment que le GMV présente un niveau anormal de vibrations.

Lors de son expertise par la RATP, les plots amortisseurs sont observés déchirés. Aucune fissure n'est observée. La roue, qui présente des amas de poussière, est placée sans nettoyage sur un banc d'équilibrage. Les mesures obtenues confirment que le GMV présente un niveau vibratoire important.

L'amas de saletés présentes sur la roue génère de la vitesse vibratoire sur l'hélice, par effet de balourd.



Vue n° 37 : roue du coffre onduleur MA-6159 sur le banc d'équilibrage

### **5.3.4 - La campagne d'essai sur la ligne 2**

Une campagne d'essais de mesures en dynamique a été menée, sur la ligne 2, en janvier 2017 pour caractériser l'environnement du coffre onduleur. L'objectif était de mesurer les contraintes mécaniques et vibratoires subies par les pattes du coffre en fonction des paramètres suivants :

- mode de pilotage du train (conduite manuelle ou conduite automatique) ;
- spécificité de l'infrastructure (sinuosité de la voie, appareils de voie...) ;
- sens de circulation du train ;
- freinage d'urgence ;
- niveau d'encrassement du GMV.

Des mesures complémentaires en statique ont été faites pour évaluer l'impact :

- du niveau de serrage des vis de fixation ;
- du sens de rotation du GMV ;
- de la manutention du coffre onduleur lors des opérations de maintenance.

Les résultats de cette campagne montrent que les densités spectrales des accélérations mesurées au niveau de l'essieu respectent le gabarit de la norme NF EN 61373 (voir paragraphe 2.7). Et l'environnement dans lequel le matériel MF01 évolue sur la ligne 2 ne présente aucune singularité.

Également, les efforts créés pour la manutention ou bien l'influence de l'ordre de serrage des vis de fixation se sont révélés sans impact sur la tenue des pattes de fixation.

## 5.4 - Les essais complémentaires du CETIM et de VIBRATEC<sup>10</sup>

Les analyses des essais précédemment cités ont isolé trois facteurs pouvant intervenir sur l'origine de la rupture :

- la vibration du GMV créée par l'encrassement ;
- la dégradation des plots amortisseurs ;
- les contraintes de montage du coffre onduleur sur ses supports.

La RATP et ALSTOM ont alors engagé des essais complémentaires au CETIM et chez VIBRATEC afin de caractériser chacun des trois facteurs précédemment identifiés et construire un scénario amenant à la ruine des pattes.

### 5.4.1 - La vibration créée par l'encrassement

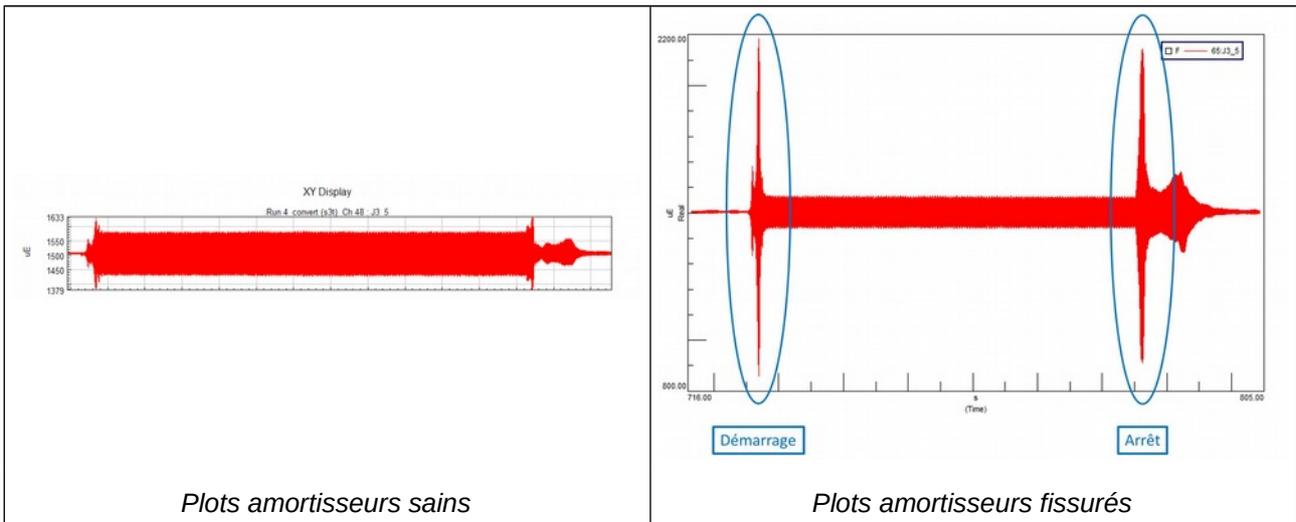
Pour évaluer l'impact du balourd sur les niveaux de contraintes dans les pattes de fixation, les essais ont été faits dans un premier temps avec un GMV en l'état, c'est-à-dire « encrassé », puis dans un second temps avec ce même GMV nettoyé. La vitesse vibratoire maximale passe de **21 mm/s** dans la configuration encrassée à **2,4 mm/s** après nettoyage.

Les valeurs maximales de la vitesse vibratoire s'observent lors des phases de démarrage et d'arrêt du GMV où des phénomènes d'amplification dynamique sont observés. Ces phases transitoires sont génératrices de contraintes temporairement plus fortes pour les pattes de fixation. En exploitation, le GMV est arrêté en station afin d'y abaisser l'environnement sonore (il s'arrête de fonctionner lorsque la vitesse du train est inférieure à 12 km/h). Les cycles de démarrage et d'arrêt sont donc nombreux. Le démarrage est très rapide ; l'arrêt demande 1 à 2 minutes environ. La phase stabilisée intermédiaire, celle de l'interstation, présente un état plat peu significatif.

---

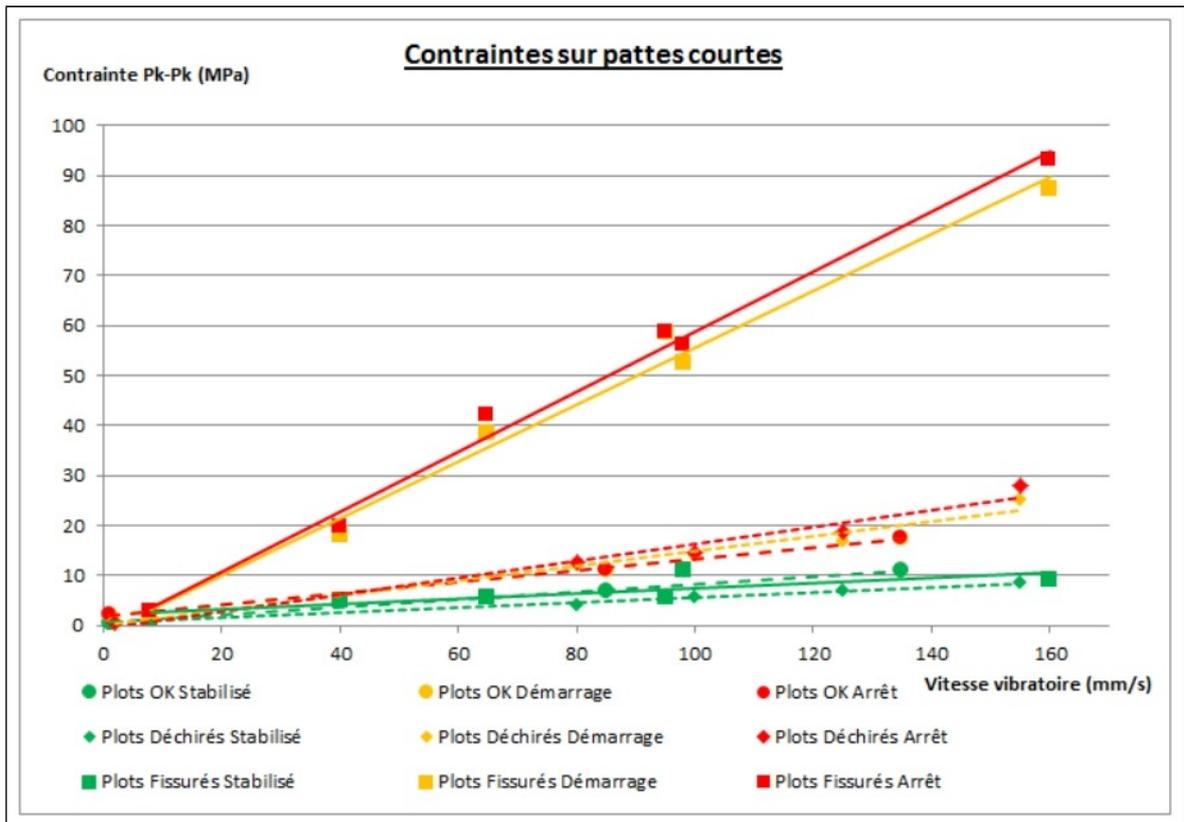
10 VIBRATEC : laboratoire de mesures spécialisé en dynamique des structures, en bruit et vibration

## 5.4.2 - Les essais avec des plots dégradés



Vue n° 38 : contrainte dans les pattes de fixation

Les investigations ont montré que les sollicitations importantes mesurées en régime de démarrage et d'arrêt, étaient amplifiées avec des plots déchirés et fissurés. Il est à noter que, à iso vitesse vibratoire, l'impact de la fissuration des plots est plus important que l'impact d'une déchirure.

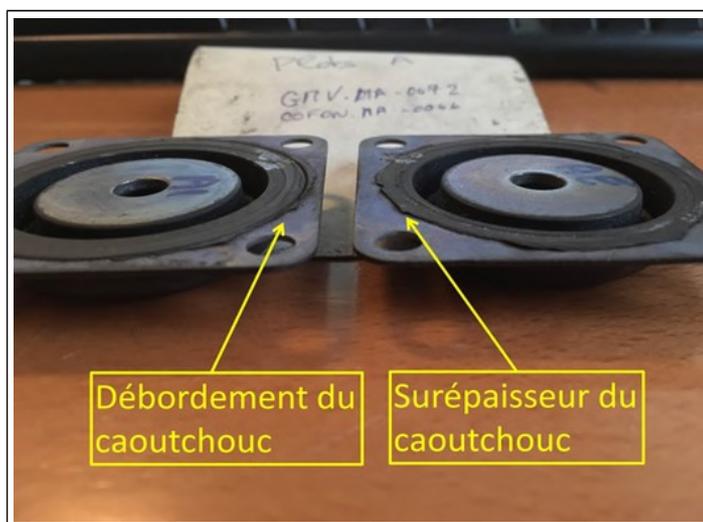


Vue n° 39 : mesures de la contrainte dans les pattes lors des phases de démarrage et d'arrêt du GMV avec plots sains, déchirés ou fissurés

Sur le diagramme ci-dessus, on constate que, pendant les phases de démarrage ou d'arrêt, la contrainte subie par les pattes est plus forte dans le cas de plots fissurés que la contrainte subie dans le cas de plot déchirés ou neufs ; et ce, même à des niveaux vibratoires supérieurs. Le coefficient d'amplification est de l'ordre de **4,2** pour les phases de démarrage et de l'ordre de **4,7** pour les phases d'arrêt.

#### **5.4.3 - Malfaçon sur les plots amortisseurs**

L'apparition des contraintes statiques au montage des plots a été mise en évidence en présence de plots présentant des débordements et/ou surépaisseur d'élastomère (caoutchouc) en interface des plans de contact des deux plots en vis-à-vis. Ce phénomène de débordement et/ou surépaisseur a été observé sur des plots fissurés. Les fissurations sont la conséquence de contraintes de montage des plots importantes associées à des sollicitations dynamiques, même de faible valeur.



*Vue n° 40 : caoutchouc  
créant des contraintes de montage*

Les essais ont confirmé une similitude de dégradation des plots sur les deux coffres onduleurs ayant subi une rupture de patte.

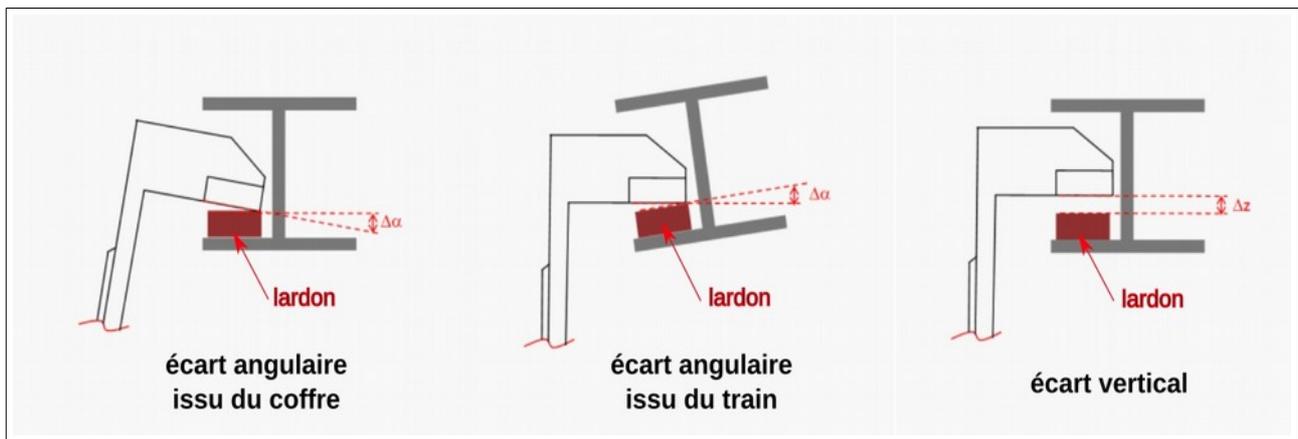
#### **5.4.4 - Les contraintes de pose du coffre onduleur**

Différents essais de mesure des contraintes de montage ont été réalisés sur trois rames sélectionnées de manière aléatoire. Les contraintes au début du rayon de 2 mm du congé des pattes courtes, c'est-à-dire au point chaud (où les contraintes sont maximales), varient de 50 MPa à 160 MPa.

Les contraintes mesurées sur les pattes longues sont très inférieures aux contraintes des pattes courtes.

La liaison patte-poutre sous train présente un hyperstatisme de conception : elle doit reprendre les défauts de géométrie des constituants, dont la cause peut être :

- un écart vertical ;
- un écart angulaire issu de la patte fixée au coffre ;
- un écart angulaire venant d'un défaut de planéité de la poutre sous train.



Vue n° 41 : liaison patte du coffre onduleur – poutre sous train

Les essais ont permis d'identifier l'origine de ces valeurs de contraintes qui est liée à l'angle entre la poutre et la patte. Cette différence angulaire est plus pénalisante qu'un angle généré par un défaut d'altitude entre les deux poutres, du fait de la flexibilité du coffre qui autorise une légère mise en losange.

À l'issue de ces essais, il a été mesuré que la contrainte sur les pattes courtes évolue de 100 MPa pour 1° de défaut angulaire entre la patte et le lardon, ce qui signifie que les contraintes occasionnées pour un défaut angulaire supérieur à 2,4° pourraient dépasser la limite élastique de l'aluminium ( $R_e = 240$  MPa).

#### 5.4.5 - Conclusions

Les essais ont confirmé que la combinaison des trois facteurs « contraintes de montage » importantes et « contraintes dynamiques » modérées associées à des « plots fissurés » était suffisante pour endommager les pattes de fixation.

Le tableau suivant résume la variation des contraintes dans les pattes :

référence	cause	valeurs	coefficient multiplicateur
§ 5.4.1	encrassement	la valeur de la vibration passe de 21 mm/s à 2,4 mm/s après nettoyage	<b>8,8</b>
§ 5.4.2	plots dégradés	valeur mesurée	<b>4,7</b>
§ 5.4.4	contraintes de montage	le passage d'un écart de 1° à 2,4° (limite maximale) dans la liaison avec le support	<b>2,4</b>

Compte tenu des caractéristiques du métal employé, un seul des effets exposés ci-dessus ne suffit pas à provoquer l'apparition de fissures dans les pattes. En particulier, les contraintes dues au seul encrassement du GMV ne suffisent pas à la ruine des pattes. Par contre, la simultanéité des trois causes y mène inévitablement.

On peut considérer que les contraintes dues aux malfaçons sur les plots amortisseurs et aux écarts angulaires de pose du coffre sont les éléments qui amènent au franchissement de la limite. En effet, ils sont aisément identifiables et faciles à maîtriser. L'encrassement est plus difficile à maîtriser car il est tributaire de l'état du milieu d'exploitation, par nature hasardeux.

## 5.5 - La norme NF EN 61373 de dimensionnement des pattes de fixation

### 5.5.1 - Champ d'application de la norme

Dans le chapitre d'introduction de la norme, il est écrit que la norme NF EN 61373 « traite des exigences relatives aux essais de vibrations aléatoires et de chocs des matériels/composants pneumatiques, électriques et électroniques destinés à être installés sur des véhicules ferroviaires [...] »

*Les essais contenus dans la présente norme sont spécifiquement destinés à démontrer l'aptitude des matériels soumis aux essais à résister au type de conditions de vibrations environnementales auxquelles les véhicules ferroviaires sont normalement exposés [...] »*

Ce même chapitre d'introduction stipule précisément que « La présente norme n'est pas destinée à traiter des vibrations auto-induites, étant donné que celles-ci seront spécifiques à des applications particulières. »

### 5.5.2 - Les notes de calcul du constructeur

À la suite du déraillement, le constructeur ALSTOM a refait ses calculs des sections de la patte. Son modèle numérique a été effectué avec un angle droit dans le congé, qui est la situation la plus défavorable. Les calculs simulant les requis de la norme ont confirmé que les pattes avaient des sections suffisantes pour résister en fatigue aux efforts de tenue du coffre onduleur. Des essais selon la norme NF EN 61373, faits au CETIM, ont confirmé les résultats des calculs.

En première approche le design des pattes (matière, dimensionnement) est satisfaisant par rapport aux règles de conception utilisées.

Or, au vu des résultats des diverses expertises exposées plus haut, ce ne sont pas les vibrations provenant de l'environnement ferroviaire, mais pour partie les vibrations auto-induites qui sont à l'origine des efforts ayant entraîné la ruine des pattes de fixation du coffre onduleur, et donc le déraillement du 2 décembre 2016.

### 5.5.3 - Conclusion

**Le respect de la norme NF EN 61373 protège certes des sollicitations générées par l'infrastructure ferroviaire et la circulation en convoi, mais ne protège pas des dommages consécutifs aux vibrations propres.**

Aujourd'hui, il n'existe pas de norme vis-à-vis des contraintes autogénérées.

## 5.6 - La non-vérification du coffre onduleur MA-0028 lors de la campagne post-incident 2015

ALSTOM et la RATP ont recherché à tracer l'historique complet du coffre onduleur MA-0028 dont la chute a provoqué le déraillement ; celui-ci est présenté en annexe 2.

Cette recherche a montré que :

- les pattes de fixation présentes au moment de l'accident étaient celles installées depuis la mise en service du coffre en juillet 2009 ;
- ce coffre onduleur aura été monté sur 5 trains différents et renvoyé en réparation 3 fois : 2 fois aux ateliers de maintenance de la RATP et 1 fois chez ALSTOM Tarbes.

Pour rappel (voir paragraphe 5.2), à la suite de la découverte en décembre 2015 d'une rupture de patte de fixation d'un coffre onduleur, la RATP avait lancé une campagne de vérification d'intégrité de toutes les pattes des coffres onduleurs similaires. La campagne s'est terminée pour la ligne 2, le 12 avril 2016.

Le 15 décembre 2015, au moment où la RATP débute les mesures de vérification, le coffre onduleur MA-0028 est en retour de ALSTOM-Tarbes, en transit entre les ateliers RATP de maintenance des équipements (AME) de Saint-Ouen vers l'atelier RATP réparateur de Charonne. Les AME et les ateliers réparateurs n'ayant pas été destinataires de l'ordre de travail de cette vérification, le coffre onduleur MA-0028 n'a pas été inclus dans la campagne de contrôle.

Le 29 mars 2016, le coffre onduleur MA-0028 sera posé sur le train T2027, puis démonté 6 heures plus tard suite au constat d'un mauvais sens de rotation du GMV ; il sera alors déclaré « mauvais » par l'atelier de Charonne et versé au SAV ALSTOM en attente de ré-envoi à Tarbes pour réparation.

Le 8 avril 2016, la RATP identifie la cause du mauvais sens de rotation du GMV : cela vient d'une inversion de câblage de la rame T2027.

Le 25 avril 2016, le SAV ALSTOM valide le coffre onduleur MA-0028 « bon » et réparé, et le transmet à l'atelier RATP de Charonne. Au moment de cette transmission, la campagne de vérification initiée par la seule RATP est terminée depuis une dizaine de jours.

### **Les pattes de fixation du coffre onduleur MA-0028 n'ont pas été vérifiées dans le cadre de la campagne post-incident 2015.**

Quatre jours plus tard, le coffre onduleur MA-0028 sera monté par le SAV ALSTOM sur la motrice N2 de la rame T2025. Le déraillement à la station Barbès-Rochechouart se produit 7 mois plus tard.

La campagne de vérification, qui se voulait exhaustive, ne l'a pas été.

Toutefois, dans une rupture en fatigue, la dégradation d'une structure se décompose en deux phases : une phase longue d'amorçage, non visible, suivie d'une phase courte de propagation, où se produit l'ouverture des fissures.

Le comptage des stries effectué par le CETIM (*voir annexe 3 : page 82, 3<sup>e</sup> paragraphe*) indique un nombre de cycles total entre 500 000 et 1 200 000, dont uniquement 118 826 stries en phase 2 de propagation de la fissure avant la rupture des pattes. Parmi ces stries, un motif de 36 stries se reproduit et correspond au nombre de cycles endommageants lors des phases de démarrage (11 stries) et d'arrêt (25 stries) du GMV.

Ainsi, il y a eu 3 300 répétitions du motif (118 826 stries divisées par 36) avant d'arriver à la rupture.

La ligne 2 comporte 25 stations pour 12,3 km. La loi de fonctionnement impose un arrêt du GMV à chaque arrivée en station et un démarrage à chaque montée en vitesse, soit 36 cycles endommageants par station. En considérant un fonctionnement avec un démarrage / arrêt pour chaque station, cela correspond donc à 900 [= 25 x 36] cycles endommageant pour 12,3 km.

Le train a parcouru 39 163 km entre la date de pose du GMV et sa chute sur les voies, correspondant à environ 2,87 millions de cycles endommageants ou 79 600 motifs.

S'il y avait eu une fissuration des pattes de fixation du coffre avant sa pose sur la rame T2025, il aurait été généré autant de stries de fissuration que de cycles

endommageants liés à son fonctionnement. Le nombre de stries comptées par le CETIM, très inférieur au nombre de cycles endommageants pour la période de pose sur la T2025, permet donc de supposer qu'aucune fissure n'était encore présente à la pose du coffre sur le train T2025, bien que le processus de fatigue soit déjà largement amorcé.

Pour conclure, si le coffre à l'origine du déraillement avait été contrôlé lors de la campagne de 2016, aucune fissure n'aurait été vraisemblablement trouvée étant donné que les sollicitations ayant engendré ces fissures ont été appliquées sur une durée *a priori* postérieure à la pose du coffre sur le train.

## **5.7 - La maintenance du GMV**

Bien que les investigations aient montré que la détérioration des pattes ne résulte pas directement d'un balourd sur l'hélice du GMV, consécutivement à un encrassement de celle-ci, nous avons examiné les conditions de maintenance de cette hélice.

### **5.7.1 - Le prescrit**

Le constructeur a défini les requis et la méthodologie de maintenance de ses coffres onduleurs pour le MF01 dans un document transmis à l'exploitant. La version 2013 de ce document prescrit de mesurer le niveau vibratoire après nettoyage afin de s'assurer de la bonne réalisation du nettoyage, la valeur maximale admise étant de 9 mm/s.

En complément, le plan de maintenance des organes déposés prescrit de vérifier, au bout de 600 000 km, le roulement et les plots amortisseurs qui sont des pièces d'usure, et de les remplacer en cas de défaut.

Ces dispositions de maintenance du GMV n'ont pas fait, dans le cadre de l'instruction du dossier de sécurité du projet MF01, l'objet de remarque d'une part lors du contrôle par l'organisme qualifié agréé (OQA), d'autre part lors du contrôle des services de l'État assuré par le STRMTG, en l'absence de retour d'expérience particulier connu à cette époque.

### **5.7.2 - Le réalisé**

La RATP réalise les opérations de maintenance du GMV conformément au guide des requis et méthodologie du constructeur, mais n'effectue pas la mesure du niveau de balourd résiduel.

En effet, les préconisations de maintenance ont évolué au cours du temps. La maintenance sur les coffres onduleurs s'est durcie au début de la série MF01, faisant suite à un REX du constructeur sur des coffres onduleurs d'autres réseaux. Ce qui amènera ALSTOM à modifier la fixation du ventilateur en renforçant le GMV par un double anneau. Ainsi, les études conduites par ALSTOM sur la maintenance de son produit ont conduit à renforcer la maintenance préventive du GMV, qui est alors devenue plus contraignante. La mesure de la vitesse vibratoire post-maintenance a été alors inscrite dans la notice constructeur d'avril 2013.

La mesure de la vitesse vibratoire de l'hélice est incompatible avec la réglementation du travail et la protection des salariés : en exécutant l'opération telle que prescrite, il s'agit d'un élément tournant à nu devant un opérateur, provoquant un jet d'air chargé en poussières dans l'environnement de l'opérateur.

Pour surmonter cette difficulté, sachant que la mesure de la vitesse vibratoire n'est pas marquée « Opération de sécurité » par le constructeur, ALSTOM et la RATP ont réalisé un

test de mesure du balourd post-nettoyage sur trois GMV. Les trois résultats étant inférieurs à 9 mm/s, donc conformes aux requis, ALSTOM et la RATP se sont alors accordés pour ne faire cette mesure que annuellement, sur un échantillon de la flotte MF01. Toutefois cet échantillon n'a pas été défini et les outillages nécessaires à sa bonne réalisation n'ont pas été développés.

Quant aux plots amortisseurs, leur maintenance est réalisée au travail réel : leur changement est prévu après 600 000 km, qui est la distance atteinte après 25 000 h de fonctionnement du GMV. À la date de l'accident, aucune rame MF01 n'avait atteint les 600 000 km.

Suite au déraillement de 2016, ALSTOM a travaillé au développement d'un caisson de filtration des poussières. Les résultats semblent donner satisfaction et permettront d'effectuer toutes les opérations de maintenance ; et ce, en conformité avec la réglementation du travail.

### **5.7.3 - Les écarts, le constat**

Vu sous l'angle du constructeur, il est nécessaire d'effectuer une maintenance consciencieuse, en respectant les opérations et seuils prescrits.

Vu sous l'angle de l'exploitant, la maintenance ne peut être effectuée qu'en respectant la législation sur le travail et la protection des salariés.

L'écart entre la situation projetée et le réalisé montre l'intérêt que la maintenance d'un matériel soit traitée dès la phase PROJET ; et que ses évolutions ultérieures fassent l'objet d'une analyse d'impact véritable et partagée.

## **5.8 - Relations constructeur / exploitant**

### **5.8.1 - L'analyse du traitement de l'incident de 2015**

Le traitement de l'incident de décembre 2015 fait apparaître des relations que l'on peut qualifier de non constructives :

- La RATP a traité en interne, communiquant peu avec ALSTOM avant l'accident de 2016. Les cas suspects analysés par la RATP se sont révélés selon elle exempts de défaut. Et l'exploitant n'a aucune obligation de communiquer vers le constructeur.
- ALSTOM a reçu peu d'éléments, tout du moins avant l'accident de décembre 2016. L'analyse sommaire faite par le constructeur a conclu que c'était un cas isolé.

Également, les derniers matériels d'une série sont encore en cours de livraison alors que les premiers, déjà sortis de période de garantie, font l'objet d'améliorations. Ce qui peut déboucher sur des avenants au contrat de fourniture initiale. Le client pourrait se trouver dans l'obligation de contractualiser avec le constructeur alors qu'il ne dispose plus de tous les leviers d'une négociation commerciale ordinaire.

Les deux parties ont traité ce problème chacune de leur côté, de leur seul point de vue interne. Alors que la solution au problème se situe à l'interface constructeur-exploitant-mainteneur.

Toutefois, cette coopération, si elle ne s'est pas mise en œuvre pour l'incident de 2015, a été effective et de qualité après l'accident de 2016.

Compte tenu des responsabilités croissantes données aux AOT et de l'ouverture prochaine du marché à d'autres opérateurs, le paysage du transport public guidé va se complexifier.

La stratégie d'action propre à chaque acteur conduit le BEA-TT à s'interroger sur la possibilité d'apparition d'une compétition entre le constructeur et l'exploitant sur le futur marché de la maintenance du matériel roulant. En effet, en Île-de-France le matériel roulant, qui est pleine propriété d'IdFM, est mis à disposition des opérateurs dans le cadre de marchés type « Obligation de Service Public » (OSP) : rien n'interdira alors que la maintenance soit assurée par une entité tierce, et potentiellement Alstom, ou qu'elle soit sous-traitée.

Ainsi, de l'avis du BEA-TT, le manque de coopération entre les entités pour l'exploitation des signaux faibles, mal faite dans le traitement de l'incident de 2015, risque d'être encore plus difficile dans le futur.

### **5.8.2 - Les signaux faibles**

Un signal faible est habituellement identifié en opérationnel comme une insuffisance, alors qu'il apparaîtra en bonne place dans les causes d'un évènement critique survenu *a posteriori*. En cela un signal faible est un précurseur.

Une politique efficace de prévention des risques repose sur la détection et l'exploitation des signaux faibles pour anticiper les risques non prévisibles ou sous-évalués.

Les investigations menées après le déraillement de 2016, sur les éléments de la rupture de patte de 2015, ont permis d'infirmer les conclusions initiales de 2015 et de confirmer la thèse de la rupture en fatigue de 2016.

Les investigations complémentaires menées sur les plots amortisseurs ont permis d'identifier les causes de la rupture en fatigue. Il est à noter que les investigations menées début 2016 sur le cas de 2015 n'ont pas permis de mettre à jour les causes dues aux plots amortisseurs.

Les diverses réflexions sur l'exploitation des signaux faibles exposent toutes que, faute de dispositifs, d'outils et de méthodes appropriées, on ne prend souvent conscience qu'après coup, qu'on avait l'information pour anticiper un évènement.

Les signaux faibles présentent certaines caractéristiques : ils sont fragmentaires, incomplets, isolés, ambigus et d'une utilité qui n'est pas évidente immédiatement.

Aussi il est malaisé de les identifier et de les traiter, en particulier ceux, externes, émis par d'autres acteurs tels que des clients, des concurrents, des pouvoirs publics. Le traitement des signaux faibles est nécessairement un système d'informations complexe, parce qu'il fait appel, entre autres, à une communauté transverse, parfois externe à l'entreprise, plus ou moins motivée à participer au dispositif, et à de l'interprétation humaine.

La rupture d'une patte de fixation en 2015 était un signal faible qui n'a pas été identifié comme tel. La détection a bien été faite, mais la communication et l'interprétation n'ont pas été assurées avec toute la rigueur requise pour une politique efficace de prévention des risques, faute d'usages ad hoc.

La prise en compte plus complète de l'incident de décembre 2015 aurait probablement évité le déraillement de Barbès-Rochechouart un an plus tard.

### **5.8.3 - La situation dans le transport aérien**

Le transport aérien est un mode de transport plus récent, de par la technologie mise en œuvre. Également, compte tenu des distances franchies, c'est un mode qui a dû très tôt agréger des règles et des méthodes à l'international.

Dans le transport aérien européen, les acteurs sont répartis en quatre grands groupes :

- les constructeurs d'aéronefs ;
- les propriétaires d'aéronefs ;
- les exploitants d'aéronefs ;
- les mainteneurs d'aéronefs.

La réglementation édictée par l'Agence européenne de la sécurité aérienne (EASA), agence instituée par l'Union européenne, définit le rôle et les responsabilités de ces quatre groupes, ainsi que les interactions entre les diverses parties.

Lorsqu'une défaillance, un dysfonctionnement ou un défaut survient sur un élément de l'avion, il est prévu que l'évènement soit collecté, étudié et analysé jusqu'à sa cause, et qu'une solution soit disponible. De plus, les informations relatives à cette défaillance, dysfonctionnement ou défaut doivent être mises à la disposition de tous les opérateurs connus du produit, de la pièce ou de l'appareil.<sup>11</sup>

Ainsi, la fissure grave est un cas que le mainteneur spécifiquement doit rapporter dans le système et qui sera à traiter par tous<sup>12</sup>.

Dans le transport aérien, tout défaut d'un avion trouve une solution car les acteurs ont l'obligation de coopérer.

#### **5.8.4 - Conclusion**

L'exploitation des signaux faibles a été mal assurée et n'a pas permis d'éviter l'accident de 2016.

Le futur va se complexifier du fait de l'ouverture du marché du transport public et de la volonté d'affirmation du donneur d'ordre-payeur, Île-de-France Mobilités (IdFM). Cette arrivée de la concurrence pour la prestation Transport s'accompagne d'une redistribution de la maintenance du matériel roulant : l'entretien des rames n'est plus automatiquement dans le périmètre de l'exploitant. De plus, rien n'interdit que cette maintenance soit assurée par une entité sans adhérence ni au constructeur, ni à l'exploitant.

Ainsi les relations vont rapidement passer de 2 parties actives à 3, voire plus :

- l'exploitant : la RATP ou un autre opérateur ;
- le constructeur : ALSTOM ou un autre fabricant. ;
- le propriétaire du matériel roulant : IdFM ;
- éventuellement le mainteneur si différent de l'exploitant ou du constructeur
- le gestionnaire de l'infrastructure, la RATP pour le métro parisien.

ALSTOM, constructeur de matériel roulant, et la RATP, exploitant, se positionnent tous les deux sur le marché de la maintenance. Ils deviennent concurrents sur un marché en plein développement. C'est en toute logique qu'ils souhaitent ne pas coopérer avec une entité affichant sa volonté de leur prendre des parts de marché.

À l'instar de ce qui est en usage dans le transport aérien, il serait vertueux que les quatre parties citées ci-dessus aient des obligations réglementaires d'échange mutuel d'informations sur toute anomalie risquant de compromettre la sécurité afin que chacun la résolve dans son domaine de responsabilité, voire ensemble en coopérant.

---

11 Cf. *EASA-Easy Access Rules for Airworthiness and Environmental Certification* (Regulation (EU) No 748/2012) p 30 à 46

12 Cf. *EASA-Easy Access Rules for Continuing Airworthiness* (Regulation (EU) No 1321/2014) p 35 à 42

## 5.9 - Les mesures de correction entreprises

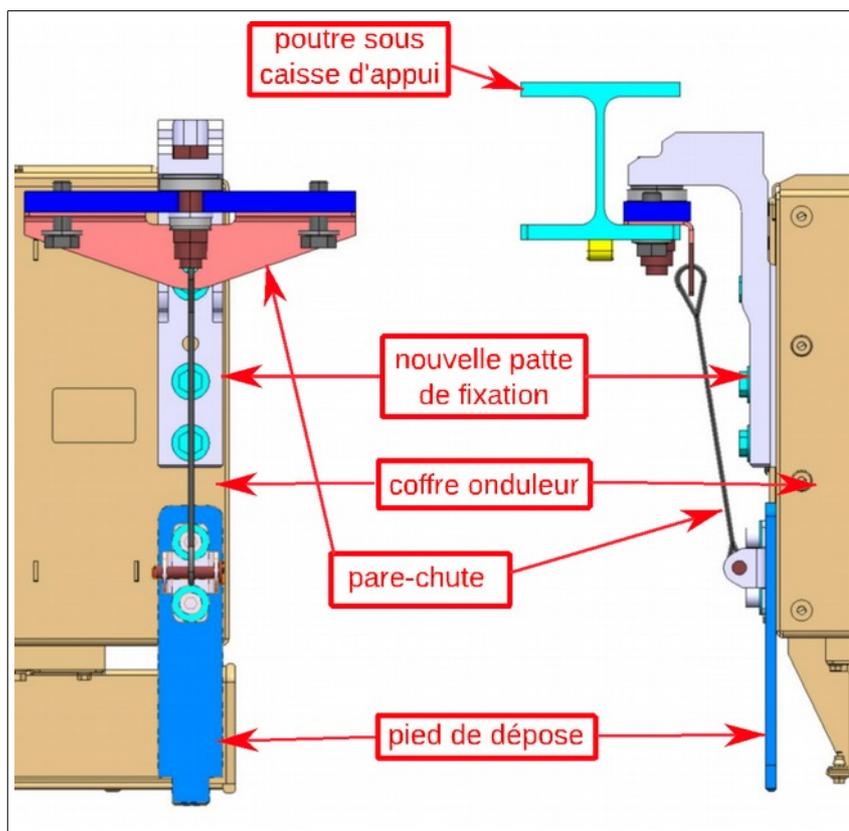
### 5.9.1 - Le nouveau design retenu pour les pattes de fixation

À la suite des différentes analyses exposées ci-avant, ALSTOM et la RATP ont fait évoluer le design des pattes de fixation du coffre onduleur pour le matériel MF01. La règle de fonctionnement du ventilateur n'a pas été modifiée (arrêt du GMV en station). Les modifications portent sur :

- la matière : c'est de l'acier S355J2 qui est utilisé, améliorant la tenue à la fatigue ;
- la géométrie : le rayon du congé passe de 2 mm à 20 mm ; un délardage plus important sur l'arrière de la patte permet d'annuler les interférences entre la patte et le coffre. Ces évolutions permettent de ne pas générer de concentration de contrainte, d'augmenter les sections travaillantes et de supprimer un point de flexion dans les pattes ;
- la liaison patte-poutre du train : elle est assurée à l'aide d'une seule vis de fixation en association avec des rondelles de rotulage afin de compenser les défauts angulaires (jusqu'à 4°) et d'altitude (jusqu'à 12,35 mm). Ce qui permet de diminuer les contraintes statiques lors du montage sur le train entre le coffre et la poutre sous châssis.

Par ailleurs, la rupture de cette vis n'entraîne pas de perte de la fonction soutien mais la perte de la fonction blocage du soutien.

Quant à la fonction « appui du coffre déposé », celle-ci a été reconduite à l'identique à l'aide de pieds de dépose afin d'éviter de devoir réorganiser la maintenance et le stockage des coffres.



Vue n° 42 : la nouvelle patte de fixation du coffre onduleur

ALSTOM et la RATP ont soumis la nouvelle patte de fixation à des essais sur train et à des tests au laboratoire du CETIM. Les résultats ont validé le maintien dans le domaine élastique du matériau pour les trois thèmes :

- les contraintes statiques de montages ;
- les contraintes dynamiques lors des arrêts/démarrage du GMV, y compris avec des plots déchirés et fissurés et un niveau vibratoire de 150 mm/s ;
- la robustesse à la fatigue.

### **5.9.2 - Les plots amortisseurs du GMV**

Une remise à neuf des plots des GMV est prévue sur l'ensemble du parc à mi-2019 afin de supprimer le débordement ou la surépaisseur de caoutchouc à l'arrière des plots. Cela permettra de supprimer les contraintes de montage, qui sont le principal facteur de dégradation des parties métalliques des plots.

L'opération de remise à neuf n'attendra pas le pas de maintenance normale qui prévoit le remplacement des plots à 25 000 heures de fonctionnement.

### **5.9.3 - Le pare-chute**

Le nouveau dimensionnement de la patte de fixation permettrait de supprimer la fonction pare-chute, dont l'objet est de maintenir le coffre dans le gabarit du train en cas de perte de la fonction fixation. Toutefois, la patte de fixation d'origine disposant de cette fonction, celle-ci a été reconduite.

### **5.9.4 - La maintenance vis-à-vis de l'encrassement**

Comme indiqué précédemment, la maintenance du GMV a été un temps suspectée d'être un facteur de la rupture des pattes de fixation. Sans attendre les conclusions de l'enquête, elle a bénéficié d'améliorations de la part du constructeur et du mainteneur.

La maintenance du GMV vis-à-vis de l'encrassement consiste à libérer l'hélice de ses dépôts en adhérence. Cette opération ne doit pas générer de poussière respirable par les personnels, en particulier lors du test vibratoire, ainsi que lors de la première remise en marche. La mesure des vitesses vibratoires ne doit pas non plus exposer l'opérateur à une pièce tournante non protégée.

Les résultats des analyses exposées précédemment ont permis d'améliorer cette maintenance.

Des diverses méthodes envisagées, la RATP et ALSTOM ont retenu le nettoyage par eau à haute pression pour les matériels MF01 des lignes 5 et 9. Les mesures des vitesses vibratoires après nettoyage par eau à haute pression montrent un très bas niveau vibratoire post-nettoyage. Pour les matériels de la ligne 2, leurs centres de maintenance ne permettant pas la mise en œuvre du lavage haute pression, la RATP et ALSTOM se sont accordés sur un nettoyage à l'aide d'un outil dédié, un grattoir, associé à un soufflage/aspiration par air. Sa mise au point reste à finaliser.

À la date de clôture du rapport de la présente enquête, le contrôle des vibrations est envisagé être effectué systématiquement à 60 000 km pour tous les MF01 avec un unique capteur de vibration tri-axe et une grille de protection devant l'hélice.

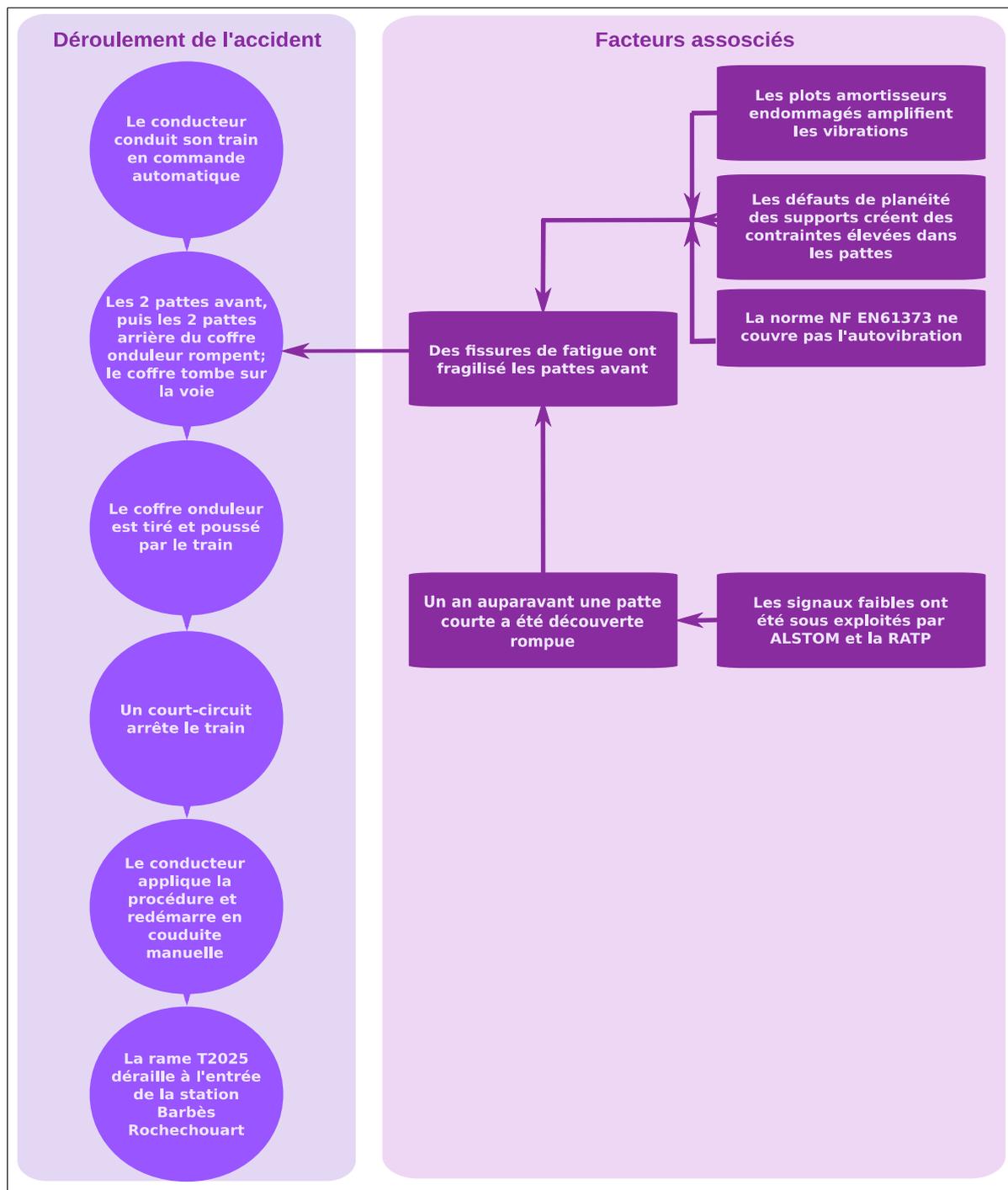
Restent à parachever :

- l'outil d'aspiration des poussières spécifique aux ateliers de la ligne 2 ;
- l'adaptation de la documentation de maintenance afin, entre autres, de tenir compte d'éventuelles nouvelles valeurs de seuil vibratoire, et des notices d'utilisation.

## 6 - Analyse des causes et facteurs associés, orientations préventives

### 6.1 - Le schéma des causes et des facteurs associés

Les investigations effectuées permettent d'établir le graphique ci-après qui synthétise le déroulement de l'incident et en identifie les causes et les facteurs associés.



Vue n° 43 : arbre des causes

## 6.2 - Les causes de l'accident

La cause immédiate du déraillement est la chute du coffre onduleur sur la voie entraînant la montée d'un bogie sur le coffre, sa sortie du gabarit, puis le heurt du nez de quai.

La chute du coffre est la conséquence de la rupture par fatigue de deux pattes de fixation, puis rupture par flexion des deux autres pattes.

La rupture par fatigue résulte de la conjonction des facteurs suivants :

- la présence de contraintes résiduelles de montage dans les pattes du coffre, dont la valeur n'avait pas été mesurée ;
- l'adjonction de contraintes supplémentaires liées à une autovibration générée par le groupe motoventilateur. Cette autovibration a été considérablement amplifiée par une fissuration à la longue des plots amortisseurs des fixations. La fissuration des plots amortisseurs a été elle-même initiée par des contraintes de montage de ces plots pouvant dégénérer en fissurations lors de l'utilisation.

Ces facteurs trouvent leur origine dans les causes profondes suivantes :

- l'absence de vérification, lors de la conception de la patte, de sa fiabilité vis-à-vis des vibrations auto-induites ;
- le déficit de traitement des signaux faibles. L'exploitation approfondie de la première rupture en 2015 aurait permis d'éviter la rupture de 2016.

Les orientations préventives sont à rechercher dans les deux domaines mentionnés ci-dessus.

## 6.3 - La conception de la patte et le remplacement des plots amortisseurs

C'est la rupture par fatigue des pattes de fixation courtes qui a provoqué la chute du coffre onduleur causant l'accident. Le design de ces pattes a subi des évolutions notables depuis le début du projet MF01. La matière est passée de l'inox à l'aluminium, avec successivement des nuances de plus en plus dures. Le point de rupture se trouve dans le congé : son rayon est passé de 2 mm à 15 mm, pour revenir à 2 mm. Enfin, les vibrations du GMV, dont l'action est prépondérante dans la fatigue, n'ont pas été prises en compte dans la conception, car ces vibrations sont autoproduites.

Le BEA-TT a pris note du nouveau design de la patte de fixation, dont les principales évolutions sont :

- le changement de métal : la nouvelle patte est en acier, dont les caractéristiques mécaniques sont nettement plus élevées que l'aluminium ;
- l'augmentation du rayon du congé : il passe de 2 à 20 mm, diminuant ainsi la concentration des contraintes dans le congé ;
- la fixation sous train par une vis unique et un assemblage avec rondelles, permettant la reprise des défauts géométriques et donc la forte réduction des contraintes résiduelles de montage.

La noria de mise en œuvre des nouvelles pattes et du remplacement des plots amortisseurs est annoncée être achevée à mi-2019.

Les évolutions importantes sont de nature à garantir la bonne résistance des pattes. Le changement anticipé de tous les plots amortisseurs prémunit contre l'intensification des

vibrations. Le BEA-TT n'émet pas de recommandation concernant la conception des pattes et la nature des plots.

Toutefois, à l'origine, la mauvaise conception des pattes initiales était due à des normes de conception insuffisantes.

En effet, ALSTOM avait vérifié la fixation du coffre onduleur suivant la norme NF EN 61373 alors que la rupture est la conséquence des autovibrations du GMV qui ne sont pas prises en compte par cette norme. Parallèlement, il n'existe pas de norme pour se protéger de l'autovibration.

ALSTOM et la RATP participent aux travaux de révision des normes. Dans ce cadre, le comité technique n° 9 « Electrical Equipment and Systems for Railway » de la Commission électrotechnique internationale (IEC), étudie une évolution de la norme NF EN 61373 afin de prendre en compte les conséquences de l'autovibration dans le dimensionnement des sections des diverses pièces constituant un matériel ferroviaire.

Le BEA-TT émet la recommandation ci-après :

**Recommandation R1 adressée au Bureau de normalisation ferroviaire (BNF) :**

**Soumettre à la commission de normalisation française UC9XB « Applications électriques ferroviaires - Matériels électromécaniques embarqués », qui assure le suivi des travaux européens et internationaux concernés, une demande destinée au comité IEC/TC 9 « Matériels et systèmes électriques ferroviaires » de la Commission électrotechnique internationale visant à étendre aux vibrations auto-induites le champ d'application et les prescriptions de la norme IEC 61373 reprise en France en tant que norme NF EN 61373.**

## **6.4 - Le traitement des incidents présentant un risque pour la sécurité**

Le déraillement de décembre 2016 est la reproduction aggravée de l'incident vécu en décembre 2015. Or, le traitement de l'évènement de 2015 montre d'une part un déficit dans l'échange d'informations et d'autre part des mesures inabouties. Au final, aucune des parties ne s'est identifiée en responsabilité de résoudre le problème.

### **6.4.1 - Les échanges d'informations sur les circonstances de l'incident**

À l'époque, ALSTOM n'avait pas investigué plus avant car elle n'avait reçu aucun complément. La RATP n'a communiqué à ALSTOM le résultat de ses investigations qu'à la suite de l'accident de décembre 2016. De la pauvreté des échanges, le problème est resté sans solution.

Également, l'ouverture prochaine du marché du transport public de personnes, qui va multiplier les acteurs, peut aggraver cette absence de coopération.

Toutefois, ce déficit de coopération est contraire à la sécurité du système de transport. Dans l'optique de l'amélioration de la sécurité, l'échange d'informations est un outil important. Sa mise en œuvre doit aboutir à une remontée d'informations proportionnée permettant de distinguer les éléments utiles à la prévention des incidents et accidents. Dans une volonté d'améliorer cet échange d'informations, des travaux de concertation avec les acteurs du transport public guidé seraient à mener afin de déterminer la nature et le volume des informations à partager, ainsi que des solutions à proposer.

Afin de renforcer l'échange d'informations, le BEA-TT émet la recommandation ci-après :

**Recommandation R2 adressée à la direction générale des infrastructures, des transports et de la mer (DGITM) :**

**À l'instar des usages du transport aérien, étudier une évolution de la réglementation visant notamment à rendre obligatoire :**

- **l'échange d'informations entre le propriétaire, le constructeur, l'exploitant et le mainteneur d'un matériel roulant à voyageurs, voire le gestionnaire d'infrastructure, lorsque l'un d'eux identifie un risque provenant du matériel roulant pour la sécurité ;**
- **la mise à disposition d'une solution par le constructeur.**

#### **6.4.2 - La non exhaustivité de la campagne de vérification post-incident 2015**

Le 16 décembre 2015, la RATP détecte une patte de fixation rompue sur le coffre onduleur MA-0062 de la rame T2027. Parmi les mesures retenues, elle lance une campagne de vérification de l'intégrité des pattes de fixation de tous les coffres onduleurs dédiés à sa flotte MF01.

Le coffre onduleur MA-0028 à l'origine du déraillement du 2 décembre 2016 a échappé à cette campagne qui se voulait exhaustive.

En effet, pendant la campagne l'exploitation continuant par ailleurs avec tous ses aléas, le coffre onduleur MA-0028 fait l'objet d'opérations de maintenance par la RATP et par le SAV ALSTOM, avec des transferts entre les sites multiples de ces deux sociétés.

À la clôture de la campagne, les pattes du coffre onduleur MA-0028 n'ont pas été vérifiées. L'ordre de travail déclinant la campagne n'a pas été transmis à certains établissements de la RATP. De plus, le cas du matériel en retour du SAV constructeur n'a pas été envisagé.

En conséquence, le BEA-TT émet la recommandation ci-après :

**Recommandation R3 adressée à la RATP :**

**Améliorer l'organisation des campagnes de vérifications et contrôles des organes du matériel roulant afin d'en garantir l'exhaustivité.**

#### **6.4.3 - La maintenance du GMV**

Les investigations menées au cours de l'enquête ont identifié un écart concernant la maintenance du GMV. D'une part, les préconisations du constructeur vers l'exploitant ont évolué et se sont renforcées au fil du temps. D'autre part, l'exploitant ne respectait pas ces préconisations, car elles n'étaient pas repérées opération de sécurité par le constructeur. Elles étaient, de plus, contraires aux règles « Hygiène, Sécurité et Conditions de Travail ».

Cette situation, installée avant l'accident de 2016 et qui confirme le déficit d'échanges entre ALSTOM et la RATP, a évolué. Depuis l'accident, la méthode de nettoyage du GMV a été concertée entre le constructeur et l'exploitant. Elle tient compte des diverses possibilités des ateliers pour l'outillage à mettre en œuvre et elle permet la mesure systématique du balourd post-nettoyage dans le respect du code du travail.

Restent à parachever la mise au point de l'outil d'aspiration des poussières spécifique aux ateliers de la ligne 2, et l'adaptation de la documentation de maintenance du GMV.

*Le BEATT invite ALSTOM et la RATP à finaliser la liste des opérations de maintenance à réaliser sur le groupe motoventilateur des coffres onduleurs des matériels MF01 qui soit acceptée des deux parties.*



## 7 - Conclusions et recommandations

### 7.1 - Les causes de l'accident

Le déraillement du 2 décembre 2016 est la conséquence de la chute d'un coffre onduleur fixé sous train, elle-même due à la rupture par fatigue de deux pattes de fixation, puis rupture par flexion des deux autres pattes de cet équipement.

Une combinaison de plusieurs facteurs a conduit à la rupture par fatigue des fixations :

- la présence de contraintes résiduelles de montage dans les pattes du coffre, dont la valeur n'avait pas été mesurée ;
- l'adjonction de contraintes supplémentaires liées à une autovibration générée par le groupe motoventilateur. Cette autovibration a été considérablement amplifiée par une fissuration à la longue des plots amortisseurs des vibrations. La fissuration des plots amortisseurs du GMV, est consécutive à des contraintes de montage de ces plots pouvant dégénérer en fissurations lors de l'utilisation.

Ces facteurs trouvent leur origine dans les causes profondes suivantes :

- l'erreur de conception de la patte en ne vérifiant pas sa fiabilité vis-à-vis des vibrations auto-induites ;
- le déficit de traitement des signaux faibles. L'exploitation approfondie de la rupture de 2015 aurait permis d'éviter la rupture de 2016.

L'insuffisance de maintenance du GMV vis-à-vis de l'encrassement et la non-vérification du coffre à l'origine du déraillement lors de la campagne de vérification des pattes faisant suite à la rupture découverte en 2015, qui ne sont pas à l'origine du déraillement de 2016, révèlent des risques d'une criticité telle qu'il est nécessaire de les réduire.

Le BEA-TT formule en conséquence trois recommandations et une invitation sur ces thèmes.

### 7.2 - Les recommandations

**Recommandation R1 adressée au Bureau de normalisation ferroviaire (BNF) :**

**Soumettre à la commission de normalisation française UC9XB « Applications électriques ferroviaires - Matériels électromécaniques embarqués », qui assure le suivi des travaux européens et internationaux concernés, une demande destinée au comité IEC/TC 9 « Matériels et systèmes électriques ferroviaires » de la Commission électrotechnique internationale visant à étendre aux vibrations auto-induites le champ d'application et les prescriptions de la norme IEC 61373 reprise en France en tant que norme NF EN 61373.**

**Recommandation R2 adressée à la direction générale des infrastructures, des transports et de la mer (DGITM) :**

**À l'instar des usages du transport aérien, étudier une évolution de la réglementation visant notamment à rendre obligatoire :**

- l'échange d'informations entre le propriétaire, le constructeur, l'exploitant et le mainteneur d'un matériel roulant à voyageurs, voire le gestionnaire d'infrastructure, lorsque l'un d'eux identifie un risque provenant du matériel roulant pour la sécurité ;
- la mise à disposition d'une solution par le constructeur.

**Recommandation R3 adressée à la RATP :**

**Améliorer l'organisation des campagnes de vérifications et contrôles des organes du matériel roulant afin d'en garantir l'exhaustivité.**

*Le BEATT invite ALSTOM et la RATP à finaliser la liste des opérations de maintenance à réaliser sur le groupe motoventilateur des coffres onduleurs des matériels MF01 qui soit acceptée des deux parties.*

# ANNEXES

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête

Annexe 2 : Le coffre onduleur MA-0028

Annexe 3 : Synthèse des résultats des expertises réalisées par le CETIM

Annexe 4 : Synthèse des coffres onduleurs présentant des plots fissurés



## Annexe 1 : décision d'ouverture d'enquête



MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, DE L'ÉNERGIE ET DE LA MER



Le Directeur

La Défense, le 5 décembre 2016

### DECISION

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

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

Vu les circonstances du déraillement d'une rame circulant sur la ligne 2 du métro parisien qui s'est produit le 2 décembre 2016 à la station Barbès-Rochechouart à Paris ;

### décide

**Article 1 :** Une enquête technique est ouverte en application des articles L. 1621-1 et R. 1621-22 du code des transports concernant le déraillement d'une rame circulant sur la ligne 2 du métro parisien survenu le 2 décembre 2016 à la station Barbès-Rochechouart à Paris (75).

Jean PANHALEUX



## Annexe 2 : le coffre onduleur MA-0028

Le coffre onduleur MA-0028 a été identifié comme étant l'organe à l'origine du déraillement de la rame T2025 le 2 décembre 2016 à la station Barbès-Rochechouart. La présente annexe retrace les poses-déposes et rétrofits effectués sur ce coffre. Elle trace également les déposes/poses de coffres onduleurs sur la motrice N2 de la rame T2025, ainsi que l'historique en maintenance de cette rame depuis novembre 2015.

### **Historique des déposes/poses**

➤ *28 janvier 2009* : le train T2012 est livré avec le coffre onduleur MA-0028 monté en motrice N1

➤ *21 janvier 2015* : le coffre est déposé à RATP Charonne suite à une panne électrique.

Ce coffre est ensuite envoyé à l'Atelier de maintenance des équipements (AME) de Saint-Ouen de la RATP pour réparation.

La réparation est terminée le 19 février 2015 et le coffre est envoyé le 05 mars 2015 à l'atelier RATP de Bobigny.

➤ *14 avril 2015* : le coffre est posé sur la motrice N1 du train T2099 à l'atelier RATP de Bobigny.

➤ *2 juin 2015* : le coffre est déposé du train T2099 à Bobigny suite à une panne électrique. Ce coffre est ensuite envoyé à l'AME RATP de Saint-Ouen pour réparation.

La réparation est terminée le 18 juin 2015 et le coffre est renvoyé le même jour à RATP Bobigny. Il est ensuite envoyé à l'atelier de Charonne le 22 juin 2015.

➤ *7 septembre 2015* : le coffre est posé à Charonne sur la motrice N1 du train T2026.

➤ *10 septembre 2015* : 3 jours après avoir été posé, ce coffre est déposé à Charonne suite à un défaut « panne électrique. » Ce coffre est envoyé en réparation à l'AME de Saint-Ouen, puis chez ALSTOM à Tarbes.

Ce coffre réparé est réceptionné à l'AME RATP de Saint-Ouen, le 15 décembre 2015.

➤ *16 décembre 2015* : début de la campagne RATP de contrôle des pattes de fixation suite à la détection d'une fissure sur la patte de fixation de l'onduleur (coffre onduleur MA-0062) de la N1-T2027.

➤ *23 décembre 2015* : le coffre est expédié sans intervention de l'AME de Saint-Ouen à l'atelier de Charonne, tous deux établissements de la RATP. Les pattes du coffre n'ont pas subi de contrôle visuel, l'ordre de travail entre établissements RATP n'étant pas transmis à l'AME, ni aux différents ateliers réparateurs. Il n'y a pas de trace d'un contrôle visuel des pattes des coffres en magasin.

➔ Ce coffre n'a donc pas été inclus dans la campagne de contrôle.

➤ *29 mars 2016* : ce coffre est posé à l'atelier RATP de Charonne sur la motrice N1 du train T2027. Lors des essais, il est constaté des vibrations du GMV, un mauvais sens de rotation et un défaut d'isolement. Le tiroir TIRCCU.MA-1167 est alors remplacé par la RATP, mais le sens de rotation reste mauvais et le coffre est déposé 6 heures après sa pose sur le train. Ce coffre réintègre donc les stocks « mauvais » à Charonne.

- *8 avril 2016* : ce coffre est sorti du magasin de Charonne "mauvais" pour être intégré au magasin du SAV ALSTOM en prévision de son expédition vers ALSTOM Tarbes.

Le SAV ALSTOM annule l'expédition à Tarbes, car, suite aux nombreuses déposes/poses de coffres onduleurs sur le train T2027, il s'est avéré que le disjoncteur d'alimentation du GMV de la motrice N1 du train T2027 était câblé à l'envers, expliquant le mauvais sens de rotation des GMV des coffres onduleurs posés sur cette motrice, dont faisait partie le coffre MA-0028.

- *12 avril 2016* : la campagne de contrôle RATP est terminée sur la Ligne 2 et une seule patte a été retrouvée fissurée : celle du coffre MA-0062 qui est à l'origine de la campagne de contrôle. Le coffre onduleur MA-0028 était au parc de rechange RATP et en réparation SAV Constructeur durant toute la campagne, sauf le 29 mars 2016 où il est monté furtivement sur le train T2027.
- *25 avril 2016* : le SAV ALSTOM transmet ce coffre à RATP. Il est placé « bon » au magasin de Charonne avec le statut réparé, le jour même, en considérant que les réparations effectuées sur la motrice N1 du train T2027 étaient à l'origine des défauts sur ce coffre le 29 mars 2016.
- *26 avril 2016* : le coffre est posé à l'atelier RATP de Charonne sur la motrice N2 de la rame T2025 par le SAV ALSTOM ; la fiche-procédure appliquée ne prévoit pas le contrôle des pattes de fixation.
- *2 décembre 2016* : déraillement de la rame T2025 à la station Barbès-Rochechouart.

### **Rétrofit sur le coffre onduleur MA-0028 : (extrait)**

*20 juillet 2009* : les pattes de fixation courtes et longues sont remplacées par des pattes à l'indice E1 : modification de la nuance d'aluminium pour la matière des pattes suite au matage des têtes de vis.<sup>13</sup>

### **Maintenance sur les coffres onduleurs de la rame T2025**

Le plan de maintenance transmis par le constructeur à l'exploitant au travers du manuel de maintenance train préventif (MMTP) traction-freinage prévoit un entretien préventif des coffres onduleurs tous les 60 000 km, soit environ 1 an pour un train MF01 circulant sur la ligne 2.

Depuis novembre 2015, les actes RATP de maintenance concernant les coffres onduleurs de la rame T2025 ont été :

- Le contrôle des pattes de fixations des coffres onduleurs MA-0107, MA-0095 et MA-0087, le 24 décembre 2015, dans le cadre de la campagne de contrôle initiée après la découverte de la fissuration d'une patte du coffre onduleur MA-0062.
- La maintenance préventive des coffres onduleurs à 60 000 km, le 13 avril 2016, au cours de laquelle les coffres onduleurs MA-0107, MA-0095 et MA-0087 ont été nettoyés et le serrage de leurs fixations contrôlé.

Du 26 avril 2016 au 29 avril 2016, le SAV ALSTOM dépose les coffres onduleurs MA-0107, MA-0095 et MA-0087 et les remplace respectivement par les coffres onduleurs MA-0094, MA-0028 et MA-0015.

La RATP indique ne pas avoir réalisé d'autre tâche de maintenance sur les coffres onduleurs de cette rame.

---

<sup>13</sup> La modification de nuance de métal d'un organe est une évolution courante au cours du cycle de vie d'un matériel ferroviaire.

### ***Bilan des déposes/poses des coffres onduleurs sur la motrice N2 de la rame T2025***

La motrice N2 de la rame T2025 est livrée le 12 novembre 2009 avec le coffre onduleur MA-0095. Ce coffre est remplacé le 29 avril 2016 par le coffre onduleur MA-0028.

Le coffre onduleur MA-0028 n'est que le second coffre monté sur cette voiture depuis sa livraison.



### Annexe 3 : synthèse des résultats des expertises réalisées par le CETIM

Le nombre d'hypothèses sur les causes de la rupture des pattes a nécessité de réaliser une expertise la plus complète possible des pattes de fixations pour tenter de mettre en évidence leur processus de rupture. Cette expertise a été confiée au laboratoire CETIM de Senlis qui a réalisé les travaux suivants :

- contrôles dimensionnels ;
- analyses morphologiques des dégradations ;
- examens au microscope électronique à balayage ;
- analyses chimiques ;
- examens micrographiques ;
- essais de dureté ;
- essais de traction et de flexion par choc ;
- comptage de stries de fatigue.

L'objectif de cette annexe est d'extraire les principales informations et d'explicitier le mode de rupture à partir des conclusions des travaux réalisés.

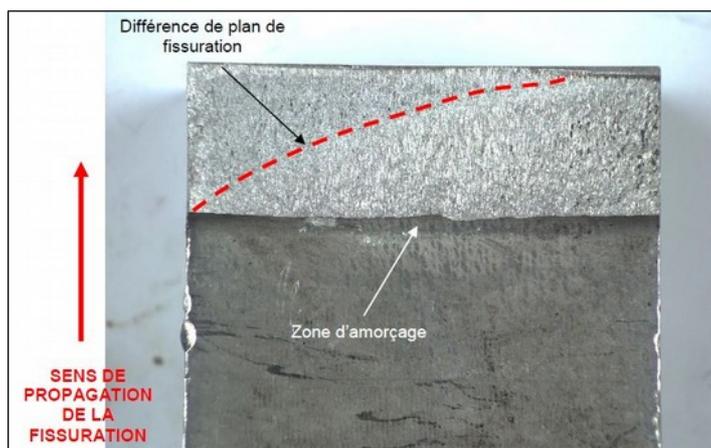
#### **Expertise des pattes de fixation du coffre onduleur**

L'analyse métallurgique a permis d'écarter la piste d'un défaut de fabrication des pattes de fixation (matière ou dimensionnel).

Les premiers résultats confirment l'hypothèse que les pattes courtes ont rompu en premier, suivi ensuite par les pattes longues. Aussi, seul le cas des pattes courtes est important dans la compréhension du phénomène de rupture et est détaillé ci-après.

L'analyse morphologique des pattes est faite à l'œil nu et à la loupe binoculaire. Cette analyse permet de caractériser le type de rupture, d'identifier des directions de sollicitations ainsi que des éléments tels que l'impact de l'environnement.

L'analyse morphologique de la patte courte côté GMV a montré qu'elle a commencé à fissurer dans le rayon de raccordement. Les amorçages sont multiples le long de la génératrice du rayon de 2 mm.



*Plan de rupture de la patte courte côté GMV (vue macroscopique)*

La rupture s'est produite sous des sollicitations de traction et/ou flexion planes répétées. Toutefois la seconde hypothèse est à privilégier à cause de l'orientation du plan de fissuration.

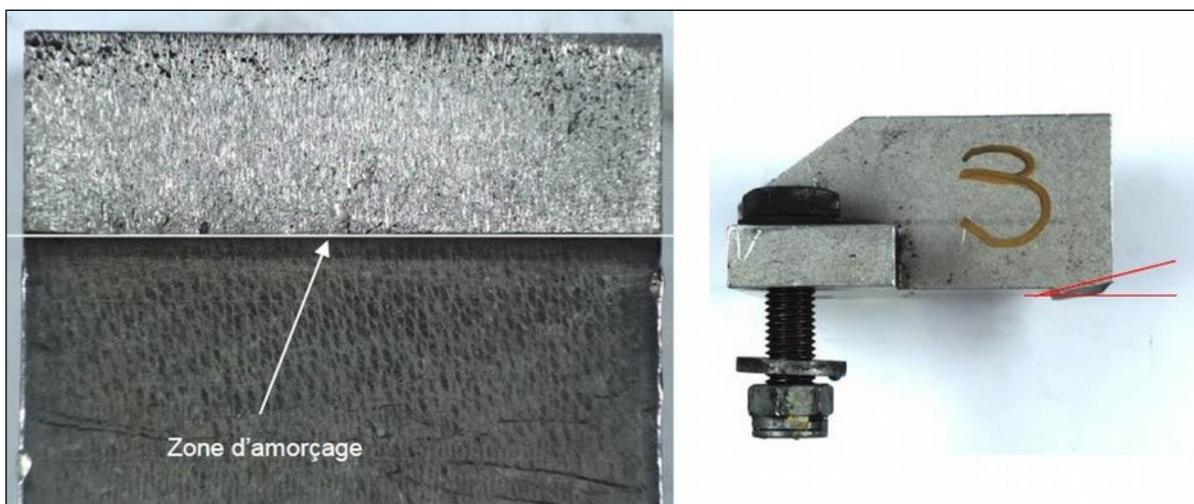


*Orientation du plan de fissuration de la patte courte côté GMV (vue macroscopique)*

L'absence de ligne d'arrêt et de trace d'oxydation indique que la fissuration ne s'est pas arrêtée pendant une durée significative une fois amorcée. Cela signifie qu'une fois le processus enclenché, il s'est poursuivi d'une traite.

Pour cette patte, il faut noter une zone délimitant une différence d'orientation dans le plan de fissuration.

Les conclusions de l'analyse morphologique de la patte courte côté opposé au GMV sont semblables. L'angle du plan de fissuration indique que la rupture s'est produite sous des sollicitations de flexions planes répétées. Là aussi, la fissuration, une fois amorcée ne s'est pas arrêtée car aucune trace de corrosion ou de lignes d'arrêt n'est visible.

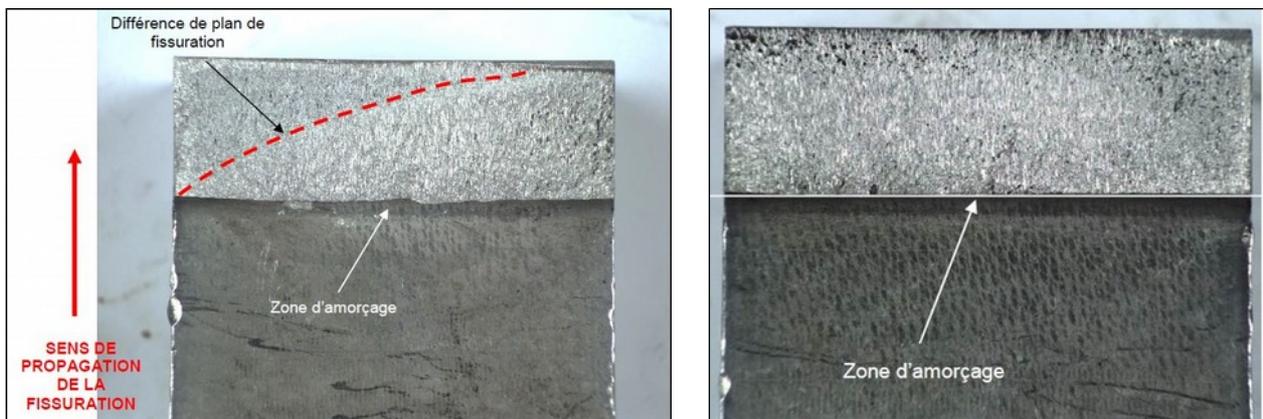


*Plan de rupture de la patte courte côté opposé au GMV (vue macroscopique)*

En complément de l'analyse macroscopique, une analyse microscopique a été faite pour confirmer que les pattes ont bien rompu par fatigue.

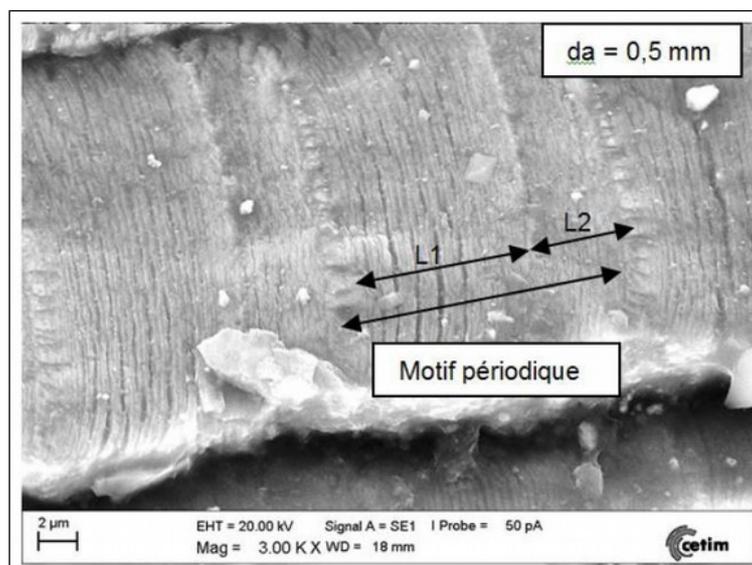
L'observation au microscope électronique à balayage (MEB) de la patte courte, côté opposé au GMV, montre que la fissuration s'est propagée sur la quasi-totalité de la section. La petitesse, voire l'absence de zone de rupture brutale, démontre que le niveau de sollicitations alternées était relativement faible pour que la fissuration puisse se propager dans une telle proportion.

Les éléments recueillis ne permettent pas d'identifier laquelle des deux pattes a fissuré en premier. L'hypothèse la plus probable est néanmoins que les fissures se soient initiées en même temps, c'est-à-dire non successivement, dans différents sites d'amorçages le long du rayon de raccordement de 2 mm, avec une rupture plus précoce de la patte côté opposé au GMV caractérisée par une quasi absence de zone de rupture brutale, induisant une réorientation du plan de fissuration de la patte côté GMV.



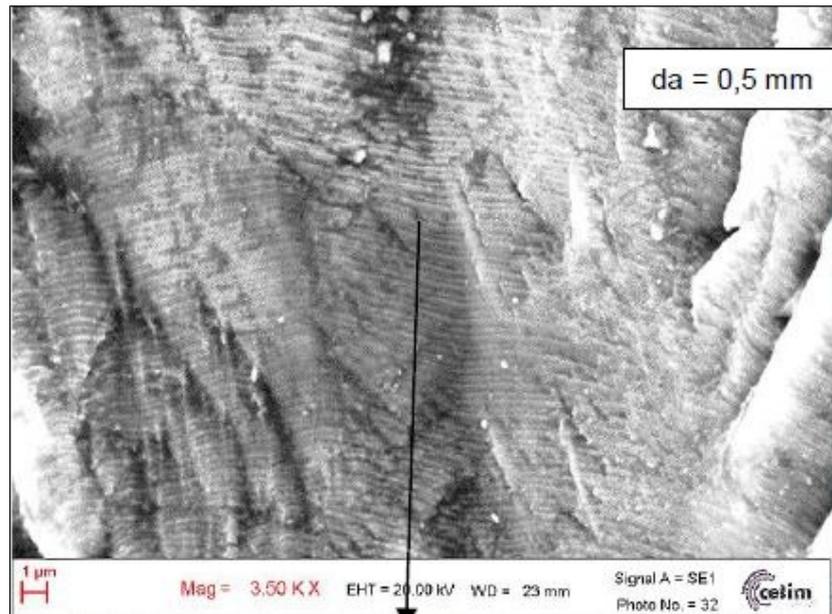
*Faciès de rupture pattes courtes (côté GMV et opposé GMV)*

L'observation à différentes échelles de grossissement a mis en évidence un motif périodique dans le sens de propagation des fissures. Ainsi, on peut observer un motif constitué de deux zones : une zone « longue » (dénommée L1 par le CETIM), suivi d'une zone « courte », (dénommée L2). Ce motif est assimilable à une fissuration sous amplitude de contraintes variables.



*Vue microscopique du plan de rupture de la patte courte côté opposé au GM*

Le même motif de fissuration a été observé sur la patte courte côté GMV et occupe là aussi la quasi-totalité de la surface du faciès de rupture.



*Vue microscopique du plan de rupture de la patte courte côté GMV*

Afin d'approfondir la compréhension du phénomène, une estimation du nombre de cycles a été faite avec une méthodologie de comptage de stries de fatigue.

En considérant l'hypothèse qu'une strie est égale à un cycle, le comptage se fait en partant du rayon de raccordement jusqu'à la face opposée. La méthodologie de comptage a utilisé le motif périodique, en considérant un nombre constant de cycles dans les zones L1 et L2 (25 +11 cycles). Ainsi la méthode de comptage utilisée a permis d'estimer à 118 826 cycles le nombre de cycles sur l'ensemble du faciès de rupture.

Distance à l'amorçage (mm)	L1		L2		Proportion L1		Distance interstries moyenne (μm)		Nombre stries L1	Nombre stries L2	Total stries par bloc	Cumul nombre de cycles
	Mesure (μm)	Incertitude à 10%	Mesure	Incertitude à 10%	Mesure	Incertitude à 10%	Calcul	Incertitude à 10%				
0,8	1,12	0,11	0,64	0,06	63,6%	6,4%	0,05	0,005	25	11	36	14612
3,7	2,8	0,28	1,86	0,19	60,1%	6,0%	0,14	0,014	25	11	36	45781
5,8	4,36	0,44	2,04	0,20	68,1%	6,8%	0,18	0,018	25	11	36	58390
6,2	3,6	0,36	1,8	0,18	66,7%	6,7%	0,15	0,015	25	11	36	61229
7,6	3,70	0,37	1,63	0,16	69,4%	6,9%	0,15	0,015	25	11	36	69989
8,0	3,98	0,40	2,18	0,22	64,6%	6,5%	0,18	0,018	25	11	36	72692
9,2	3,7	0,37	2,13	0,21	63,5%	6,3%	0,17	0,017	25	11	36	79647
10,8	2,88	0,29	1,14	0,11	71,6%	7,2%	0,11	0,011	25	11	36	90994
11,9	4,03	0,40	2,48	0,25	61,9%	6,2%	0,19	0,019	25	11	36	98405
12,9	3,25	0,33	1,4	0,14	69,9%	7,0%	0,13	0,013	25	11	36	104620
14,6	3,36	0,34	1,98	0,20	62,9%	6,3%	0,16	0,016	25	11	36	116226
15,0							0,15					118826

*Résultat du comptage de stries et estimation du nombre cycles*

En mécanique de la rupture, la dégradation d'une structure se décompose en deux phases. La première phase, la plus longue, est la phase d'amorçage. Cette première phase est suivie d'une phase de propagation de la fissure, jusqu'à la rupture. Il est communément admis que la phase de propagation représente environ 20 % de la durée

de vie. Le nombre de cycles indiqués précédemment correspondant à la phase de propagation. Il est donc aisé de remonter au nombre total de cycles des sollicitations.

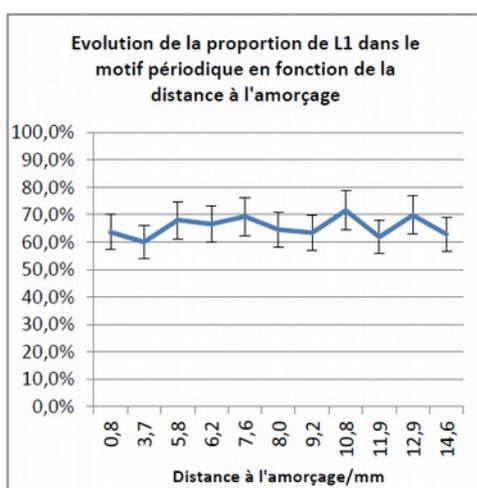
En complément de la valeur usuelle de 20 %, deux autres cas à 10 % et 30 % sont considérés pour encadrer le nombre de cycles total vus par la patte de fixation :

<b>Estimation du nombre de cycles (phase d'amorçage et de propagation)</b>	
Pour une phase de propagation de 10 % de la durée de vie totale	1 188 259
Pour une phase de propagation de 20 % de la durée de vie totale	594 130
Pour une phase de propagation de 30 % de la durée de vie totale	396 086

En fonction de l'hypothèse considérée la durée de vie totale est comprise entre environ 400 000 et 1 200 000 cycles.

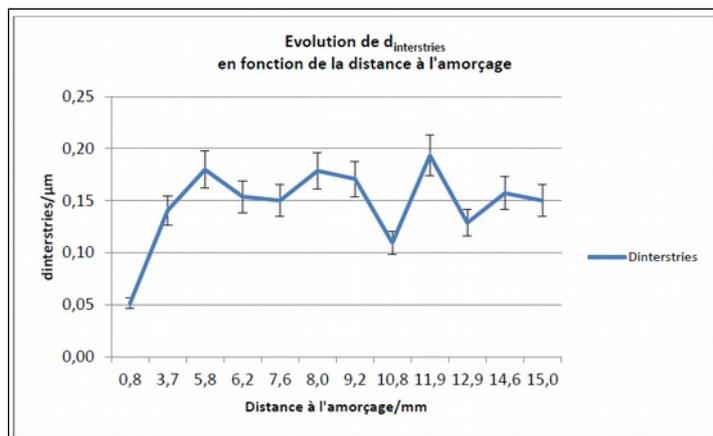
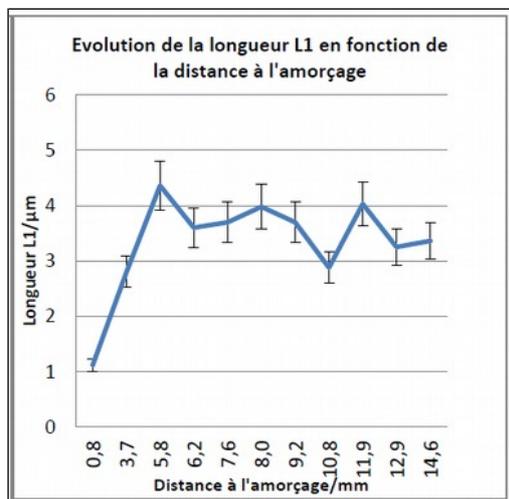
Au-delà du comptage du nombre de cycles, les informations fournies par cette analyse permettent de caractériser également deux autres paramètres.

La proportion de L1 et L2 dans le motif de fissuration reste constante tout au long de la fissuration. Cela implique que les proportions de contraintes dynamiques dans le motif sont inchangées tout au long de la fissuration. Le motif est composé en moyenne de 2 tiers L1 (66 %) pour 1 tiers L2.



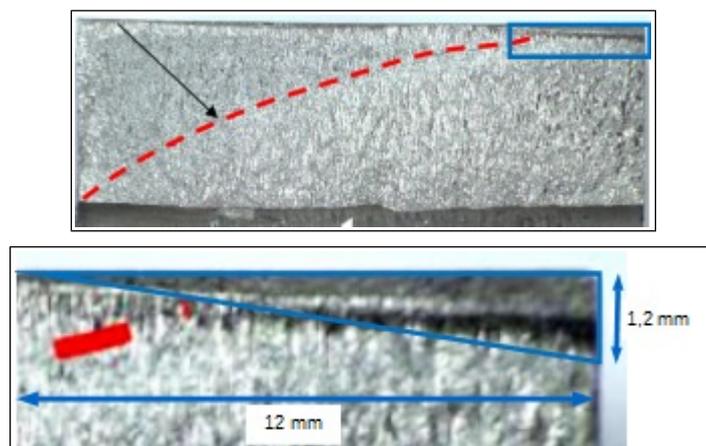
*Proportion de L1 en fonction de la distance à l'amorçage*

Le second paramètre est que, une fois que la fissure a atteint une profondeur de l'ordre de 6 mm, la vitesse de fissuration n'augmente plus et peut être considérée stable. Généralement, la vitesse de propagation ne fait que croître. En effet, si les efforts ayant conduit à la fissuration restent constants, la taille de la section résiduelle diminuant, cela ne peut conduire qu'à une accélération du phénomène. Dans notre cas, la constance de la vitesse de fissuration au-delà de 6 mm de profondeur est corrélée par la variation de la distance inter stries qui suit aussi une même loi d'accroissement puis de stagnation.



*Evolution de la vitesse de fissuration et de la distance inter stries en fonction de la distance à l'amorçage*

En complément, si nous considérons la contrainte statique liée à la masse du coffre reposant, pour la file pattes courtes, uniquement sur la patte côté GMV suite à la rupture antérieure de l'autre patte courte, alors, la section résiduelle pour rompre la seconde patte courte est inférieure  $5 \text{ mm}^2$  ( $S_r [4,81 \text{ mm}^2] = M [270 \text{ kg}] \times g [9,81 \text{ m/s}^2] / R_m [275 \text{ MPa}] \times 2$ ). Cette valeur n'est pas très éloignée de ce que nous pouvons considérer comme la section de rupture finale sur la patte courte côté GMV, estimée grossièrement à partir des clichés du CETIM à  $7,2 \text{ mm}^2$  ( $12 \times 1,2 / 2$ ). La rupture finale aurait donc pu se produire sous les seules contraintes de la masse du coffre avec une accélération verticale de 1,5 G, ce qui est également cohérent avec des accélérations sur caisse au passage de joints de rails, zone où s'est produite la chute du coffre.

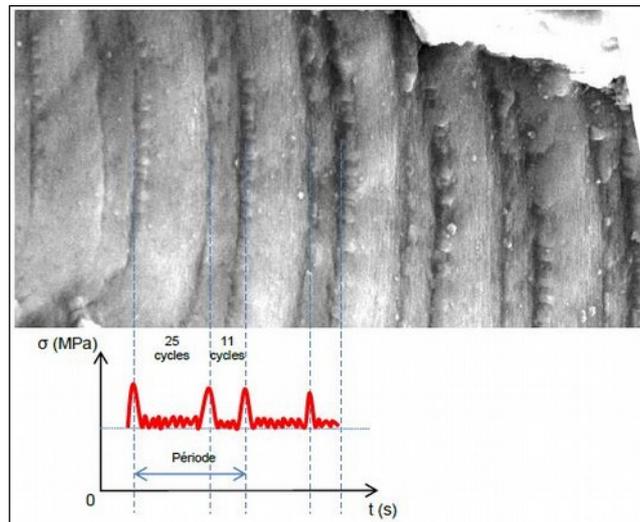


*Section de rupture brutale estimée*

Il y a donc lieu de rechercher un phénomène dynamique répétable dans la vie du matériel associé à un second phénomène (statique ou dynamique) qui s'atténue avec la profondeur de la fissuration.

En effet, dans le cas présent, la diminution de la section résiduelle est vraisemblablement compensée par une diminution de la contrainte de montage. Une diminution des efforts dynamiques n'est pas envisageable car les sources d'efforts extérieurs liés à l'exploitation

n'ont pas lieu de diminuer, ceux liés au balourd ne peuvent que croître avec l'empoussièrément du ventilateur et il est constaté sur le profil de rupture une constance de la proportion des cycles et de la vitesse de fissuration au-delà de 6 mm de profondeur.



Représentation du profil de vie au regard du motif des stries

Le comptage du nombre de stries et l'analyse fractographique permettent donc de dresser ce que pourrait être le profil des sollicitations à l'origine de la rupture des pattes.

## Conclusion

Les pattes courtes se sont rompues après un nombre de sollicitations en fatigue compris entre 400 000 et 1 200 000 cycles. Les fissures se sont initiées sur plusieurs points d'amorçages le long de la génératrice du rayon de 2 mm, sur les deux pattes de fixation et dans une même période de temps (non successivement) sous l'effet des contraintes statiques de montage et dynamiques. La vitesse de propagation a augmenté jusqu'au relâchement des contraintes de montage. Les fissures ont continué à cheminer sous les seules contraintes dynamiques. La patte courte côté opposé au GMV a très probablement rompu la première. La patte courte côté GMV aurait continué de fissurer avec une réorientation de son plan de fissuration. Elle a probablement fini par rompre, sous de faibles sollicitations de roulage, au passage du joint de rails. Une fois ces deux points de fixation détruits, le coffre a basculé cassant les pattes longues par rupture brutale.

*Remarque : cette hypothèse n'a pas été complètement décrite dans les rapports du CETIM, faute d'éléments factuels pour en apporter la preuve hors de tout doute. En effet, un laboratoire tel que le CETIM n'émet pas d'hypothèses mais fournit des éléments factuels et concrets. Pour autant, ce point a été débattu lors d'une rencontre tri partite CETIM / ALSTOM / RATP et a fait l'objet d'un consensus : "L'hypothèse de la libération des contraintes statiques au fur à mesure de la fissuration est considérée plausible par le CETIM qui n'a pas identifié d'autres hypothèses lors de son étude."*

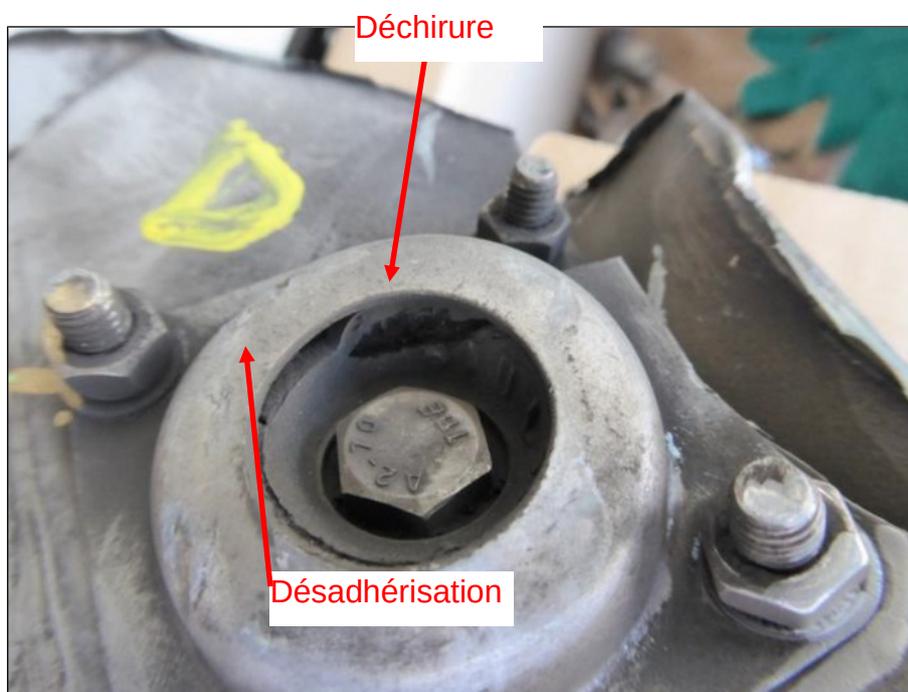
## Expertises des plots amortisseurs du coffre onduleur

Le démontage des plots amortisseurs du coffre onduleur accidenté a permis de les expertiser. Le rapport du CETIM CET0146942 donne des informations très importantes qui constituent également des éléments de compréhension sur le déraillement.

En premier lieu, il ne semble pas que le caoutchouc ait subi des dégradations matière à cœur. D'après le CETIM, les analyses sur les taux de gonflement et le taux de composés extractibles tendent « à indiquer que le matériau constituant les plots usagés a peu évolué en fonctionnement ». Les déterminations de la composition centésimale de chacun des plots présentent des allures de diagrammes thermiques similaires et les microduretés DIDC ne semblent pas traduire une rigidification du matériau en usage.

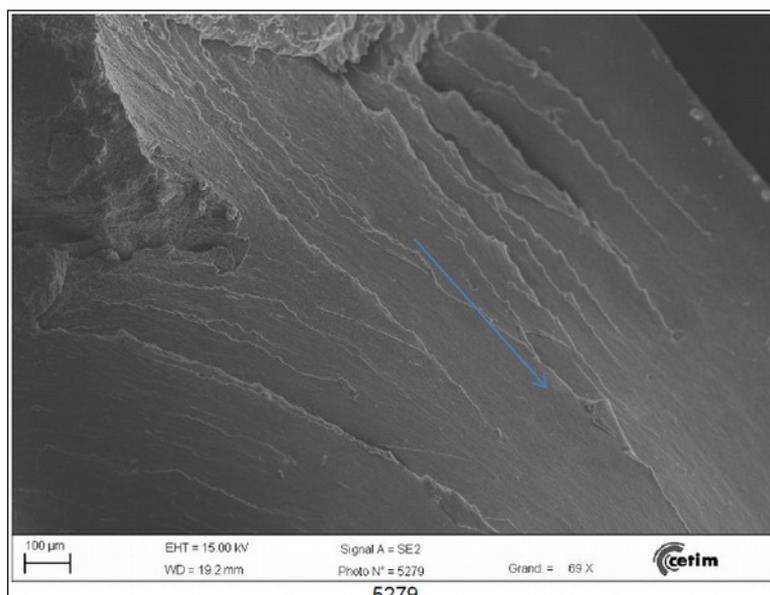
Pour autant, les parties caoutchouc présentent deux types de dégradations :

- des zones de désadhésion métal / élastomère ;
- des déchirures à l'intérieur de l'élastomère.



*Photo d'un plot présentant des déchirures et des désadhésions*

Ces éléments constituent des signes de vieillissement en surface. Il faut ajouter à cela que les déchirures sont également de deux types : des déchirures brutales, qui peuvent être postérieures à la chute du coffre et à sa destruction, et des déchirures par fatigue, du fait de la présence d'indices de stries. Il faut indiquer que contrairement aux faciès des pattes, les faciès des plots sont plus difficilement exploitables.



### *Indices de fatigue*

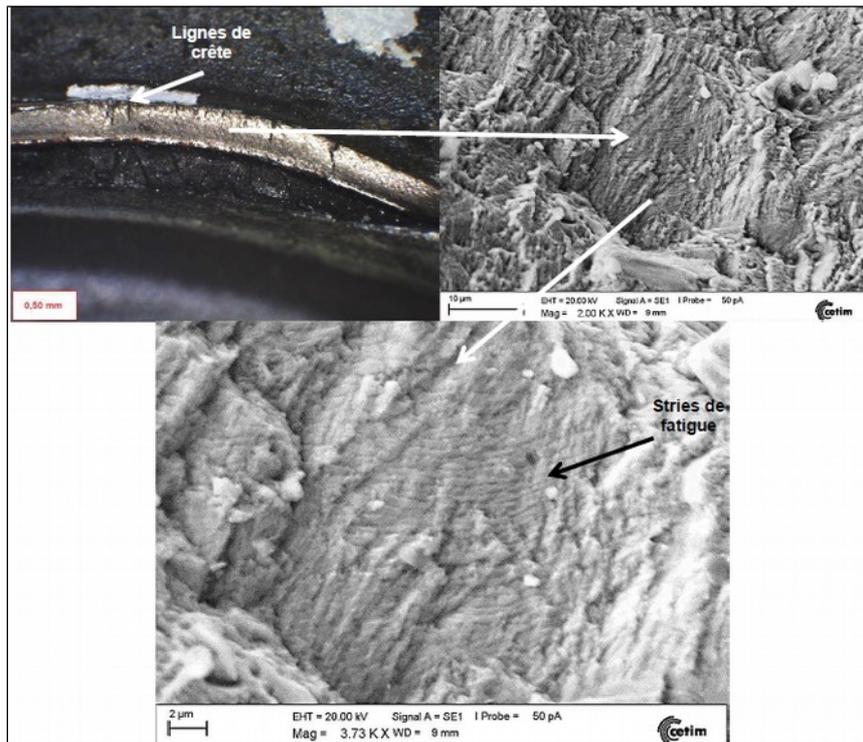
De ce fait, la RATP a également fourni les plots détériorés du coffre onduleur MA-0062 (celui impliqué dans la rupture de 2015) ainsi que ceux du coffre onduleur MA-0046, qui ont simplement servi de comparatifs pour tenter d'expliquer des phénomènes qui auraient pu apparaître post rupture des pattes de fixation.

À l'aide de ces plots d'autres coffres onduleurs, le CETIM indique que les deux types de dégradations sont également visibles et avance l'hypothèse que les dégradations débuteraient par la désadhésion de l'interface caoutchouc / métal, puis par une fissuration interne au caoutchouc.

Sur une paire de plots, celui côté ventilateur est toujours le plus détérioré.

Concernant maintenant les parties métalliques des plots, de nombreuses déformations ont pour origine la chute du coffre sur la voie et ses conséquences.

Pour autant, les analyses conduites par le CETIM ont mis en évidence des traces de fatigue.



*Photo de fissuration par fatigue d'un plot*

Par ailleurs, de nombreuses lignes de crêtes sont présentes sur les plots et les dégradations s'initient dans les zones embouties. Les amorçages sont systématiquement situés sur la face externe des plots. Notons également que les faciès de rupture exploitables sont lisses, ce qui signifie que les contraintes mécaniques conduisant à la rupture sont relativement faibles au regard du matériau présent. Contrairement à l'expertise des pattes, il n'a pas été identifié de motif.



*Zone de fissuration de la partie métallique des plots*

## Annexe 4 : synthèse des coffres onduleurs présentant des plots fissurés

Le tableau ci-dessous synthétise les quatre GMV présentant des plots fissurés.

Référence du coffre onduleur	Lieu d'expertise des plots	Commentaires
<b>COFON.MA-0062</b> <i>(Rupture patte décembre 2015)</i>	Expertise ALSTOM Tarbes	Monté sur train T2027-N1 Présence de plots arrière fissurés et déchirés
<b>COFON.MA-0028</b> <i>(Chute coffre décembre 2016)</i>	Première expertise dans les locaux RATP	Monté sur train T2025-N2 Plots globalement très endommagés par le déraillement. Plot arrière en position A déchiré et fissuré.
	Envoyés au CETIM pour expertise approfondie	Matière élastomère non dégradée Présence de signes de rupture métallique par fatigue
<b>COFON.MA-0046</b>	AMT Fontenay de la RATP	Monté sur train T2027-N1 Présence de plots arrière fissurés sans déchirure associée
<b>COFON.MA-0023</b>	Dépôt RATP Charonne	Monté sur train T2027-N1 Présence de plots arrière fissurés et déchirés



Bureau d'Enquêtes sur les Accidents de Transport Terrestre



**Grande Arche - Paroi Sud**  
**92055 La Défense cedex**

Téléphone : 01 40 81 21 83

Télécopie : 01 40 81 21 50

[bea-tt@developpement-durable.gouv.fr](mailto:bea-tt@developpement-durable.gouv.fr)

[www.bea-tt.developpement-durable.gouv.fr](http://www.bea-tt.developpement-durable.gouv.fr)

