

A large, decorative graphic consisting of several concentric, overlapping circular bands in various shades of purple and blue, creating a sense of depth and movement. The bands are positioned behind the main title text.

**RAPPORT
D'ENQUÊTE TECHNIQUE
sur le déraillement
d'une rame de métro
survenu le 21 décembre 2018
à Marseille (13)**

Octobre 2020

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

Affaire n° BEATT-2018-11

**Rapport d'enquête technique
sur le déraillement d'une rame de métro
survenu le 21 décembre 2018
à Marseille (13)**

Bordereau documentaire

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

Titre du document : Rapport d'enquête technique sur le déraillement d'une rame de métro survenu le 21 décembre 2018 à Marseille (13)

N° ISRN : EQ-BEAT—20-7 --FR

Proposition de mots-clés : métro, déraillement, interaction matériel - voie

Avertissement

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

Cette enquête a pour seul objet de prévenir de futurs accidents. Sans préjudice, le cas échéant, de l'enquête judiciaire qui peut être ouverte, elle consiste à collecter et analyser les informations utiles, à déterminer les circonstances et les causes certaines ou possibles de l'évènement, de l'accident ou de l'incident et, s'il y a lieu, à établir des recommandations de sécurité. Elle ne vise pas à déterminer des responsabilités.

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

SOMMAIRE

GLOSSAIRE.....	9
RÉSUMÉ.....	11
1 - CONSTATS IMMÉDIATS ET ENGAGEMENT DE L'ENQUÊTE.....	13
1.1 - Les circonstances de l'événement.....	13
1.2 - Le bilan humain et matériel.....	13
1.3 - Les mesures prises après l'événement.....	15
1.4 - L'engagement et l'organisation de l'enquête.....	15
2 - CONTEXTE DE L'ACCIDENT.....	17
2.1 - Le réseau de métro marseillais.....	17
2.2 - Les caractéristiques techniques générales du métro marseillais.....	17
2.2.1 - Le matériel roulant.....	17
2.2.2 - La voie.....	18
2.2.3 - L'appui et le guidage des rames.....	19
2.2.4 - L'alimentation électrique de la rame.....	19
2.2.5 - Les appareils de voie.....	21
2.2.6 - La surveillance automatique des pneus et des frotteurs en ligne.....	22
2.3 - L'exploitation du métro marseillais.....	23
2.3.1 - Organisation et missions.....	23
2.3.2 - La conduite des rames de métro.....	23
2.3.3 - La régulation du trafic.....	24
2.4 - La maintenance du métro marseillais et de ses installations.....	24
2.5 - La zone de l'accident.....	25
3 - COMPTE RENDU DES CONSTATS IMMÉDIATS.....	29
3.1 - Le résumé des déclarations.....	29
3.1.1 - Le conducteur de la rame qui a déraillé.....	29
3.1.2 - La conductrice de la rame en attente en arrière-gare.....	30
3.1.3 - Le régulateur.....	30
3.2 - L'évacuation des passagers.....	31
3.3 - Les constats au centre de supervision des réseaux.....	32
3.4 - Les constats sur la voie.....	32
3.5 - Les constats sur le matériel roulant.....	35
3.5.1 - Les données de l'enregistreur de bord.....	35
3.5.2 - Les dégâts matériels à la rame impliquée.....	36
3.5.3 - Les résilles.....	38
3.5.4 - La maintenance du matériel roulant.....	38
3.6 - Les mesures conservatoires prises après le 21 décembre 2018.....	39
3.7 - Conclusion sur les constats immédiats.....	39
4 - COMPTE RENDU DES INVESTIGATIONS SUR LA RUPTURE DU FROTTEUR.....	41
4.1 - Le retour d'expérience sur ce type d'événement.....	41
4.1.1 - L'accidentologie sur le métro marseillais sur un déraillement et/ou perte de frotteurs.....	41
4.1.2 - Les investigations sur d'autres matériels roulants.....	41

4.2 - L'étude d'un premier mode de casse du frotteur.....	41
4.2.1 - Les vérifications sur la matière de la pièce cassée.....	42
4.2.2 - La mesure in situ des vibrations en voie des frotteurs.....	42
4.2.3 - Les contraintes auxquelles les frotteurs peuvent résister.....	43
4.3 - L'étude d'un second mode de casse du frotteur.....	44
4.3.1 - La recherche du dénominateur commun entre les frotteurs cassés.....	45
4.3.2 - L'identification du mode de rupture des frotteurs.....	47
4.3.3 - La vérification de la casse par modélisation et par essais.....	50
4.4 - L'identification des éléments de voie susceptibles de causer la rupture du frotteur.....	52
4.4.1 - Les vérifications sur la voie.....	52
4.4.2 - Première hypothèse explorée : le choc du frotteur sur les contre-rails.....	52
4.4.3 - Seconde hypothèse explorée : le choc du frotteur suite à l'usure différentielle de la pointe de cœur et des pattes de lièvre.....	54
4.4.4 - L'étude d'insertion des frotteurs négatifs ou de masse sur les appareils de voie.....	57
4.4.5 - Hypothèse sur l'origine des usures verticales.....	59
4.5 - Mesures correctives mises en œuvre par l'exploitant.....	60
4.6 - La prise en compte de l'interaction frotteur/voie au long de la vie du système.....	62
4.6.1 - L'analyse préliminaire des dangers du métro marseillais.....	62
4.6.2 - Le cahier des charges du renouvellement des appareils de voie.....	64
4.6.3 - Les fiches de maintenance voie.....	66
4.6.4 - L'analyse des incidents de perte de frotteur par l'exploitant.....	66
4.6.5 - L'analyse de la perte d'autres composants des matériels roulants sur la voie.....	67
4.6.6 - Conclusion sur la prise en compte de l'interaction frotteur/voie tout au long de la vie du système.....	67
5 - RESTITUTION DU DÉROULEMENT DE L'ÉVÉNEMENT.....	69
6 - ANALYSE DES CAUSES ET FACTEURS ASSOCIÉS, ORIENTATIONS PRÉVENTIVES. 71	71
6.1 - L'arbre des causes.....	71
6.2 - Les causes de l'événement.....	71
6.3 - L'analyse préliminaire des dangers.....	72
6.4 - La vérification des composants actuels pouvant présenter un risque.....	73
6.5 - Les manuels de maintenance de la voie et du matériel roulant.....	74
6.6 - L'amélioration du retour d'expérience en exploitation et en maintenance concernant la perte d'une pièce.....	75
7 - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	77
7.1 - Conclusions.....	77
7.2 - Recommandations.....	78
ANNEXES.....	79
Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête.....	81
Annexe 2 : Archives de l'écran de régulation.....	82

Glossaire

- **AdV** : Appareil de Voie
- **APD** : Analyse Préliminaire des Dangers
- **CDV** : Circuit de Voie
- **CMC** : Conduite Manuelle Contrôlée
- **CML** : Conduite Manuelle Libre
- **CSR** : Centre de Supervision des Réseaux
- **DSO** : Départ Sur Ordre
- **DSR** : Dossier de Sécurité Régularisé
- **GMAO** : Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur
- **GR** : Grande Révision
- **LM** : Limite de Manœuvre
- **MR** : Matériel Roulant
- **PCC** : Poste de Commande Centralisé
- **PdL** : Patte de Lièvre
- **RTM** : Régie des Transports Métropolitains (anciennement Régie des Transports de Marseille)
- **STRMTG** : Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés
- **THF** : Téléphone Haute Fréquence
- **TPFG** : Test Pneu Frotteur Gabarit

Résumé

Le vendredi 21 décembre 2018, à 8 h 25, une rame de la ligne 2 du métro de Marseille déraile d'un bogie, juste après son départ de la station terminus Sainte-Marguerite-Dromel en direction de Bougainville.

La rame transportait une centaine de passagers qui ont été évacués dans de bonnes conditions. Il y a eu 15 blessés lors du déraillement du fait des secousses ; 14 ont été pris en charge par les marins pompiers.

Des dégâts matériels ont été constatés au niveau de la voie et de la rame. Après enlèvement de la rame puis remise en état et vérification de la voie, la ligne a été remise en exploitation le lendemain vers 16 heures.

La cause du déraillement de la rame est la perte, dans un cœur d'aiguillage, d'une pièce d'un bogie moteur. Il s'agit d'un frotteur négatif. Faisant obstacle au passage des roues, cette pièce a provoqué la montée des roues du bogie suivant, la sortie du rail de ce bogie et donc son déraillement. Le bogie déraillé est resté à proximité de sa voie mais a poussé la barre latérale d'alimentation électrique contre la bande de roulement pneu de la voie à côté, ce qui a déclenché la disjonction de l'alimentation électrique et de ce fait, l'arrêt automatique de la rame.

La perte de la pièce est due à sa casse préalable. Cette casse a été provoquée par un choc appliqué latéralement par un élément de voie. Le choc a appliqué sur la pièce un couple de flexion non prévu en conception.

Toutefois, après la casse de la pièce, un dernier élément constituant une bielle de maintien reliait encore les deux parties de la pièce, les maintenant solidaires. Cette bielle a cassé à la station Sainte-Marguerite entraînant la chute de la pièce.

Deux parties d'aiguillage ont été identifiées comme pouvant être à l'origine du choc : la première est un angle saillant de l'épaulement des contre-rails et la seconde, une arête vive de la patte de lièvre dite directe.

Deux facteurs ont contribué à l'avènement de l'accident :

- la non-évaluation du risque d'interaction entre la voie et la pièce du bogie lors de la conception, et de ce fait, l'absence de prescription de maintenance des aiguillages prévenant l'évolution de ce risque ;
- la non-identification de la récurrence des casses antérieures de cette pièce comme précurseur d'un danger pour la sécurité.

Le BEA-TT émet **3 recommandations** et **2 invitations**. Elles concernent :

- le traitement du risque de perte d'un composant du matériel roulant dans l'analyse préliminaire des dangers préalable à la mise en service d'un équipement ;
- l'identification des composants pouvant présenter un risque et leur traitement ;
- le traitement exhaustif des risques liés à l'interface entre la voie et les frotteurs négatifs ou de masse du matériel roulant, notamment dans les manuels de maintenance voie et matériel roulant ;
- le retour d'expérience en exploitation et maintenance en ce qui concerne la perte d'une pièce.

1 - Constats immédiats et engagement de l'enquête

1.1 - Les circonstances de l'événement

Le vendredi 21 décembre 2018 à 8 h 25, la rame B14 de numéro d'exploitation 207 démarre de la station terminus Sainte-Marguerite-Dromel, quitte le quai en direction de Bougainville et s'engage sur une zone d'aiguillage en voie directe. La zone est en viaduc ouvert. Les conditions météorologiques sont bonnes : pas de pluie et bonne visibilité. La conduite du train est assurée par un conducteur à bord et celui-ci est assisté par un système de pilotage automatique.



Figure 1 : zone du déraillement à Sainte-Marguerite-Dromel

Au passage de la zone d'aiguillage, un court-circuit provoque la disjonction de l'alimentation en courant électrique. Une forte explosion est entendue. La rame s'arrête. Un dégagement de fumée est observé sur la rame. Après sécurisation de la zone, les voyageurs sont évacués vers la station Sainte-Marguerite-Dromel et certains, blessés lors du déraillement, sont pris en charge par les marins pompiers préalablement alertés.

Le conducteur réalise une visite de sa rame à l'issue de laquelle il signale à la régulation que le bogie de la motrice NB14 est désolidarisé de la caisse. Le régulateur appelle les services techniques de l'exploitant pour intervenir sur site.

1.2 - Le bilan humain et matériel

Lors de l'accident, des faux-plafonds, désignés ci-après résilles et présents dans les compartiments voyageurs, sont tombés sur les personnes à bord de la rame. Quatorze blessés sont identifiés et ont été transportés vers l'hôpital. Les blessures sont principalement des contusions et des douleurs cervicales. Elles sont consécutives à la chute des résilles mais également aux fortes secousses lors de l'accident et au déséquilibre de certains passagers.



Figure 2 : origine des résilles tombées

De gros dégâts matériels sont à déplorer au niveau de la voie (barre de guidage arrachée, traverses et pistes de roulement endommagées...) et de la rame (frotteurs arrachés, bogie arraché, suspension cassée...).

Le bogie de la deuxième voiture est sorti des rails. Le pneu avant gauche de ce bogie a éclaté. Son moteur a tourné de 90° autour d'un axe horizontal transversal à la voie.



Figure 3 : le bogie déraillé et le pneu crevé de la rame B14

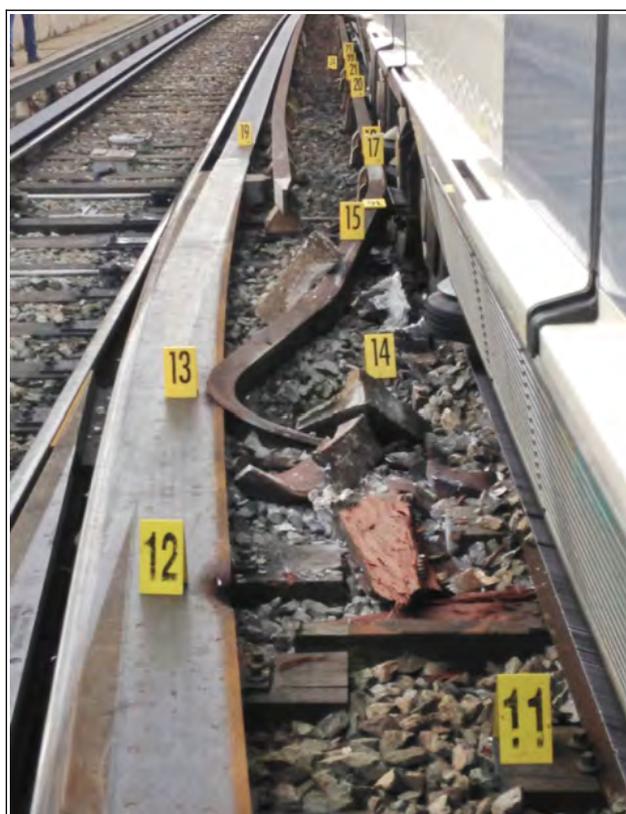


Figure 4 : traverses arrachées et rail de guidage plié



Figure 5 : sur la rame B14, bogie cassé dont le moteur a pivoté de 90°

1.3 - Les mesures prises après l'événement

Les services techniques du matériel roulant de l'exploitant procèdent à la désolidarisation du bogie de la caisse. Puis ils évacuent la caisse par des grues et la déposent sur un porte-char en bas du viaduc. Le bogie est rapatrié par la voie grâce à un locotracteur.

Le trafic est interrompu entre Castellane et Sainte-Marguerite-Dromel jusqu'au lendemain samedi à 16 heures. Le service Voie effectue des travaux de remise en état provisoire et les essais de remise en service, puis il autorise la circulation à vitesse réduite de 15 km/h sur la voie 2 jusqu'à réparation définitive quatre jours plus tard.

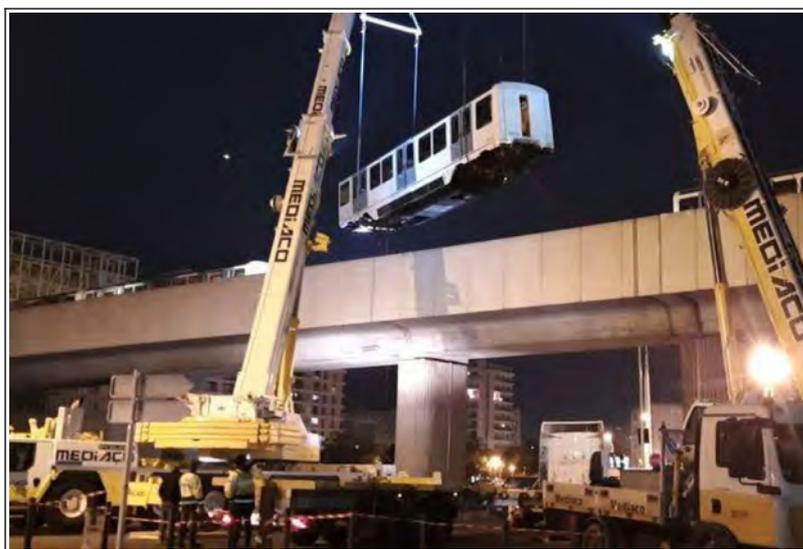


Figure 6 : évacuation de la caisse accidentée

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

Au vu des circonstances et du contexte de l'accident, le directeur du bureau d'enquêtes sur les accidents de transport terrestre (BEA-TT) a ouvert le 21 décembre 2018 une enquête technique en application des articles L. 1621-2 à L. 1622-2 et R. 1621-1 à R.1621-26 du Code des transports relatifs, notamment, aux enquêtes techniques après accident ou incident de transport terrestre.

Les enquêteurs techniques du BEA-TT se sont rendus sur place. Ils ont rencontré les représentants de l'exploitant ainsi que les agents opérationnels en service le jour de l'accident. Ils ont également rencontré le constructeur des frotteurs équipant le matériel roulant Faiveley ainsi que le constructeur d'aiguillages ferroviaires Vossloh. Ils ont enfin rencontré les agents du STRMTG en charge du contrôle de l'exploitation.

À la date de ce rapport, les enquêteurs techniques du BEA-TT, malgré leurs demandes, n'ont pas pu avoir communication des pièces et documents saisis par les services de Police, tels que les pièces tombées sur la voie lors de l'accident et les vidéos embarquées de la rame B14, qui auraient permis les vérifications des événements s'étant déroulés dans les voitures (secousses, chutes des plafonniers, évacuation).

N'ayant pas pu accéder à la pièce tombée à la voie le 21 décembre 2018, ils ont utilisé un autre événement de casse de bras de frotteur du 7 janvier 2019 sur la rame A08 pour investiguer sur le type de rupture. Cette casse est similaire à celle du 21 décembre 2018 dans la forme de la rupture, la localisation sur la pièce et le lieu de la chute. Ils ont aussi eu recours à des essais en voie, réalisés le 22 mai 2019 avec une rame, qui ont permis d'observer in situ la perte d'une pièce de même type.

2 - Contexte de l'accident

2.1 - Le réseau de métro marseillais

Le réseau de métro de Marseille comporte deux lignes, essentiellement souterraines, totalisant 21,5 kilomètres de longueur. Un premier tronçon de la ligne 1 a été mis en service le 26 novembre 1977 et de la ligne 2, le 3 mars 1984. De multiples extensions ont depuis été réalisées sur les deux lignes. La station Sainte-Marguerite-Dromel a été mise en service le 1^{er} février 1986.

Le réseau dessert aujourd'hui 28 stations, dont deux offrent une correspondance entre les deux lignes. La fréquentation du métro s'élève à 309 000 voyages/jour, soit 36 % du trafic de transport collectif de la Métropole (source RTM, 2020).



Figure 7 : plan du réseau de Marseille

L'exploitation du métro de Marseille est assurée, depuis 1986, par la Régie des Transports Métropolitains (ancienne Régie des Transports de Marseille ou RTM) qui est titulaire depuis 2011 d'un contrat négocié d'obligation de service public de la métropole Aix-Marseille-Provence.

2.2 - Les caractéristiques techniques générales du métro marseillais

2.2.1 - Le matériel roulant

Le réseau marseillais utilise une technologie de métro sur pneumatiques : les rames MPM 76 (pour « Métro pneumatiques Marseille année 1976 ») ont été conçues et construites par un groupement d'industriels et bureau d'études (Somica, SGTE, SOFRETU...) dont la plupart ont été depuis intégrés au groupe Alstom.

Le parc est composé de 36 rames, 21 ont été livrées en 1976 pour la ligne M1, les 15 autres en 1983 pour la ligne M2. Les rames circulent en composition de quatre voitures (motrice impaire, remorque, motrice sans loge, motrice paire) et à une vitesse maximale de 80 km/h. L'entretien du matériel est assuré par les ateliers de la RTM, situés au dépôt de La Rose.

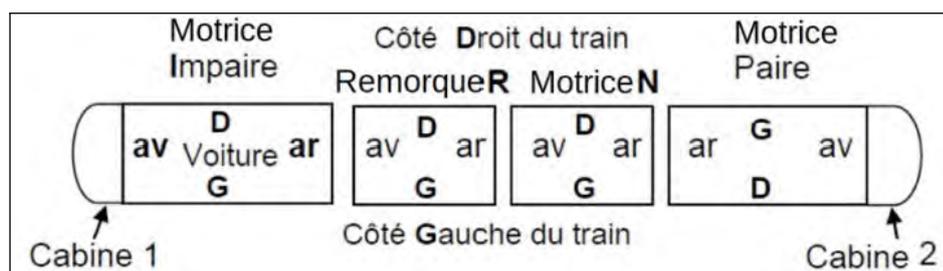


Figure 8 : schéma d'une rame (appelée aussi train)

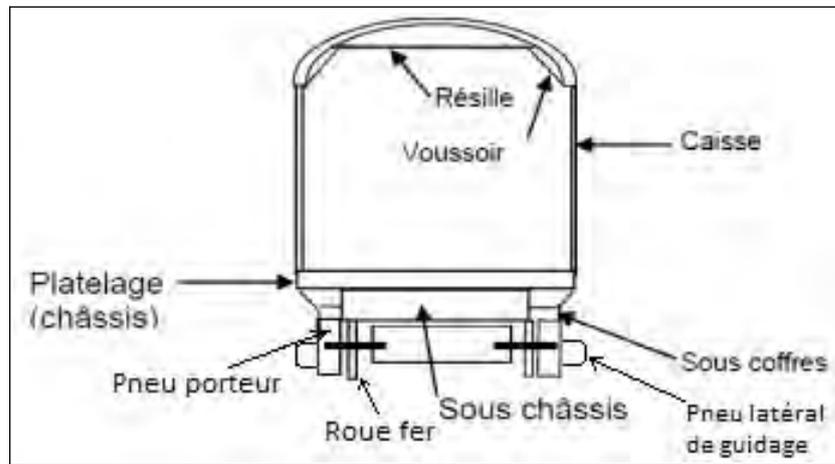


Figure 9 : schéma d'une caisse et coupe au niveau d'un essieu

Les rames arrivent aujourd'hui en fin de vie. La métropole Aix-Marseille-Provence envisage leur renouvellement depuis 2011. Celui-ci est prévu en 2025. Les nouvelles rames seront entièrement automatiques et accessibles aux personnes à mobilité réduite.

2.2.2 - La voie

Sur les parties aériennes de la ligne de métro, la voie est sur ballast et traverses de bois. Elle est composée de :

- deux pistes de roulement, qui supportent les pneus porteurs ;
- deux rails « fer » de sécurité de profil Vignole, qui supportent les roues « fer » et permettent le retour du courant de traction via des frotteurs ;
- deux barres de guidage, permettant le guidage et la captation de l'énergie de traction. Des isolateurs supportent chaque barre de guidage afin de l'isoler électriquement de son environnement.

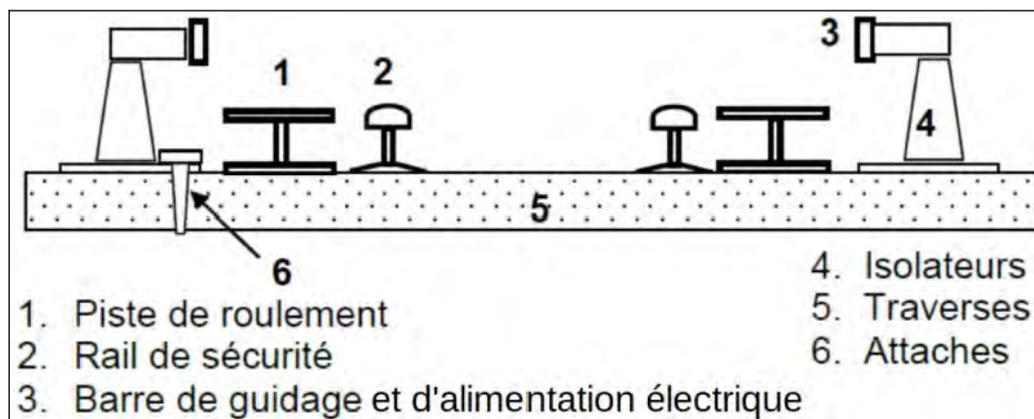


Figure 10 : schéma et légende de la voie

2.2.3 - L'appui et le guidage des rames

Pour ce métro à pneumatiques, les roues à pneus des bogies portent la rame en appui sur la piste de roulement.

En voie courante, des pneus plus petits, horizontaux et latéraux, guident la rame par leur appui sur la barre de guidage, qui sert également pour l'alimentation en 750 volts courant continu.

Les pneus porteurs sont tous doublés de roues « fer » supplémentaires qui servent de support alternatif en cas de crevaison de pneus ou de pneu dégonflé (cas rares). Au franchissement d'un appareil de voie, ce sont les boudins des roues « fer », en contact avec les rails « fer », qui guident les rames dans la direction voulue, les barres de guidage latérales étant interrompues.

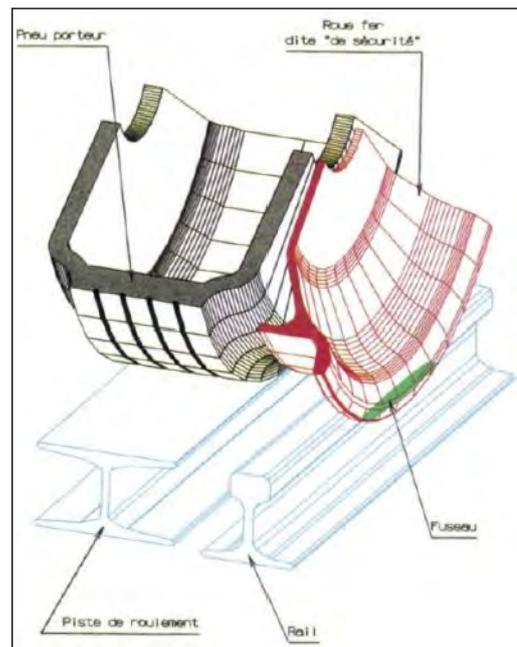


Figure 11 : position relative de la roue fer et du pneu porteur

2.2.4 - L'alimentation électrique de la rame

La **captation** de l'alimentation électrique est réalisée sur la barre de guidage et d'alimentation, par deux frotteurs positifs placés de chaque côté de chaque bogie moteur.



Figure 12 : visuel de la voie



Figure 13 : frotteur positif

Le retour du courant est assuré par des **frotteurs négatifs** en contact avec les rails « fer » et fixés de part et d'autre sous le bogie arrière des motrices M1 et M2, et le bogie avant de la motrice N (cf. figure 14). Ils permettent également d'assurer le shuntage des circuits de voie. Les frotteurs négatifs en contact avec les rails et la voie sont isolés de la masse du bogie.

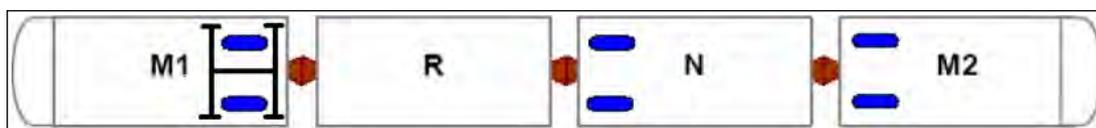


Figure 14 : position (en bleu) des frotteurs négatifs sur une rame

De conception identique, des **frotteurs de masse** équipent également les quatre voitures de la rame. Comme les frotteurs négatifs, ils assurent le shuntage des circuits de voie. Les frotteurs de masse en contact également avec les rails de la voie sont au contraire connectés à la masse du bogie. Ils assurent le maintien du potentiel de la voiture à celui des rails.

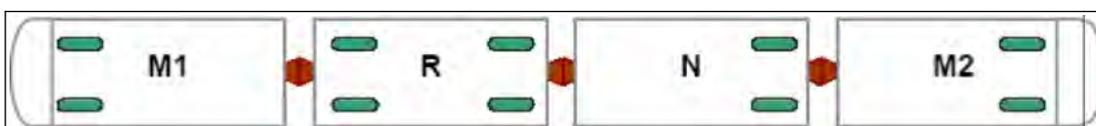


Figure 15 : position (en vert) des frotteurs de masse sur une rame

Ainsi, avec 36 rames, le parc de métro marseillais comporte donc 576 frotteurs négatifs et de masse.

Le support du frotteur est de conception d'origine, faite par Faiveley¹. Il faut distinguer que si le contact rail - roue est roulant, celui des frotteurs négatifs et de masse sur le rail est frottant.



Figure 16 : frotteur négatif ou de masse neuf installé sur un bogie

¹ Faiveley Transport est une entreprise spécialisée dans les équipements du matériel ferroviaire. Aujourd'hui, elle fait partie du Groupe Wabtec.

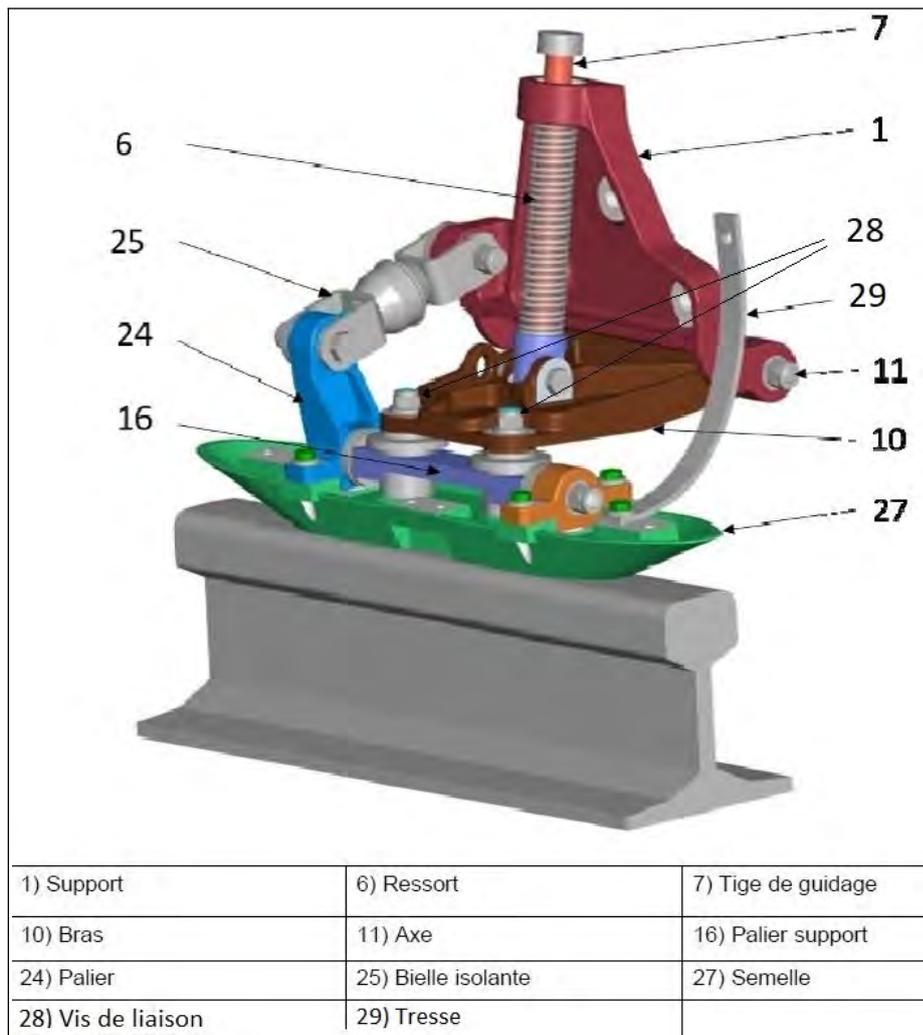


Figure 17 : modélisation 3D du frotteur négatif ou de masse avec identification de ses composants²

Nous verrons que ces frotteurs négatifs ou de masse ont joué un rôle important dans le déroulement de l'accident. Dans la suite du rapport, le mot « frotteur » fera indifféremment référence aux frotteurs négatifs ou de masse.

2.2.5 - Les appareils de voie

Les appareils de voie sont des dispositifs permettant le changement de voie d'une rame par le positionnement d'un ensemble mobile (aiguille) donnant la direction souhaitée, tout en assurant toutes les fonctions de la voie courante.

La conception des aiguillages de Marseille a été faite par le bureau d'études de Vossloh³ et la réalisation par l'usine de Vossloh de Reichshoffen.

La vitesse maximale de franchissement d'un appareil de voie, en voie déviée, dépend directement de la valeur du rayon de la voie déviée. Cette vitesse est donnée par le constructeur de l'appareil de voie et elle est intégrée aux consignes d'exploitation. Elle est de 21 ou de 26 km/h à Marseille, selon le type d'appareil de voie.

² Les numéros indiqués dans la légende de cette figure seront réutilisés tout au long du rapport pour identifier les pièces du frotteur.

³ Vossloh est une société de construction ferroviaire spécialisée dans les appareils de voie.

Les appareils sont conçus pour le métro à pneu : on ne roule pas sur le rail mais sur la piste de roulement. Comme la barre de guidage est partiellement absente dans la zone de l'appareil, le guidage du train est repris par le rail « fer », les pistes de roulement pour les pneumatiques continuant de supporter les charges verticales.

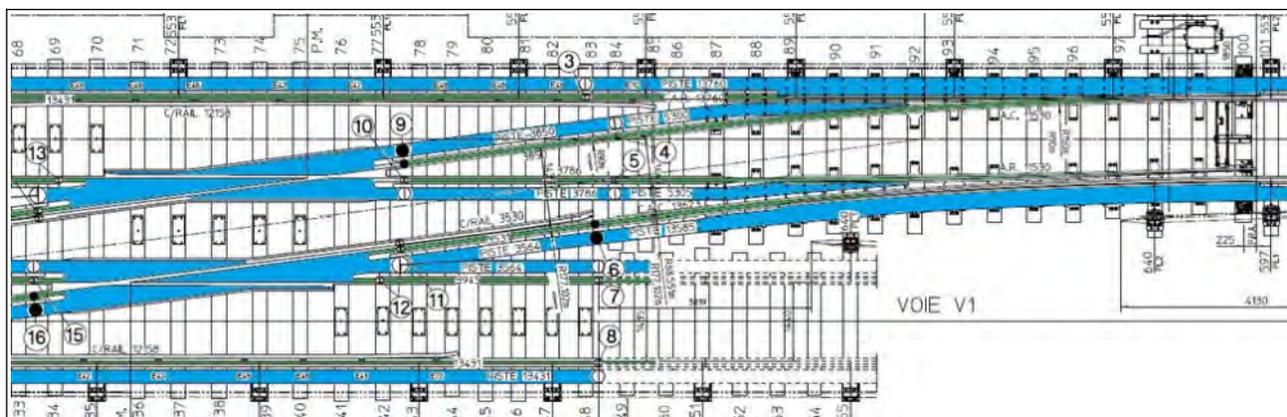


Figure 18 : aiguillage 13 dans la communication croisée 13/23 à Sainte-Marguerite (en bleu la piste de roulement des pneus, en vert le rail « fer »)

Ces appareils sont des points particulièrement sensibles de la voie nécessitant une maintenance plus soutenue que la voie courante, du fait de la fragilité de ces ensembles mécaniques par les chocs subis, de la sensibilité du fonctionnement des ensembles mobiles à la qualité du nivellement et du dressage, et de leur moindre résistance mécanique.

2.2.6 - La surveillance automatique des pneus et des frotteurs en ligne

Un système appelé « test pneu frotteur gabarit » (TPFG) permet de détecter un pneu dégonflé, de mesurer la résistance électrique des lignes de frotteurs négatifs et de masse associés, et de vérifier le gabarit sous le train. Un TPFG est positionné à Bougainville sur la ligne 2 et un autre à La Rose sur la ligne 1. Ainsi, la présence des frotteurs négatifs et de masse est contrôlée lorsque la rame passe au-dessus d'un TPFG. Le TPFG est en interface avec une signalisation ferroviaire, qui reste au rouge en cas de déclenchement du test.



Figure 19 : le TPFG implanté à La Rose

En cas de défaut de shuntage d'un frotteur, le TPFG émet une alarme au Poste de Commande Centralisé (PCC) et indique la ligne d'essieu en anomalie. Des mesures de restriction d'exploitation sont alors immédiatement prises pour la rame concernée.

2.3 - L'exploitation du métro marseillais

2.3.1 - Organisation et missions

L'exploitation du système de transport métro est assurée par la Direction Métro de la RTM. Les postes opérationnels suivants contribuent à la production en sécurité du service transport métro :

- **le conducteur de rame** : il est responsable de la prise en charge, de la conduite et de la surveillance du bon fonctionnement d'une rame et de ses équipements. Les conducteurs de rame sont affectés à une ligne.
- **le coordinateur métro** : en poste au Centre de Supervision des Réseaux⁴ (CSR) localisé au dépôt Métro de La Rose, il est responsable de l'exploitation en temps réel. Il a, en la matière, autorité sur l'ensemble des agents d'exploitation quels que soient leur grade ou niveau hiérarchique.
- **le régulateur trafic** : en poste au PCC, il est responsable de la circulation des rames sur une ligne. Il est le gestionnaire d'exploitation des installations de signalisation et d'énergie de cette ligne.
- **le chef contrôleur régulateur en terminus** : en poste dans un terminus principal (La Rose ou Zoccola), il est responsable, par délégation du régulateur trafic de la ligne concernée, de la circulation des rames sur la zone de garage. Il est le gestionnaire des installations trafic et traction du terminus.
- **le chef contrôleur en ligne** : affecté sur une ligne, il encadre sur le terrain le personnel de conduite et contribue à la gestion des incidents d'exploitation et des accidents sur le terrain en relation avec le PCC.

Les agents opérationnels possèdent une ou plusieurs habilitations (conducteur, régulateur...) qui leur sont délivrées par le directeur du métro validant une formation initiale.

2.3.2 - La conduite des rames de métro

La conduite est normalement assurée depuis la cabine qui se trouve à l'avant de la rame dans le sens du mouvement. Les conducteurs respectent les procédures régissant la circulation des rames et la conduite de leur rame quel que soit le mode de conduite. Ils obéissent aux ordres qui leur sont donnés au travers de la signalisation, ainsi qu'à ceux qu'ils reçoivent du régulateur trafic.

La conduite des rames s'effectue selon trois modes possibles :

- **le Pilotage Automatique (PA)** : dans ce mode, le manipulateur est inactif, le conducteur est assisté par un automate pour les fonctions de traction, de freinage et les arrêts en station. L'échange voyageurs en station (ouverture et fermeture des portes) est géré par le conducteur. Un dispositif de sécurité assure le contrôle de la marche et de la vitesse du train en respectant la signalisation d'espacement et de manœuvre reçue de la voie.
- **la Conduite Manuelle Contrôlée (CMC)** : la vitesse autorisée est repérée par un indicateur sur le compteur de vitesse de la loge de conduite des trains. Dans ce mode, le conducteur doit effectuer la fermeture préalable des portes, actionner le manipulateur pour accélérer, freiner et s'arrêter en station. De même, le dispositif de sécurité assure un contrôle permanent de la vitesse réelle du train par rapport à la vitesse autorisée. En cas de dépassement, un indicateur sonore se déclenche permettant de signaler au conducteur le dépassement. Le conducteur a un certain

⁴ Le CSR englobe le PCC, le Poste de Commandement Sécurité ainsi que l'Information Transverse Réseau et Clientèle. Le CSR pilote l'ensemble des moyens de correction, de substitution et d'intervention des équipes sur le terrain. Il est l'interlocuteur de la police et des marins pompiers.

temps pour réagir. En cas d'absence de réaction du conducteur, le système provoque l'arrêt du train.

- **la Conduite Manuelle Libre (CML)** : dans ce mode, il n'y a pas de contrôle de vitesse, le conducteur suit les indications visuelles fournies par la signalisation latérale fixe et les procédures d'exploitation. En ligne, ce mode n'est utilisé que pour rapatrier un train en anomalie. La vitesse autorisée est limitée à 30 km/h. Dans les zones de garage, la conduite est toujours en CML et la vitesse est limitée à 20 km/h. Le conducteur respecte alors la signalisation latérale et s'assure visuellement du bon positionnement des aiguilles.

2.3.3 - La régulation du trafic

Les installations des deux lignes de métro sont commandées et contrôlées depuis le PCC par les régulateurs trafic des lignes M1 et M2. Chaque poste de travail est équipé d'un terminal informatique permettant :

- d'assurer la gestion du courant traction ;
- d'effectuer le suivi des rames durant leur service exploitation ;
- de commander les manœuvres des rames ;
- d'entrer en liaison par Téléphone Haute Fréquence (THF) et/ou par canal radio interne (radio Tetra) avec les agents de conduite ;
- de surveiller la gestion du trafic par les automatismes.



Figure 20 : poste du régulateur métro

2.4 - La maintenance du métro marseillais et de ses installations

Les activités de maintenance sont organisées selon cinq spécialités techniques :

- la maintenance « Courants Forts » prend en charge l'alimentation en énergie traction et les installations de transformation et de distribution électriques ;
- la maintenance « Courants Faibles » couvre les activités de signalisation ferroviaire, les modes de communication et le contrôle de la distribution de l'énergie électrique de traction ;
- la maintenance « Matériel Roulant Métro » couvre toutes les activités de maintenance des rames de métro ;

- la maintenance « Ouvrages d'Art » gère la conformité des ouvrages (tunnels, viaducs...) et infrastructures ainsi que la signalétique de sécurité et les moyens de lutte contre l'incendie ;
- la maintenance « Voie » est en charge de la maintenance de la voie ferrée hors signalisation.

Les actions de maintenance sont déclenchées :

- pour la maintenance préventive, selon des fréquences établies dans les plans de maintenance, intégrant les vérifications réglementaires obligatoires ;
- pour la maintenance corrective, par un signalement lors de la détection d'une anomalie. Ce signalement arrive en temps réel dans l'outil de GMAO (Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur) pour prise en charge et affectation à une équipe opérationnelle. Le délai de prise en charge est fonction du niveau de criticité indiqué.

Une fois réalisées, les actions de maintenance sont enregistrées dans le logiciel de GMAO pour en assurer leur traçabilité. Les rapports d'inspection sont conservés et archivés dans chaque entité de maintenance.

2.5 - La zone de l'accident

Le déraillement a eu lieu dans une partie aérienne, juste après la station terminus de Sainte-Marguerite, sur l'aiguillage 21 localisé après la signalisation ferroviaire 22A.

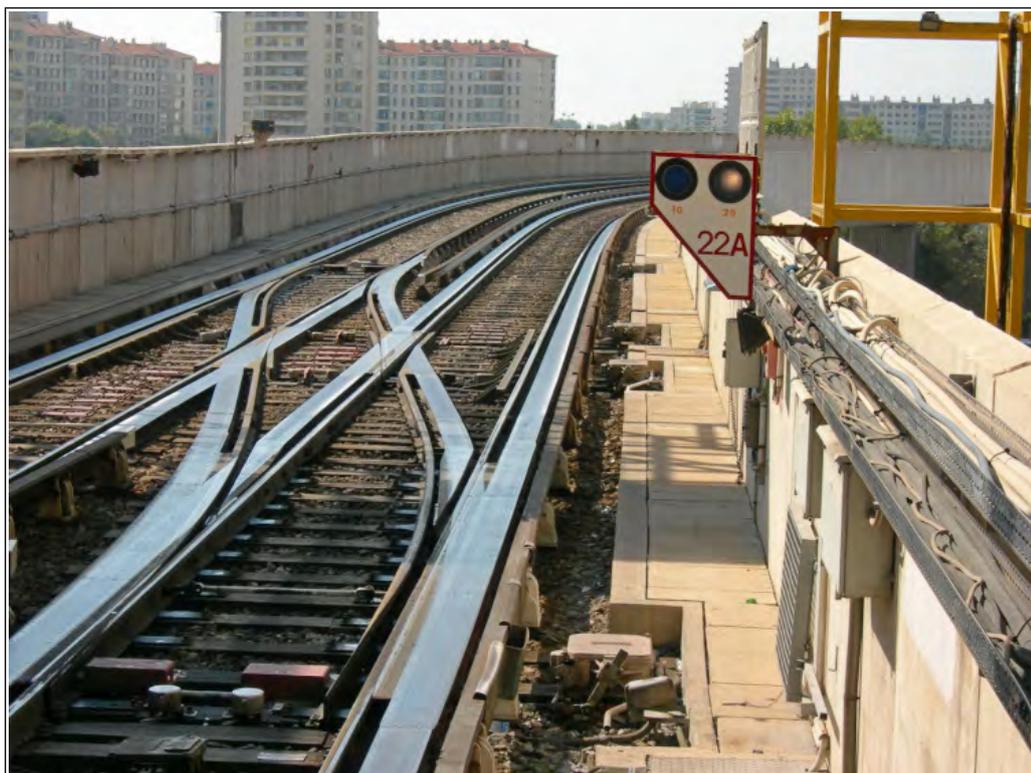


Figure 21 : zone du déraillement, avec l'itinéraire en voie directe autorisé par le signal 22A

La zone d'exploitation Sainte-Marguerite, constituant un terminus de la ligne 2, permet la réalisation des manœuvres d'avant-gare, d'arrière-gare et de garage (ou de dégarage) des rames.

La manœuvre d'arrière-gare de la zone terminus Sainte-Marguerite est la manœuvre normale de retournement d'une rame du service voyageurs de la ligne M2 de la voie 1 vers la voie 2. Elle s'effectue de la façon suivante :

- (1) arrivée de la rame sur la voie 1 et parcours des itinéraires 8/10 et 10/12B ;
- (2) descente des voyageurs sur le quai 1 ;
- (3) parcours de l'itinéraire 12B/24 ;
- (4) changement de loge par l'agent de conduite ;
- (5) parcours de l'itinéraire 24/22A ;
- (6) embarquement des voyageurs sur le quai 2 ;
- (7) parcours de l'itinéraire 22A/20 à l'extinction du Départ Sur Ordre (DSO), constitué de 3 feux blancs disposés en triangle, clignotants ou fixes.

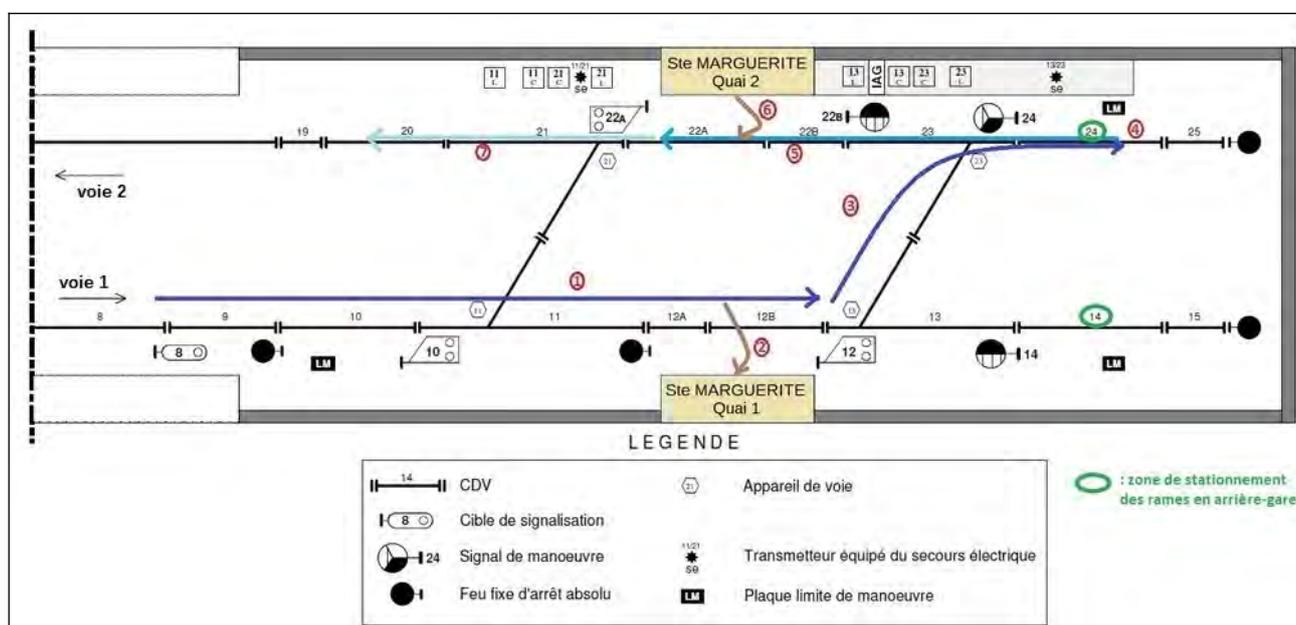


Figure 22 : schéma de la zone de manœuvre et étapes de la manœuvre d'arrière-gare en mode nominal de retournement d'une rame⁵

La manœuvre d'avant-gare de la zone terminus Sainte-Marguerite est la manœuvre de retournement en service dégradé d'une rame de la voie 1 vers la voie 2. Elle s'effectue via la communication 11/21 et les voyageurs descendent alors sur le quai 2.

Enfin, les positions 24, 14 et 12 permettent chacune de garer une rame lors de la fin du service exploitation avec voyageurs.

En 2015, Vossloh a remplacé les quatre appareils de voie de Sainte-Marguerite (11 et 21 en avant-gare, 13 et 23 en arrière-gare) par de nouveaux appareils de voie à « cœur fixe », une technologie déjà mise en œuvre sur la ligne 1. Les précédents appareils de voie étaient à cœur mobile. La modification était globalement au moins équivalente à des équipements existants sur le métro marseillais, dont le retour d'expérience donnait satisfaction.

⁵ Les positions indiquées sur ce schéma seront utilisées dans la suite du rapport.

Situation lors du déraillement du 21 décembre 2018

La rame B14 était garée en position 14. Elle a été manœuvrée pour se positionner en 12 [1], puis en 24 [2], puis en quai 2 [3]. Puis elle est partie en voie 2 [4].

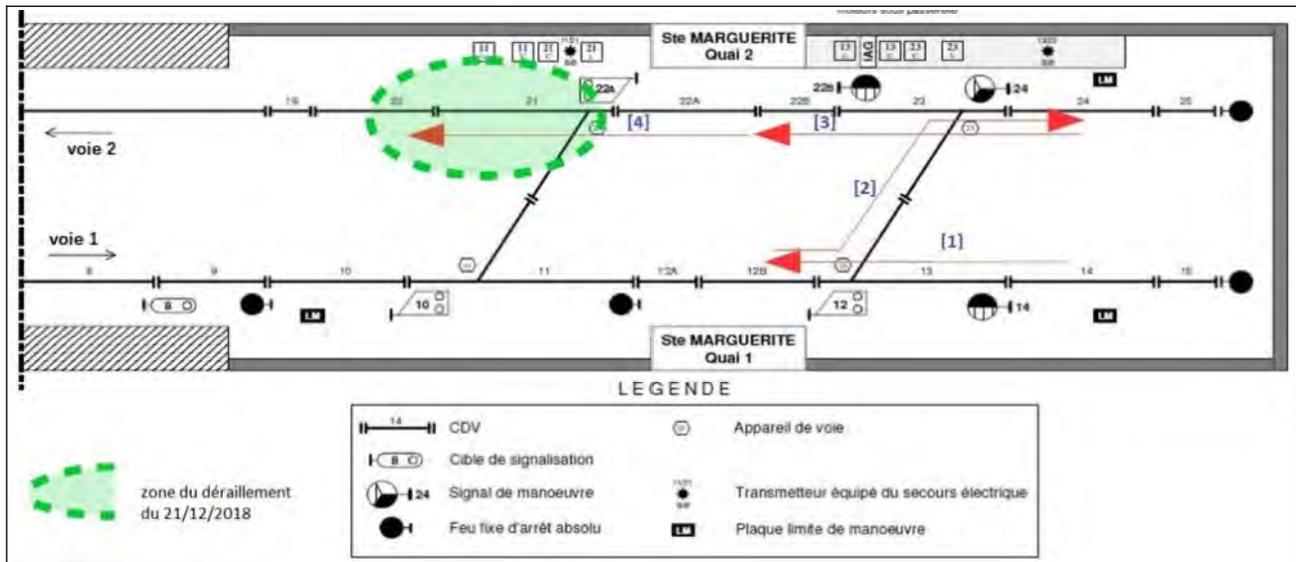


Figure 23 : manœuvre de la rame incriminée lors du déraillement du 21 décembre 2018

3 - Compte rendu des constats immédiats

3.1 - Le résumé des déclarations

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

3.1.1 - *Le conducteur de la rame qui a déraillé*

Le conducteur est en poste depuis 4 ans et demi. Il possède une habilitation de conduite sur les deux lignes de métro après une formation initiale de deux mois et demi. Il n'a jamais connu d'accident.

Le 21 décembre 2018 est un jour de grève en relation avec la future automatisation du métro de Marseille. Le conducteur a commencé son service à 4 h 50, a effectué 3 rotations puis il s'est arrêté à 7 h 10 pour observer une heure de grève. Il reprend le service à 8 h 14 à la station Sainte-Marguerite sur la rame B14 de numéro d'exploitation 207, en position 14. Il effectue une manœuvre de retournement en arrière-gare et vient se positionner au quai départ de la station Sainte-Marguerite. Durant cette manœuvre, il franchit 3 aiguilles et il n'entend aucun bruit suspect.

Il embarque les voyageurs puis lance la séquence de départ. Il voit son « Départ sur Ordre » s'éteindre, il actionne alors le départ de sa rame, en Pilote Automatique. Son indicateur de vitesse limite est sur 50 km/h. La rame démarre. La première voiture passe l'aiguille en sortie de station puis il ressent une forte secousse. Il est déstabilisé, le train freine et s'arrête. Dans la cabine sur le fronton de sa loge, le voyant 750V s'allume pour indiquer une absence de captation du 750 volts et à droite d'autres voyants sont allumés dont « rame bloquée ». Il regarde à l'extérieur de sa rame par la fenêtre droite et voit de la fumée. Il ne regarde pas à gauche.

Il fait une annonce aux voyageurs et il appelle le PCC par sa téléphonie embarquée en cabine (THF). Il indique au régulateur qu'il y a un peu de fumée et qu'il y a eu une secousse. Le PCC lui répond que la conductrice de la rame en attente en arrière-gare de Sainte-Marguerite a vu une jante voler et de la fumée. Ils en supposent qu'un pneu a éclaté. Le PCC lui indique que la zone est hors tension et l'autorise à descendre de sa rame pour évacuer les voyageurs. Le conducteur actionne immédiatement le rupteur⁶ situé le long de la voie à côté de sa rame et il met ensuite en place les court-circuiteurs comme vu en formation.

Il se préoccupe alors de l'évacuation des voyageurs. La conductrice en attente en arrière-gare le rejoint. Ils s'organisent pour l'évacuation. Il y a une échelle dans chaque loge et entre les deux véhicules du milieu. Il récupère l'échelle dans sa loge et commence à aider les passagers de la première voiture à descendre pour les évacuer par la droite de la rame. Il n'y a pas de blessé à l'intérieur de cette voiture. C'était la première fois que le conducteur effectuait cette opération. Les voyageurs étaient globalement compréhensifs et calmes. Quand il a terminé l'évacuation de la première voiture, il va dans la seconde voiture qui suit où il rejoint la conductrice venue en appui : il constate la présence de blessés dont une personne fortement blessée et qui ne peut pas sortir. Tous les autres passagers sortent et évacuent. Il constate également à ce moment-là qu'un

⁶ Un rupteur permet de couper à pied d'œuvre le courant de traction sur une zone donnée. Un court-circuiteur protège l'intervention en cours en provoquant un court-circuit en cas de remise sous tension des voies.

bogie a déraillé. Il téléphone au PCC pour prévenir. Les pompiers arrivent au cours de l'évacuation de la seconde voiture. La conductrice qui l'a rejoint va auprès de la personne fortement blessée. Il continue à aider à l'évacuation et à rassurer les passagers. Le Chef Contrôleur Régulateur est arrivé pendant l'évacuation et s'est également occupé de la personne fortement blessée. Après l'évacuation, le conducteur fait le tour de la rame et transmet des photos au PCC.

Le conducteur n'a vu aucune spécificité sur la voie avant l'incident.

Après quelques jours de repos, il a repris la conduite le 26 décembre 2018.

3.1.2 - La conductrice de la rame en attente en arrière-gare

La conductrice est entrée à la RTM en 2009 et elle conduit les métros depuis 2013. Elle a connu cinq ou six évacuations en tunnel suite à coupure électrique.

Le vendredi 21 décembre 2018, sa conduite commence à 6 h 30 et doit finir à 13 h 20. À 8 h 30, elle est en position 24 c'est-à-dire en arrière-gare à Sainte-Marguerite pour faire son retournement. Elle voit la rame devant elle qui part. Puis elle entend une explosion, voit un arc électrique et un pneu être propulsé à gauche. Elle constate la coupure de l'alimentation en 750V dans sa rame. Elle appelle le PCC pour l'informer. À la demande du PCC, elle actionne un rupteur et part aider le conducteur de la rame accidentée. Elle longe la voie par la droite. Elle actionne tous les rupteurs sur son chemin.

Quand elle arrive auprès de la rame accidentée, les passagers sont en train d'ouvrir les portes. Elle les rassure puis les informe que son collègue et elle vont s'occuper de leur évacuation. Avec le conducteur, ils prennent les échelles rangées dans la rame et ils ouvrent les portes. Le conducteur s'occupe de la première voiture, elle de la seconde voiture. Dans cette seconde voiture, elle voit les grilles tombées et une vitre fissurée. Elle constate qu'il y a des personnes blessées. Certains passagers ont pris des coups sur la tête. Elle appelle alors le PCC pour demander l'intervention des pompiers. Tous les voyageurs sont descendus par les échelles, très conciliants. Elle reste dans la seconde voiture avec la blessée.

Puis les pompiers sont arrivés et ont immobilisé la blessée. Ils étaient en train de la sortir de la rame quand la conductrice a quitté les lieux pour être rapatriée en véhicule de service.

3.1.3 - Le régulateur

Le régulateur est entré à la RTM en juillet 2006, il est devenu conducteur métro puis chef régulateur en terminus. En octobre 2013, il est titularisé comme régulateur métro. Il a déjà géré des évacuations en tunnel (pour des intrusions), en moyenne une fois par an. Il n'a jamais connu d'accident grave.

Ce vendredi matin, le trafic est diminué (3 métros sur 4) du fait d'une grève. À 8 h 20, le conducteur de la rame qui sera accidentée est en position 24 à Sainte-Marguerite, il déplace la rame jusqu'au quai, permet la montée des voyageurs puis démarre. L'accident a lieu quelques instants plus tard.

Au moment de l'accident, le régulateur constate la mise hors tension par l'ouverture du disjoncteur. Puis il communique avec le conducteur via la THF. Ce dernier lui indique une explosion avec dégagement de fumée. Le régulateur pense à un fusible de traction qui a lâché car cela fait un bruit fort. Il confirme l'ouverture des équipements de disjonction au conducteur. À ce moment-là, la conductrice qui était en position d'arrière-gare lui indique qu'il y a une perte de roue. Le régulateur confirme à la conductrice qu'il a activé la coupure d'urgence ainsi que la protection informatique. Il lui demande d'aller porter assistance au

conducteur. Il sollicite l'intervention de l'équipe de maintenance du Matériel Roulant pour constater s'il est possible de bouger la rame.

Le régulateur donne alors l'ordre d'évacuation. Les deux conducteurs commencent l'évacuation des passagers. La conductrice le rappelle pour l'informer qu'il y a des blessés et qu'il faut contacter les marins pompiers. Le PCC appelle les marins pompiers.

Le conducteur rappelle le régulateur par téléphone portable et lui indique que le train est évacué. Le régulateur lui demande de faire le tour de sa rame, afin de savoir quelle roue est perdue. Le conducteur l'informe alors qu'un bogie est sorti. Le régulateur appelle de nouveau l'équipe Matériel Roulant pour les prévenir. En faisant le tour de la rame, le conducteur fait des photos et les lui envoie (il s'est passé 25 minutes environ depuis le début de l'accident).

À ce moment-là, il n'y a pas d'autre incident à gérer sur le réseau. Le régulateur met en place les services partiels entre Bougainville et Castellane selon la procédure. Il a trois rames arrêtées : la première accidentée à Sainte-Marguerite, la seconde en arrière-gare à Sainte-Marguerite et une troisième à la station Perrier en voie 2. Pour cette dernière rame, il fait évacuer le train par le conducteur, puis fait évacuer et fermer la station. Puis le régulateur envoie un véhicule de service relever les trois conducteurs afin de les ramener au dépôt proche de Bougainville.

Selon lui, l'évacuation s'est bien passée. Les pompiers ont pris en charge la personne blessée.

3.2 - L'évacuation des passagers

Les témoignages recueillis indiquent que tous les passagers de la rame B14 ont été évacués à l'aide des échelles, la nature des blessures ne représentant pas une difficulté mis à part pour une cliente qui a attendu l'arrivée des secours dans la seconde voiture en compagnie de la conductrice. Le cheminement piéton à droite de la voie est de 70 centimètres de large.

Les images de la vidéoprotection de la station ont été exploitées par les enquêteurs du BEA-TT. Les constatations correspondent aux descriptions faites dans les témoignages précédents. Deux minutes après l'arrêt de la rame suite au déraillement et à la disjonction, la conductrice court vers la rame qui a déraillé, sur le platelage à droite de la voie, depuis le quai de la station. Les premiers passagers débouchent de derrière la rame trois minutes plus tard. Les pompiers seront visibles à proximité de la rame 20 minutes après le déraillement.

Au total, en environ 19 minutes et dans le calme, 143 personnes évacueront, dont deux avec des poussettes et de nombreuses personnes avec des valises.



Figure 24 : cheminement emprunté par les passagers, à droite de la voie

3.3 - Les constats au centre de supervision des réseaux

Grâce aux saisies d'écran archivées du poste de régulation (détails en annexe 2), nous constatons que, lors de l'accident du 21 décembre 2018, le régulateur voit :

- à 8:28:45, la rame est à quai en station ;
- à 8:31:20, la rame est arrêtée après la station et la ligne a disjoncté ;
- à 8:32:19, le régulateur a bien sécurisé la zone, l'énergie est coupée.

Ces archives sont conformes à la description de l'événement par les opérateurs du PCC et les conducteurs impliqués.

3.4 - Les constats sur la voie

Des repères ont été posés juste après le déraillement le long de la voie par la police judiciaire. Nous allons utiliser ces repères pour effectuer les constats sur la voie.

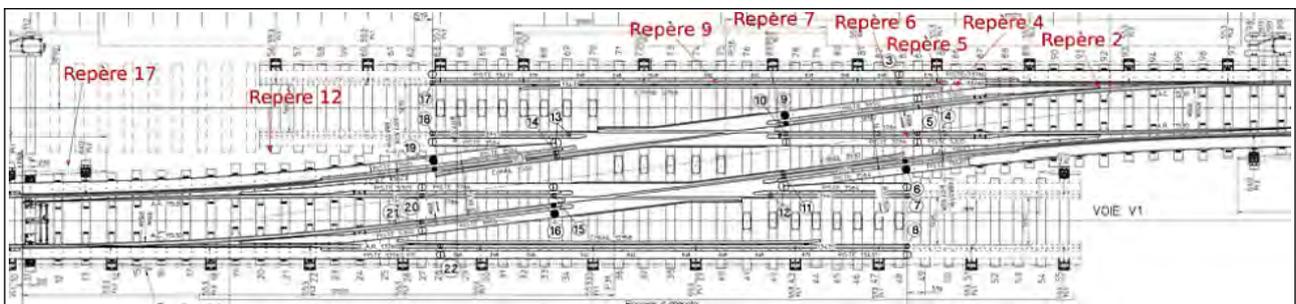


Figure 25 : schéma de la zone avec repérage des points de l'accident

L'aiguillage était bien positionné en voie directe. Après le déraillement, une fois la rame arrêtée, l'arrière de celle-ci se trouve juste à la sortie de l'aiguillage.



Figure 26 : situation de la rame et mise en place des repères

Au niveau du repère 2, on observe une déformation du contre-rail et, dans la gorge du rail, des débris émanant du graphite d'un frotteur. Au niveau du repère 3, on remarque une trace sur le contre-rail qui aurait pu être laissée par la roue fer sortie de son guidage.

Au niveau du repère 4, il y a une trace sur la piste de roulement que l'on suppose avoir été causée par la roue fer. Au repère 5, on observe un impact sur le contre-rail.



Figure 27 : présence de nombreux morceaux de graphite (repère 2), traces et impacts (repères 3, 4 et 5)

Des morceaux correspondant à la pièce constitutive du support d'un frotteur ont été retrouvés aux emplacements 1 à 5.

Au niveau des repères 6 et 7, on constate des traces de roulement de la roue fer qui a marqué le rail et les pistes, et sectionné des connexions. Au repère 8, on observe un impact entre la piste de roulement et le rail.



Figure 28 : traces de roulement (repères 6 et 7), connexions rail/rail sectionnées (repère 7) et impact (repère 8)

Au niveau du repère 9, se trouve une partie de frotteur cassé semblant présenter des traces de sillon pouvant être réalisées par une roue fer qui aurait roulé dessus.



Figure 29 : partie de frotteur cassé, entre la bande de roulement et le rail de sécurité

Au repère 12, on observe un gros impact sur la piste de roulement de la voie adjacente. La barre de guidage déformée (repère 13), alimentée en 750 volts, est entrée en contact avec la piste de roulement qui est à la masse.

Aux repères 15 et 17, on constate des traces de pneus sur la barre de guidage. Les roues du bogie déraillé semblent être montées sur la barre de guidage à cet endroit. Aucune roue n'est retrouvée désolidarisée de son bogie.

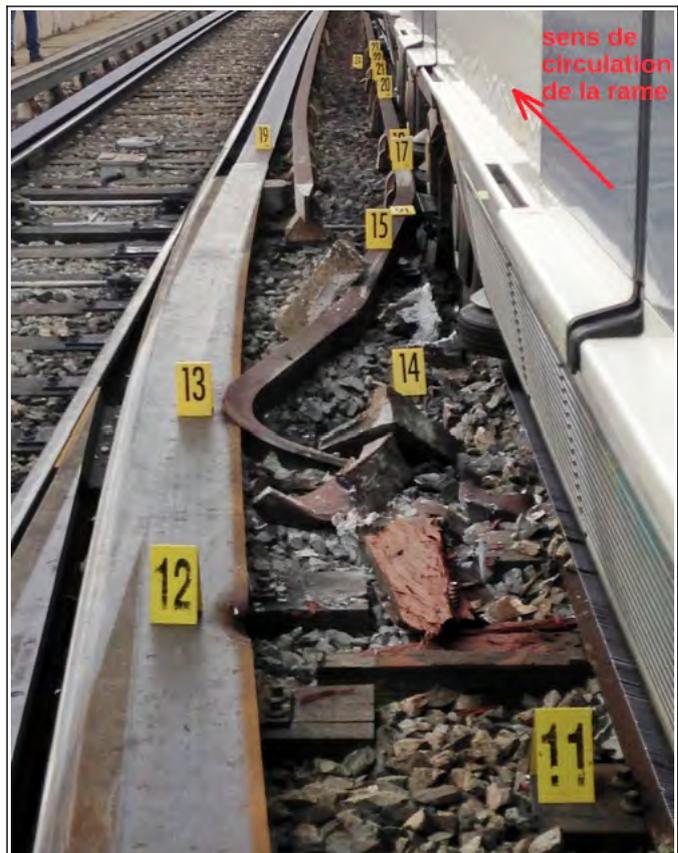


Figure 30 : dégâts matériels importants sur la voie

Enfin, au niveau des repères 27 et 28, deux pneus du bogie arrière de la motrice sans loge NB14 sont positionnés sur la barre de guidage.



Figure 31 : pneus du bogie montés sur la barre de guidage

3.5 - Les constats sur le matériel roulant

3.5.1 - Les données de l'enregistreur de bord

La représentation graphique des paramètres enregistrés de la rame accidentée le 21 décembre 2018 a été communiquée au BEA-TT.

Le relevé ci-dessous reprend les manœuvres en arrière-gare qui ont précédé le départ à Sainte-Marguerite (12/14, 14/12, 12/24, 24/22, puis départ 22/20). La vitesse sur ces manœuvres ne dépasse pas 20 km/h.

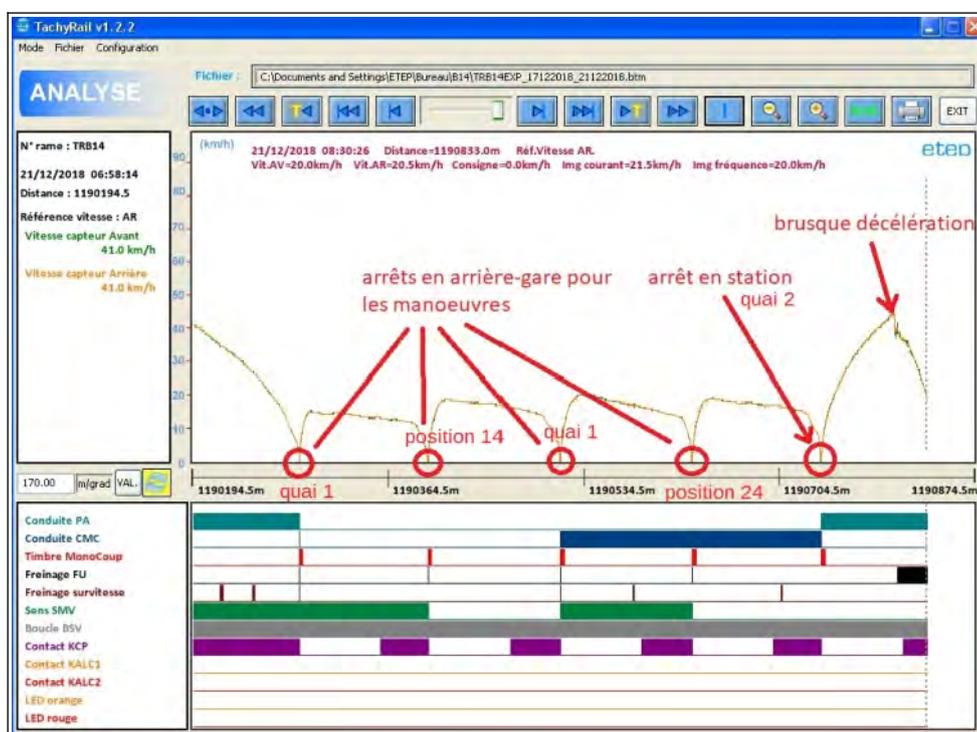


Figure 32 : vue d'écran du logiciel TachyRail, extraction des données du 21 décembre 2018 à partir de 6 h 58 de la rame B14

Le relevé suivant se concentre sur le départ de la rame à Sainte-Marguerite jusqu'à son arrêt suite au déraillement.

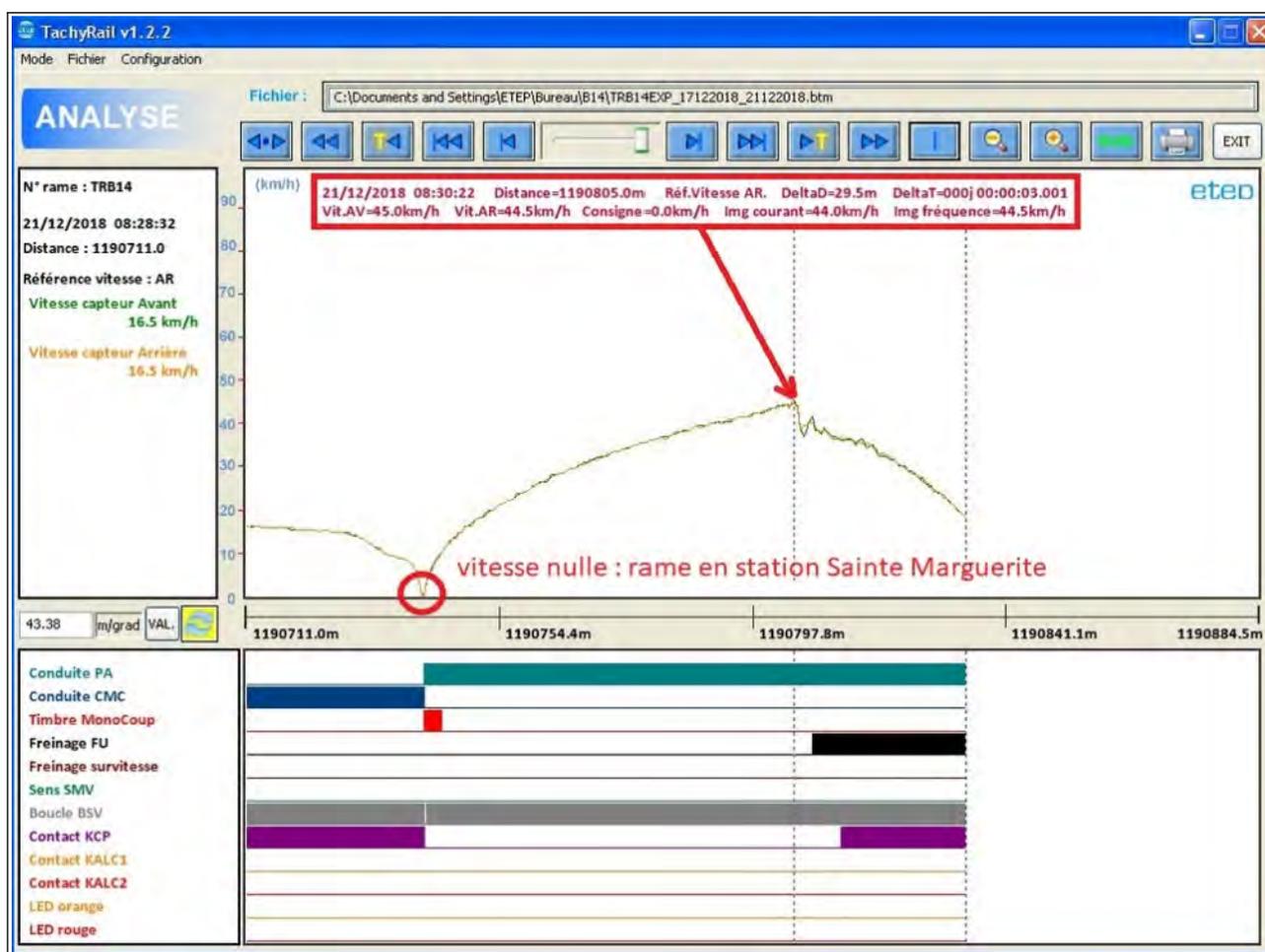


Figure 33 : vue d'écran du logiciel TachyRail, extraction des données du 21 décembre 2018 à partir de 8 h 28 de la rame B14

Au point de vitesse nulle, la rame B14 est arrêtée au quai de la station Sainte-Marguerite. Puis elle démarre et accélère pour atteindre 44 km/h. La limitation de vitesse de 50 km/h a été respectée. Ensuite, à 8 h 3 min 22 s, la vitesse diminue brusquement : le déraillement a eu lieu.

3.5.2 - Les dégâts matériels à la rame impliquée

La rame B14 est composée de la sorte :

- Motrice Impaire avec loge MB27 ;
- Remorque RB14 ;
- Motrice sans loge NB14 ;
- Motrice Paire avec loge MB28.

Les constats faits sur la motrice MB28 de la rame B14 ont permis d'identifier qu'il manquait une partie du frotteur droit du bogie arrière, à savoir le patin et un morceau du bras de fixation articulé qui s'est brisé. Il s'agit d'un frotteur négatif.

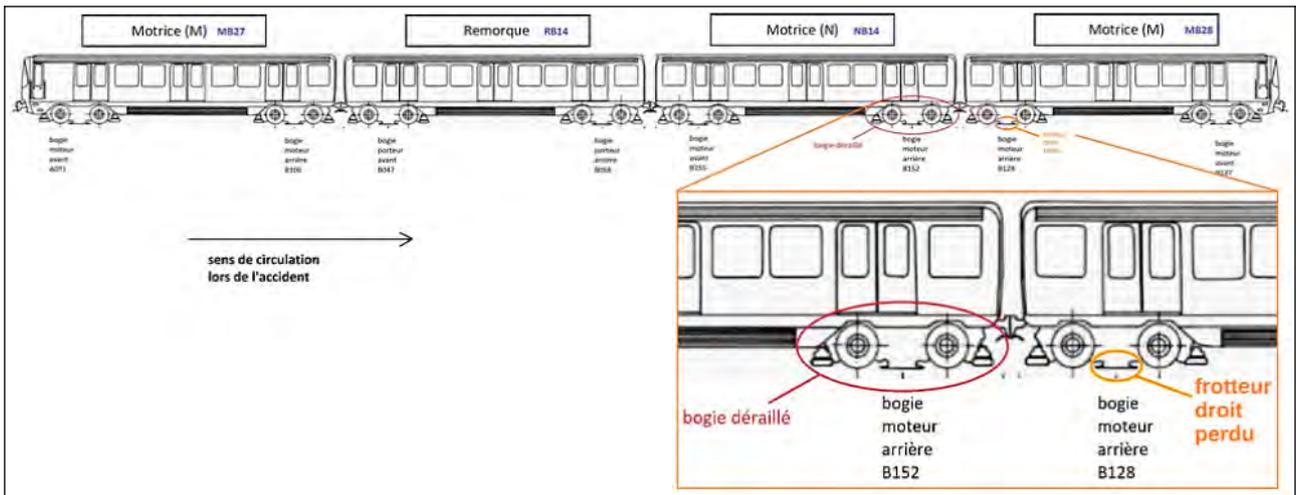


Figure 34 : schéma de la rame incriminée et zoom sur le bogie ayant perdu le frotteur (négatif) suivi du bogie ayant déraillé

Le 21 décembre 2018, le frotteur a cassé au niveau du bras (n° 10 – figure 17) et de la bielle (n° 25 – figure 17).



Figure 35 : à gauche, partie restée en place sur la rame B14 appartenant au frotteur cassé et à droite, le reste du support et de la semelle du frotteur

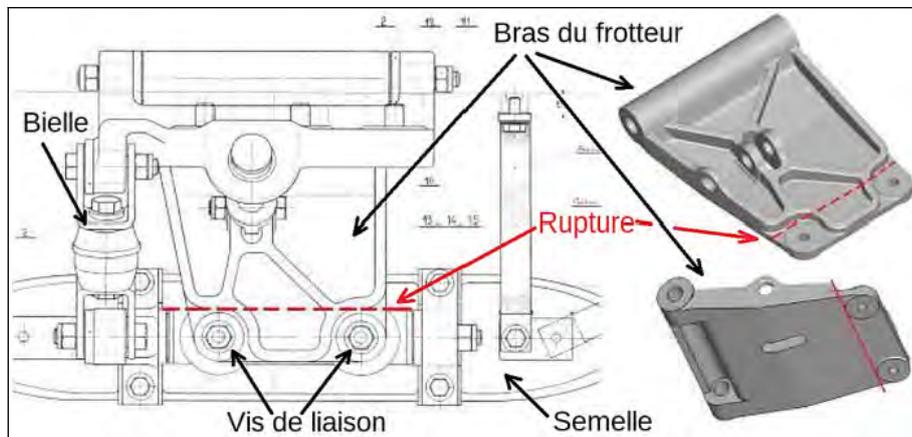


Figure 36 : localisation de la zone de rupture au niveau du bras

Ce modèle de frotteur n'existe que sur les deux lignes de métro de Marseille.

La pièce cassée du 21 décembre 2018 n'a pas d'identification, contrairement aux pièces fournies depuis 2009 qui sont marquées : la référence de la pièce, la référence du fondeur et la date de fabrication de la pièce sont désormais inscrites au moment de la fonte de la pièce. Le frotteur impliqué est donc en circulation depuis une date antérieure à 2009.

3.5.3 - Les résilles

Les résilles sont des grilles métalliques servant de faux-plafond dans les compartiments voyageurs des rames du métro marseillais. Une résille pèse environ 15 kg.

Elles sont articulées d'un côté et de l'autre, fixées par 2 vis quart de tour. Lors des différentes révisions, les équipes vérifient visuellement et par manipulation des résilles que les vis quart de tour sont correctement positionnées.

Lors de l'accident, deux résilles sont tombées : pour chacune, les deux vis quart de tour sont tombées et les deux liaisons pivot ont rompu du fait des fortes secousses lors du déraillement.



Figure 37 : résille en bon état, ouverte

3.5.4 - La maintenance du matériel roulant

Compte tenu de la perte d'un élément de la rame de métro lors de cet accident, nous avons examiné la bonne application du plan de maintenance préventive des rames de métro de Marseille. Ce plan se découpe en pas de 7 500 km.

Tous les 7 500 km, des contrôles sur les frotteurs négatifs et de masse sont prévus et incluent à chaque fois le contrôle de la présence, l'état, le fonctionnement et l'usure des semelles des frotteurs comme stipulé dans les procédures de petites révisions PR-15000 V1 et V2. Leurs articulations sont également graissées. La mobilité du support de frotteur est testée manuellement après tout passage à l'atelier, que ce soit pour du préventif ou du correctif. La maintenance de la rame B14 a été réalisée conformément au plan de maintenance. Les dernières opérations préventives et correctives réalisées sur la rame B14, et en particulier ses frotteurs, n'ont relevé aucun défaut particulier.

Tous les 600 000 km (environ 8 ans) a lieu la Grande Révision (GR) des bogies. Une GR consiste en une maintenance approfondie de l'ensemble des organes du bogie. La dernière GR a commencé au début 2017 et s'est terminée fin 2018 : elle a été réalisée par le groupe SAFRA⁷, la partie sur les frotteurs a été sous-traitée à Faiveley. Chacun des bogies de l'ensemble des rames a donc subi la Grande Révision Bogie. Plus particulièrement, le support de frotteur fait l'objet d'un démontage complet avec le changement du ressort et le relevé de l'effort de plaquage sur le rail. Ces tests du ressort ont été réalisés et post-accident, il a bien été vérifié que les frotteurs ne présentent ni

⁷ Le groupe SAFRA est structuré en quatre entreprises, dont une spécialisée en construction et rénovation de matériel de transport public.

grippage ni relâchement. Faiveley a récupéré les frotteurs en l'état, les a nettoyés, démontés entièrement, re-nettoyés manuellement et enfin a effectué un contrôle visuel avant de les remonter, de les contrôler et de les tester. Environ 1 000 frotteurs ont ainsi été traités parmi lesquels Faiveley a trouvé 9 pièces fissurées ou cassées qu'il a remplacées à neuf. Toutes les pièces cassées ont été jetées ce qui n'a pas permis de constater leur état.

Sur le bogie B128 de la motrice MB28 (cf. figure 34), les bras des frotteurs, incluant celui cassé le 21 décembre 2018, n'ont pas été remplacés lors de cette GR : les bras ne présentaient donc pas de défaut détectable à l'œil nu (fissure, choc, déformation, usure) et ils ont donc été réutilisés. Les frotteurs droit et gauche du bogie B128 ont été contrôlés et jugés conformes par Faiveley.

En bilan global de cette grande révision, Faiveley n'a pas observé de gros problème et il a remplacé les pièces d'usure ainsi que les pièces fissurées ou cassées.

3.6 - Les mesures conservatoires prises après le 21 décembre 2018

Suite à l'accident, l'exploitant a mis en place les mesures conservatoires d'exploitation suivantes :

- vitesse limitée à 60 km/h (au lieu de 80 km/h) entre Castellane et Rond-Point du Prado soit les trois stations avant Sainte-Marguerite. Cette mesure a été levée fin janvier 2019.
- vitesse limitée à 25 km/h en entrée de Sainte-Marguerite pour le passage de l'aiguille 11/21 (parcours de l'itinéraire 10/12).
- zone de ralentissement au départ de la station Sainte-Marguerite (10 km/h) au passage de l'aiguille 11/21 puis la vitesse a été remontée et limitée à 25 km/h.
- vitesse limitée à 25 km/h sur toutes les zones de manœuvre lors de la mise en place d'un Service Partiel⁸.
- dans un premier temps, interdiction d'envoyer un train sur la position 14. Puis, suite au rechargement de l'appareil de voie, reprise des manœuvres en direction et en provenance de la position 14.
- lors des manœuvres 14/12 et 12/14 à Sainte-Marguerite, visite de la zone de manœuvre arrière-gare et avant-gare par un agent pour vérification sur la zone d'aiguilles de la présence éventuelle de supports de frotteurs négatifs tombés en voie.
- après chaque détection par le test TPF_G, réforme immédiate de la rame, avec un contrôle par le service Matériel Roulant. De plus, suite à cette détection, la zone de Sainte-Marguerite est vérifiée par un agent.

3.7 - Conclusion sur les constats immédiats

La cause du déraillement de la rame est la perte, dans un cœur d'aiguillage, d'une partie d'un frotteur négatif du bogie arrière B128 de la motrice MB28. La semelle du frotteur est tombée et s'est coincée dans l'aiguillage. Elle a fait office de rampe sur laquelle la roue fer du bogie arrière B152 de la motrice NB14 a roulé, provoquant la sortie du rail du bogie et donc son déraillement.

Le bogie B152 a percuté la barre latérale d'alimentation électrique, choc qui a pu entraîner la rotation du moteur, et a provoqué la disjonction de l'alimentation électrique et de ce fait, l'arrêt automatique de la rame. La rame ne porte aucune trace d'incendie. Le

⁸ Service Partiel : exploitation uniquement sur un tronçon de la ligne et retournement des rames en ligne sur un aiguillage pour repartir dans l'autre sens.

bruit d'explosion provient probablement du court-circuit et le dégagement de fumée, du choc du bogie avec la barre de guidage et de la poussière générée par le ballast qui a été fortement remué.

La perte de cette pièce en voie est due à la casse du bras du frotteur négatif. Cette casse a, en première approche, été provoquée auparavant par un choc appliqué au frotteur.

L'ensemble des constats immédiats nous amène à concentrer nos investigations sur la recherche du mode de casse du bras du frotteur (résistance et matière) ainsi que sur la recherche des lieux potentiels de casse (voie courante ou aiguillages).

4 - Compte rendu des investigations sur la rupture du frotteur

4.1 - Le retour d'expérience sur ce type d'événement

4.1.1 - L'accidentologie sur le métro marseillais sur un déraillement et/ou perte de frotteurs

Le BEA-TT a consulté la base de données du STRMTG, renseignée par les exploitants et regroupant tous les événements apparus sur les réseaux de métro. Aucun accident concernant un déraillement ou une perte d'un frotteur ou d'un autre composant de la rame n'y est recensé pour le réseau marseillais.

Le BEA-TT a également consulté les rapports annuels sur la sécurité de la RTM depuis 2007, dans lesquels les accidents et les faits techniques notables sont listés et analysés. En 2011, une perte de frotteurs négatifs des rames est identifiée et tracée par l'exploitant : suite à un décontrôle d'une aiguille, un frotteur négatif d'une rame est retrouvé sur la voie, empêchant le basculement de l'appareil de voie. Le rapport annuel mentionne : « *Après vérification, il s'avère que le frotteur a été perdu par la rame B02 qui venait de déclencher une alarme au test TPFPG de La Rose. Il n'y a pas eu de déclenchement de la procédure d'alerte. Cet événement est générique d'une série de pertes frotteurs et de dégâts occasionnés à la voie* ». L'événement a été classé notable sur demande du STRMTG le 18 novembre 2011. Cet événement n'a pas alerté l'exploitant ni déclenché d'action. C'est le cumul des pertes de frotteurs sur cette année 2011 dues à une usure anormale des semelles qui, comme on le verra plus loin, engendrera des réflexions et des actions correctives.

Au total, il apparaît que des casses de bras de frotteurs se produisaient depuis toujours à l'échelle de quelques unités mais que celles-ci n'étaient ni tracées, ni traitées comme des événements de sécurité.

Il est à noter que plusieurs ruptures de bras de frotteurs se sont produites après le 21 décembre 2018, à raison d'environ une par mois (cf. figure 47).

4.1.2 - Les investigations sur d'autres matériels roulants

Des casses de frotteurs ont été constatées sur d'autres réseaux en France. Cependant, la conception de l'équipement installé sur le matériel roulant de Marseille est unique (matière, forme du moulage) et de ce fait, aucun parallèle ne peut être tiré d'un autre modèle de frotteur.

4.2 - L'étude d'un premier mode de casse du frotteur

Après la casse du frotteur le 21 décembre 2018, la RTM a lancé des expertises internes et externes pour comprendre l'origine de cette casse. D'autres casses ont suivi et ont permis de compléter les analyses. Nous verrons que la RTM a demandé à un laboratoire de recherche de réaliser des analyses et essais, et à une société d'essais de réaliser une étude du comportement dynamique des frotteurs in situ. Enfin, elle a demandé au constructeur des frotteurs Faiveley d'étudier mécaniquement la rupture des bras des frotteurs.

4.2.1 - Les vérifications sur la matière de la pièce cassée

Le bras des frotteurs (n° 10 – figure 17) doit être fabriqué avec une nuance spécifique d'aluminium, définie par la norme NF A 57-702 désormais obsolète et remplacée par l'ISO 3522:2007 « Aluminium et alliages d'aluminium – Pièces moulées – Composition chimique et caractéristiques mécaniques ». Deux supports cassés ont été envoyés pour analyse (chimique et optique) à un laboratoire de recherche. Mise à part une différence négligeable de matière, les caractéristiques chimiques et mécaniques se sont révélées conformes aux attendus de la norme.

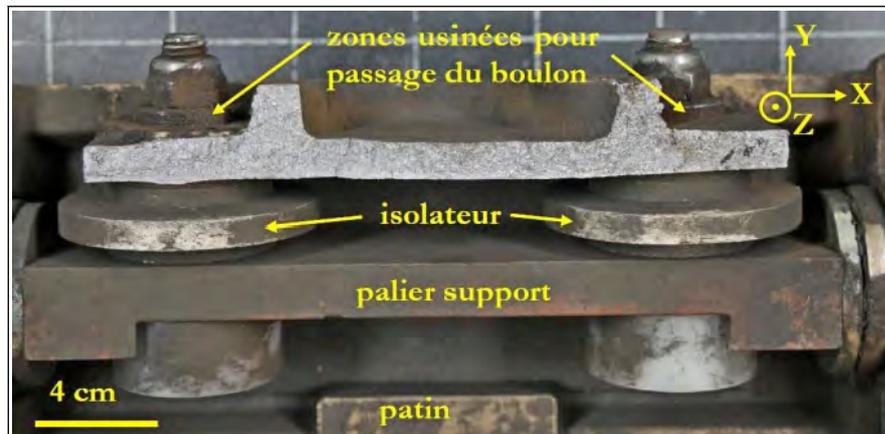


Figure 38 : faciès de rupture d'un support cassé de frotteur

De plus, l'analyse d'un faciès de rupture d'une des pièces et une étude métallographique comparative des deux pièces ont été commandées. Il en ressort que :

- la rupture observée est de type fragile donc a lieu de façon instantanée ;
- elle est due à un effort supérieur à la résistance du matériau utilisé ;
- aucune trace de fissure ou d'amorce de rupture n'a été détectée ;
- aucune trace de fatigue n'a été détectée ;
- la pièce se serait rompue du bas vers le haut.

4.2.2 - La mesure *in situ* des vibrations en voie des frotteurs

La RTM a demandé à la société d'essais Eurailtest⁹ une étude du comportement dynamique des frotteurs sur une rame en mouvement et une cartographie des défauts d'interaction entre frotteurs et infrastructure. Pour ce faire, Eurailtest a instrumenté les frotteurs avec des accéléromètres afin de mesurer les chocs en circulation, et avec des caméras pour observer les mouvements des frotteurs. Deux séries de relevés ont été effectuées pour chaque voie (V1 et V2) de chaque ligne (M1 et M2), à vitesse d'exploitation. Cela a permis de caractériser les accélérations, et donc les forces, que subissent les frotteurs au cours de l'exploitation.

⁹ Eurailtest est un groupement d'intérêt économique spécialisé en essais relatifs aux systèmes et sous-systèmes ferroviaires lourds et urbains, créé par la SNCF et la RATP en 1999.



**Figure 39 : instrumentation des frotteurs négatifs
accéléromètre et caméra rapide et éclairage**

Sur les deux lignes M1 et M2, les séquences vidéo mettent en évidence quelques sauts de frotteurs au niveau des appareils de voie, ainsi que sur des joints isolants¹⁰. L'étude fournit une liste des événements particuliers survenus avec une catégorisation du pic d'accélération. Il y a davantage d'événements au kilomètre sur M2 que sur M1 et la plupart sont situés au niveau d'appareils de voie. Il n'y a pas de différence notable entre les deux files de rail de la même voie.

4.2.3 - Les contraintes auxquelles les frotteurs peuvent résister

La RTM a demandé à Faiveley de modéliser la rupture du bras du frotteur afin de déterminer comment ce dernier peut casser, en évaluant la réponse dynamique du frotteur lorsqu'il est soumis aux accélérations mesurées par les accéléromètres et aux mouvements observés par les acquisitions vidéo ci-dessus. Suite à leurs investigations et calculs, et avec l'hypothèse du laboratoire selon laquelle les bras se rompent de bas en haut, les conclusions sont les suivantes :

- les contraintes calculées en statique et en dynamique ne permettent pas d'obtenir le niveau de contrainte suffisant pour rompre ou endommager le bras : la contrainte dans la zone de rupture est très inférieure à la résistance mécanique ;
- il n'y a pas de chocs périodiques importants, ce qui signifie que la rupture est due à un événement ponctuel ;
- le calcul en fatigue montre une durée de vie du bras infinie ;
- une accélération purement verticale n'est pas suffisante pour expliquer la rupture ;

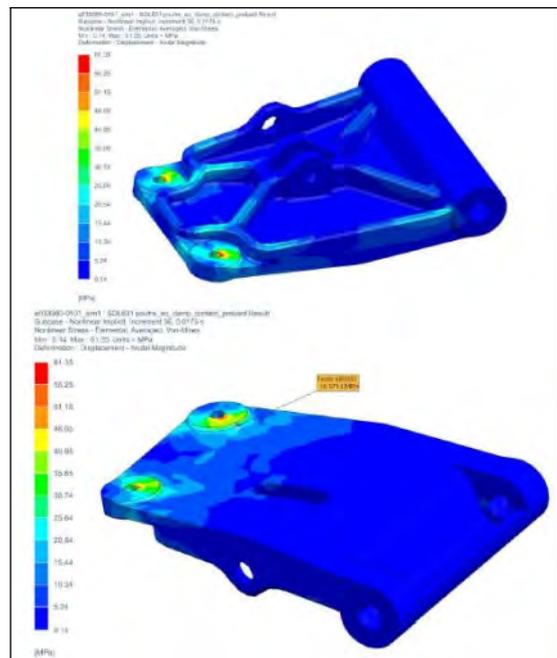


Figure 40 : contraintes calculées en dynamique

- la mise en charge sur banc d'essai du bras jusqu'à la rupture en quasi-statique ne montre pas la même zone de rupture que celle trouvée en pratique (voir figure ci-après).

¹⁰ Un joint isolant de rails est composé d'un intercalaire en matière isolante, de deux éclisses isolantes, de rondelles et d'écrous.

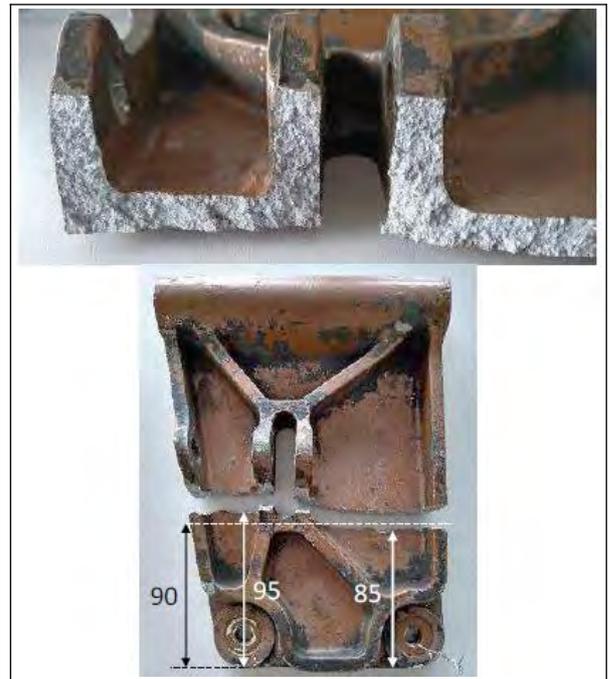
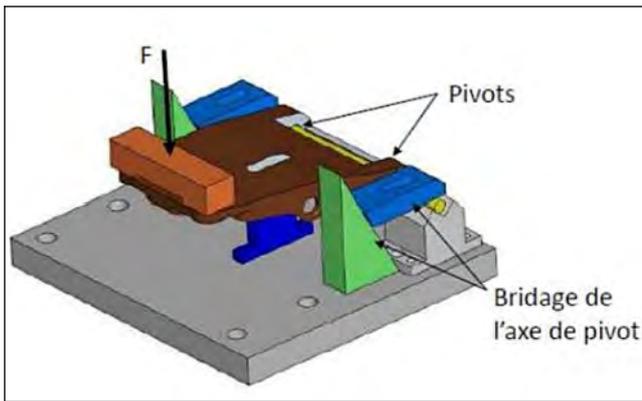


Figure 41 : à gauche, le principe des essais statiques réalisés et à droite, les résultats de l'essai de rupture

Ainsi, les études présentées ci-dessus ne permettent pas d'expliquer la rupture des bras des frotteurs selon le mode de casse observé. L'application de la force n'est pas celle supposée puis modélisée dans l'analyse, ni celle mise en œuvre dans l'essai ci-dessus.

4.3 - L'étude d'un second mode de casse du frotteur

Depuis l'accident, les ruptures régulières de bras de frotteurs présentent des faciès de casse similaires entre eux et différents de ceux de l'essai ci-dessus.



Figure 42 : faciès de rupture du bras du frotteur cassé le 21 décembre 2018

La RTM a essayé sans succès de reproduire la morphologie de rupture par des essais en mettant en compression un morceau de ballast ou une pièce métallique entre le bras et la partie fixée au train.

La RTM a alors demandé à la RATP une expertise, que nous allons présenter ci-après. De nouveaux essais de casse ont été réalisés en laboratoire et en ligne.

4.3.1 - La recherche du dénominateur commun entre les frotteurs cassés

Les frotteurs négatifs et de masse sont régulièrement changés par l'exploitant, principalement pour des raisons d'usure de la semelle, due à son frottement sur le rail. Avant 2018, la RTM perd quelques frotteurs par an, c'est une pièce considérée comme fragile. Habituellement, ces frotteurs tombent à côté de la voie. Il n'y a pas d'analyse particulière réalisée à la suite de ces chutes.

En 2011, l'exploitant avait toutefois observé une nette augmentation des remplacements par usure des frotteurs. Les semelles cassaient du fait d'une usure anormale. La RTM a alors mené une étude avec Eurailtest sur l'usure prématurée de frotteurs, afin d'en établir les causes. Le plan d'actions qui en a découlé porte principalement sur le renforcement de la surveillance des joints isolants, la recherche d'écarts anormaux sur la voie, la détection plus fine des frotteurs en limite d'usure, la mise en place sur les trains de quelques frotteurs en fonte afin de décaper le rail et une reprise des réglages de la voie et des aiguillages. À la suite de ces mesures, l'usure prématurée disparaît entre 2012 et 2014 (voir figure ci-dessous). La RTM arrête le suivi quand le phénomène d'usure anormale disparaît.

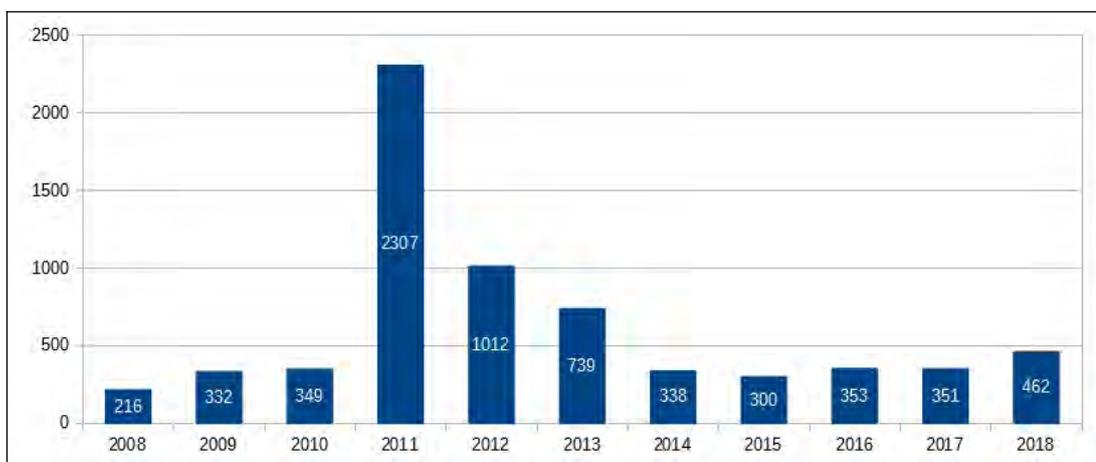


Figure 43 : par année, nombre de frotteurs sortis de l'exploitation pour contrôle en atelier

Les frotteurs sont examinés en atelier lors des actions de maintenance curative ou préventive. En 2018, le remplacement des 462 frotteurs correspond à des usures de la semelle mais aussi à l'augmentation du nombre de frotteurs remplacés en préventif, du fait de la Grande Révision Bogie (2017-2018).

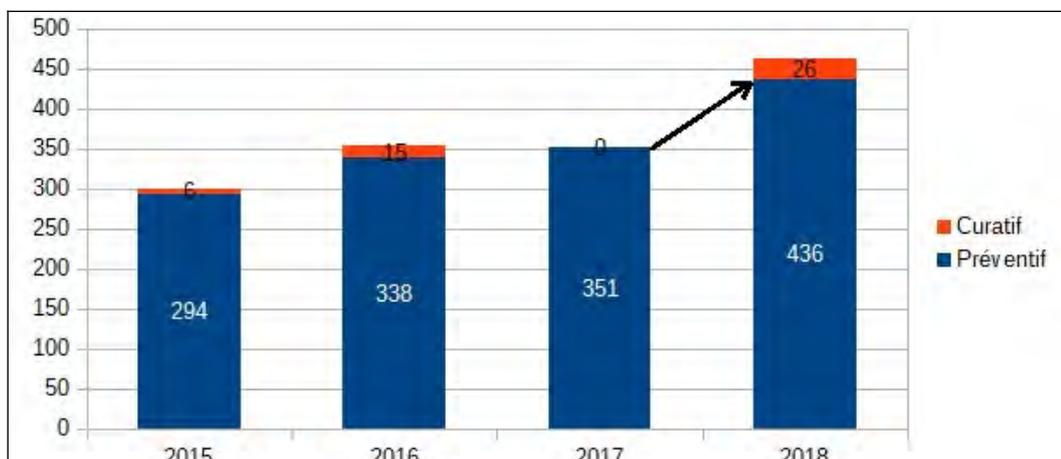


Figure 44 : répartition annuelle des raisons de la visite en atelier des frotteurs

Un autre indicateur est le nombre annuel de réformes de trains suite à déclenchement du TPF. Sur les 138 réformes de 2014, seulement 19 rames présentaient une usure réelle nécessitant un changement de frotteur.

Pour expliquer cet écart entre nombre de réformes et nombre d'usures réelles, il semblerait que les TPF, dont les boîtiers sont installés en extérieur, soient sensibles aux conditions climatiques. Un réchauffeur a été installé dans le boîtier à Bougainville fin 2014 pour corriger cette difficulté.

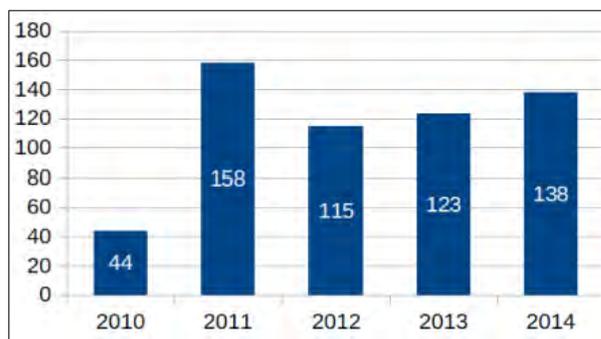


Figure 45 : nombre de réformes de trains suite à déclenchement du TPF (indicateur abandonné par la RTM en 2014)

Les actions mises en œuvre ont alors été jugées satisfaisantes par la RTM par rapport au problème de sensibilité du TPF.

Pour identifier le nombre de casses constatées, l'exploitant a analysé les travaux réalisés suite à signalement du TPF. Du 1^{er} janvier 2016 au 10 janvier 2019, les travaux réalisés sont :

Nature des travaux réalisés	2016	2017	2018
Nettoyage	30	30	36
Remplacement Tresses	10	2	4
Remplacement frotteurs et éventuellement d'autres pièces mais sans remplacement du support	6	5	17
Remplacement du support (a priori sans rupture)	1	1	4
Remplacement du Support suite à une rupture	0	1	6

Figure 46 : répartition par leur nature des travaux réalisés

Le nombre de casses de bras de frotteurs a fortement augmenté à partir de 2018, passant de zéro ou une casse par an à 6 en 2018. Les casses sont différentes de celles de 2011 (casses de semelles du fait d'une usure anormale). À partir de la casse du 21 décembre 2018 ayant conduit au déraillement, la RTM a analysé chaque casse ultérieure, et rétrospectivement la RTM a pu retrouver certaines données sur les casses de 2018.

Rame	Date	Voiture / Bogie	N° de Ligne	Position	Frotteur retrouvé	Manœuvres identifiées	Zone	Commentaires
A16	11/02/2018	R / A001	3	?	sortie CdV44 à LRM (la veille sur M2)			
A03	03/05/2018	R / B049	3	?	23 SMA / CdV14 STM	12-14-12-24-22	SMA	
A04	21/09/2018	R / A011	3	?	CdV14 STM	12-14-12-24-22	SMA	
B09	13/12/2018	N / B157	5	?	13 SMA / sortie R3C à Zoccola			
B07	17/12/2018	I / B175	2	Ext	13 SMA / sortie 44 à LRM (la veille sur M2)			
B14	21/12/2018	P / B128	7	Ext	21 SMA / sortie 14 STM	12-14-12-24-22	SMA	
A08	07/01/2019	R / A025	3	Ext	sortie 14 STM		SMA	
B12	10/01/2019	I / B193	2	Int	Sur la rame / suite TPF	Atelier		
A20	24/01/2019	R / B056	4	Int	Voie R2 / Zoccola	A-42-16-R2	ZOC	
A16	23/03/2019	P	7	Ext	21 SMA	12-14-12-24-22	SMA	
A16	10/05/2019	I	2	Ext	21 SMA	12-14-12-24-22	SMA	Casse suite essais
A16	22/05/2019	R	3	Ext	21 SMA	12-14-12-24-22	SMA	Casse suite essais
B05	12/07/2019	N	6	Int	91A	A-42-16-R3	ZOC	
B12	16/08/2019	N	5	Int	23 Boug	Essais Gèze	ZOC	Casse suite essais
A17	17/08/2019	R	4	Int	Sur la rame	Essais Gèze	ZOC	Casse suite essais
A18	05/09/2019	R	3	Int	32A	A-42-16-R3	ZOC	

Figure 47 : liste des casses apparues depuis 2018 jusqu'en septembre 2019

Aucun scénario type ne ressort. Les frotteurs sont retrouvés en majorité à Sainte-Marguerite pour moitié dans l'AdV 21, à l'issue de diverses manœuvres (l'itinéraire 12-14-12-24-22 ressort). Les frotteurs cassés proviennent de diverses voitures (pour moitié de la remorque), de diverses lignes d'essieux, avec des positions variées par rapport à la circulation de la rame (extérieur ou intérieur).

Deux frotteurs sont retrouvés sur leur rame avec le bras (n° 10 – figure 17) cassé, maintenus par le palier (n° 24 – figure 17) et sa bielle de maintien (n° 25 – figure 17). Cette situation sera étudiée plus en détail dans le paragraphe suivant.

Les pièces cassées ne présentent pas de marquage, elles ne sont donc a priori pas récentes. Elles ne sont pas suivies spécifiquement par leur numéro de matricule dans la GMAO de la RTM : les frotteurs sont associés à leur bogie qui lui, est identifié.

4.3.2 - L'identification du mode de rupture des frotteurs

Une expertise technique confiée par la RTM à la RATP confirme que **les bras cassés en ligne présentent un faciès et une morphologie de rupture identiques.**

Plus spécifiquement, six frotteurs négatifs tombés sur la voie ou ayant eu un bras cassé présentent tous un sillon marqué au même endroit : extérieur au train, côté tresse et parallèle à la voie (voir illustrations ci-contre).

Le sillon n'est pas dû à la chute du frotteur sur la voie ou au roulement d'un train sur le frotteur. La comparaison avec les autres frotteurs réformés non tombés sur les voies montre que ceux-ci n'ont pas de sillon de ce type.

Ce sillon est consécutif à une interférence anormale avec la voie, certainement **la trace d'un choc sur la semelle du frotteur par un composant de la voie.** Ce composant reste à identifier.



Figure 48 : sillons sur des frotteurs ayant cassé

L'observation d'autres pièces dans l'atelier de la RTM, dont des pièces rebutées, et l'analyse des rapports d'expertise remettent en cause l'hypothèse de la rupture du bas vers le haut, objet de la première piste de recherche.

La RATP a approfondi un cas particulier : celui d'un train retrouvé en atelier sur fosse d'entretien avec un bras rompu et un frotteur maintenu en position et donc solidaire au train par l'intermédiaire de la bielle de maintien (n° 25 – figure 17). La sous-face de ce bras montre des marques de vis de liaison (n° 28 – figure 17) entre la semelle (n° 27 – figure 17) et le bras (n° 10 – figure 17), ce qui signifie que le bras, poussé par son ressort (n° 6 – figure 17), est venu se positionner au-dessus de la semelle. L'observation des autres bras cassés pour lesquels les frotteurs étaient tombés en voie font apparaître ces mêmes marques de vis. Cela indique qu'il y a eu un maintien du frotteur puis une perte ultérieure en ligne provoquée par une dynamique ou des chocs autres. **Le frotteur ne tombe pas nécessairement à l'endroit du choc initial.**

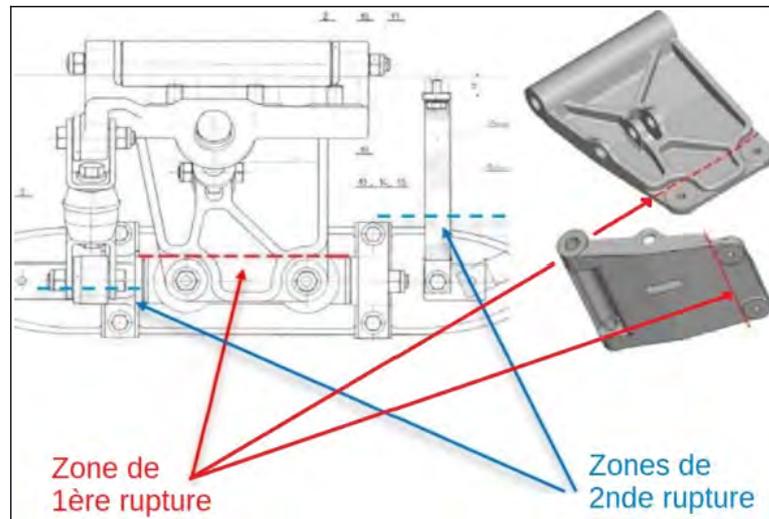


Figure 49 : la première rupture a lieu sur le bras du frotteur (n° 10 – figure 17) et la seconde rupture sur la bielle (n° 25 – figure 17) et la tresse (n° 29 – figure 17)

L'observation d'une amorce de rupture sur le dessus du bras d'un autre frotteur partiellement cassé et le marquage dissymétrique des trous de passage des vis de maintien du frotteur par le filetage des vis indiquent que, sur cette pièce, **la rupture a été initiée** non pas du bas vers le haut mais **du haut vers le bas**, et **par un couple** et non par un effort vertical.



Figure 50 : bras de frotteur partiellement cassé et zoom sur l'amorce de fissure derrière les bossages

En conclusion, l'observation d'un sillon sur les frotteurs tombés et les signes de rupture du haut vers le bas orientent vers l'hypothèse d'une nouvelle cinématique de rupture qui est la suivante : **un choc latéral sur la semelle du frotteur (marque du sillon) soumet le bras à un couple qui lui est appliqué par l'intermédiaire des vis de maintien du frotteur, se traduisant par une rupture en flexion du bras autour d'un axe horizontal**. Le bras se rompt de manière fragile à partir de derrière les bossages.

Les schémas ci-dessous permettent d'illustrer l'impact sur la semelle ainsi que le couple de flexion appliqué au bras.

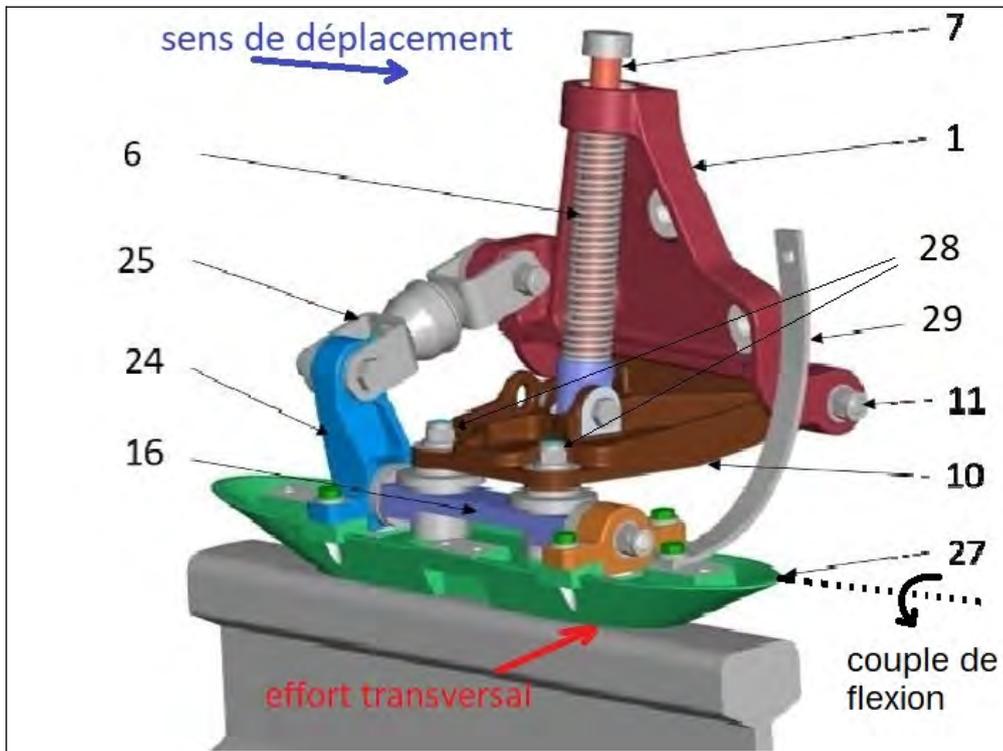


Figure 51 : localisation du choc latéral sur la semelle

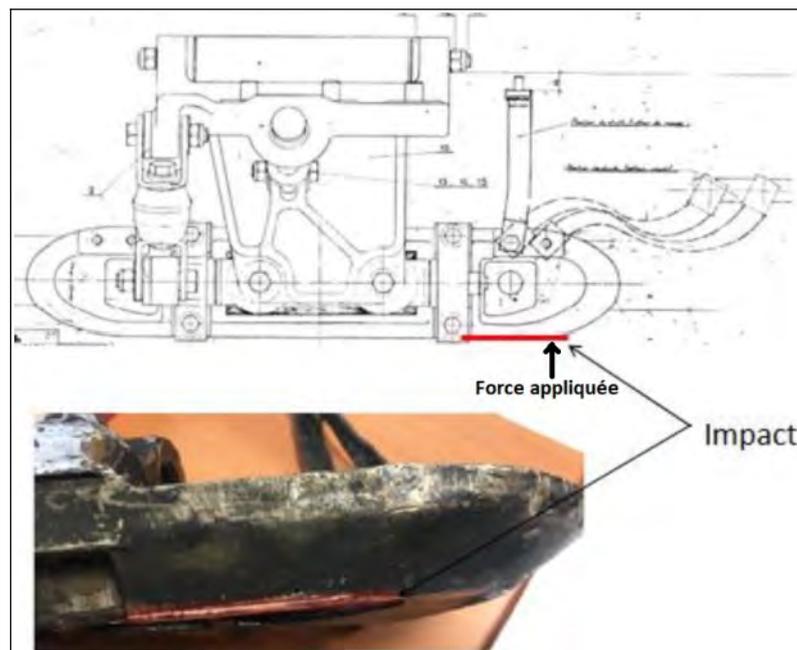


Figure 52 : force appliquée à la semelle et sillon d'impact

4.3.3 - La vérification de la casse par modélisation et par essais

Le scénario de rupture du bras du frotteur par application d'une force latérale, et donc d'un couple de flexion, a été vérifié par une modélisation aux éléments finis réalisée par Faiveley. Ce scénario a ensuite été vérifié par un premier essai physique conduit par Faiveley et un second réalisé en atelier par la RTM.

Modélisation aux éléments finis du bras

Par une modélisation aux éléments finis, la zone de rupture est bien identifiée comme étant derrière les bossages. Le couple à appliquer sur le bras pour arriver à la rupture est calculé à 417 N m. Le STRMTG avait parallèlement déterminé l'effort latéral pouvant conduire à la ruine de l'ordre de 550 daN et le moment de flexion dans la section rompue à 240 N m. Grâce à un essai de rupture, la RATP avait initialement estimé le couple à une valeur entre 250 et 300 N m .

Ces valeurs sont, en ordre de grandeur, comparables à celles de la modélisation de Faiveley.

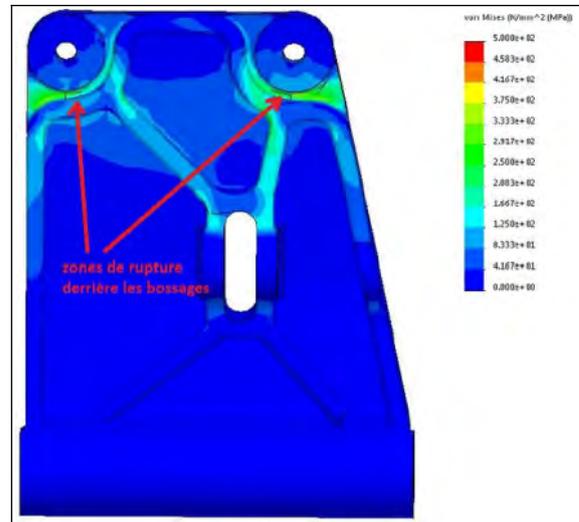


Figure 53 : modélisation aux éléments finis du bras (n° 10 – figure 17)

Essais de rupture des bras en quasi-statique réalisés par Faiveley

L'objectif des essais est de confirmer le scénario de rupture et de comprendre le sens de rupture. Les essais ont été réalisés avec un bras ancien et un bras neuf.

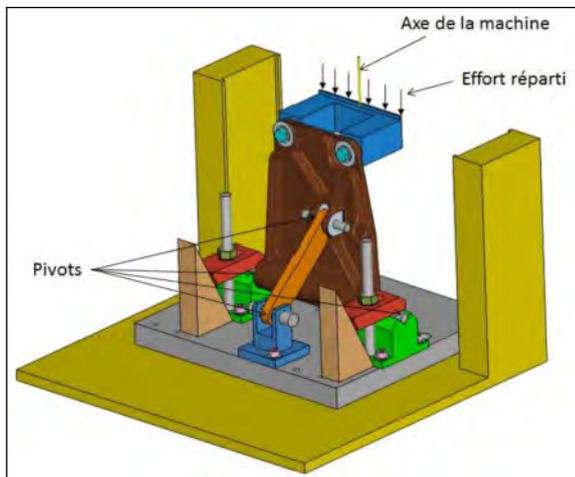


Figure 54 : schéma de l'essai par Faiveley



Figure 55 : zone de rupture obtenue par essai, comparée à celle trouvée en service

L'emplacement et la forme des fissures obtenues sont très similaires entre les essais et les bras cassés en exploitation. L'effort nécessaire lors de l'essai de rupture du bras ancien est de 486 N m et de 573 N m pour le bras neuf. Le faciès de la rupture constatée en laboratoire est identique à celui des casses en ligne.

Faiveley conclut que :

- la matière des bras ancien et nouveau est conforme au requis de la spécification d'origine en termes de résistance mécanique ;

- la matière du nouveau bras présente de meilleures caractéristiques mécaniques que celles de l'ancien bras ;
- les zones de ruptures obtenues par essais correspondent à celles observées en service ;
- les essais réalisés confirment le second scénario de rupture des bras : rupture derrière les bossages, se produisant du haut vers le bas.

Essai de rupture d'un bras de frotteur réalisé en atelier RTM

La RTM a également voulu comparer la résistance entre un bras neuf (fabrication après 2016, jamais utilisé) et un bras ancien (fabrication antérieure à 2006, temps d'utilisation inconnu), par un essai de rupture d'un bras de frotteur avec application d'un couple selon le second scénario. Le couple est appliqué à l'aide d'une « clé à griffe avec peson ».

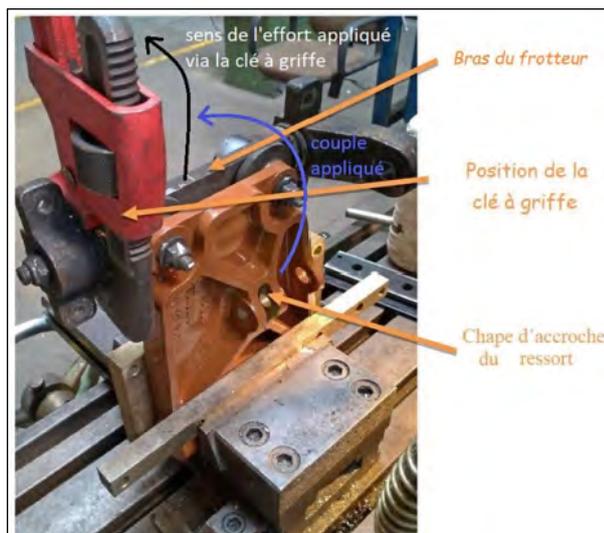


Figure 56 : mise en place de la clé à griffe avec peson sur le bras testé



Figure 57 : a) résultat de l'essai de rupture en atelier d'un bras de frotteur et b) comparaison du résultat avec un bras de frotteur cassé en ligne

Cet essai par la RTM reproduit la même morphologie et le même faciès de rupture que les bras cassés en ligne. Les ruptures se sont produites autour des bossages. Les zones de rupture sont conformes aux simulations et essais de Faiveley ci-dessus.

Cet essai conforte l'hypothèse du scénario de rupture du frotteur par heurt contre un obstacle de voie sur la face latérale de l'avant de la semelle du frotteur, du côté extérieur de la voie. La force s'exerce perpendiculairement au sens de circulation. Cette force résulte du choc latéral anormal du frotteur sur un élément de voie, dont l'origine reste à déterminer.

4.4 - L'identification des éléments de voie susceptibles de causer la rupture du frotteur

Les investigations ont ensuite été menées afin d'identifier l'élément de voie pouvant être à l'origine de la casse du bras. La connaissance de l'existence d'un couple appliqué sur le bras du frotteur a permis d'approfondir les analyses sur un certain type de défauts de voie, à savoir sur les contre-rails d'aiguillages et sur l'usure des « pattes de lièvre » des aiguillages (voir plus loin la définition de ces éléments de voie).

Le fabricant d'aiguillages Vossloh a également réalisé une étude approfondie sur l'inscription des frotteurs dans le type d'appareils de voie utilisés à Marseille.

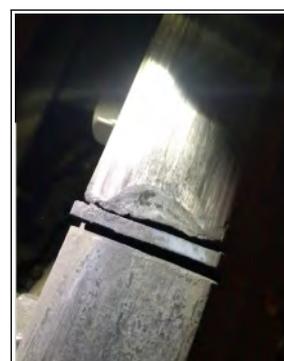
4.4.1 - Les vérifications sur la voie

Le contrôle des appareils de voie est réalisé par la RTM selon le plan de maintenance préventif et des cycles bien définis. Un cycle de contrôle est déterminé pour chacun des composants de la voie (appareils de voie, joints et appareils de dilatation de rails et de pistes, barres de guidage, attaches...). À cela s'ajoute un contrôle visuel global de la voie effectué toutes les neuf semaines. Les différents appareils de voie, notamment l'appareil de voie 13 à Sainte-Marguerite, ont bien été contrôlés par la RTM et corrigés le cas échéant.

Afin d'identifier d'éventuels défauts sur la voie expliquant la casse du bras du frotteur, une expertise plus poussée de la voie de la ligne M2 a été réalisée par la Direction Maintenance Installations Techniques de la RTM : parcours de voie, inspections visuelles détaillées, contrôles des appareils de voie, contrôles de la planéité des joints, contrôles de géométrie. Dans l'ensemble, les contrôles réalisés ont révélé une situation conforme.

Toutefois, dans la zone de manœuvre de Sainte-Marguerite, il a été constaté des défauts incluant le matage (déformation de la matière par chocs) de rail aux joints, des défauts de planéité des joints et des soudures aluminothermiques, une usure anormale sur le cœur de l'aiguillage 23 et un reflux de métal vers l'intérieur de la voie dans l'aiguillage 13. Aucun de ces défauts pris isolément n'est toutefois apparu comme étant à l'origine de la casse des frotteurs. Des actions correctives immédiates ont été engagées pour corriger ces défauts.

Figure 58 : matage du rail



4.4.2 - Première hypothèse explorée : le choc du frotteur sur les contre-rails

La RTM a réalisé une cartographie des frotteurs tombés sur les voies. Aucun frotteur n'est tombé en voie principale. Les chutes se font sur les deux extrémités hors exploitation de la ligne 2, là où les rayons de courbure des appareils de voie sont les plus faibles (Zoccola et La Rose). Les deux files de voie sont concernées. En considérant que le choc ne se produit pas forcément sur le lieu de découverte des frotteurs, la recherche des lieux des chocs latéraux sur les voies a été élargie. Les sillons communs à tous les frotteurs tombés (cf. § 4.3.2) orientent les recherches vers des arêtes vives ou des éléments saillants des appareils de voie.

Au cours de cette recherche, des constats sur site ont permis d'observer des déformations au niveau des contre-rails d'aiguillage.

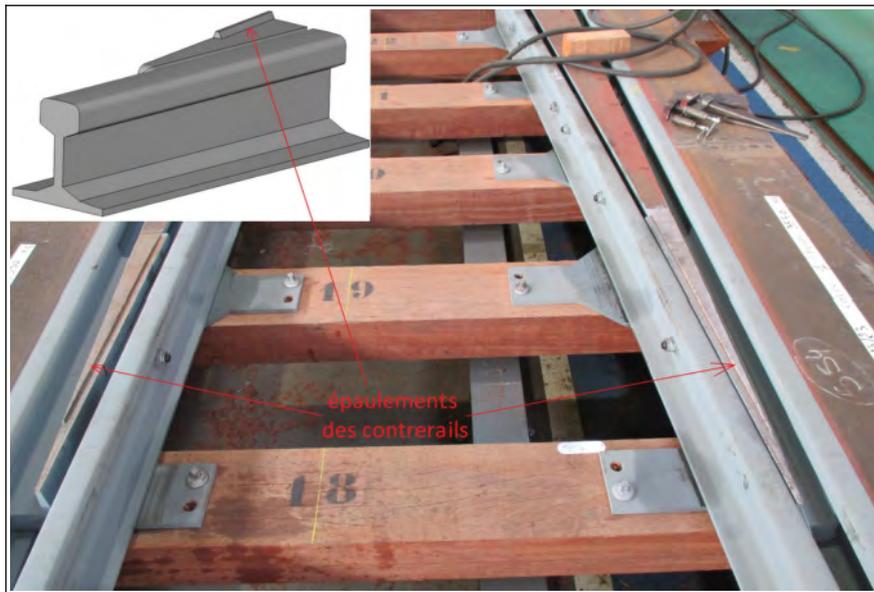


Figure 59 : appareil de voie 13 de Sainte-Marguerite, neuf, en fin de son montage dans l'usine de Vossloh (photo de 2015)

Sur le métro marseillais, des cales sont intégrées aux contre-rails. Ces cales, également appelées épaulements des contre-rails de l'aiguillage, présentent lors des observations in situ un aspect saillant sur la plupart des appareils de voie des zones de garage et d'arrière-gare de Bougainville et de Zoccola. Un matage est également constaté in situ sur un des deux contre-rails d'un appareil de voie à Sainte-Marguerite (voir l'état à neuf sur la photo ci-dessus). En fonction des chocs répétés, la forme de la pointe de l'épaulement du contre-rail peut présenter avec le temps des formes agressives.



Figure 60 : épaulement saillant, dans l'appareil de voie 91a de Zoccola



Figure 61 : matage de l'épaulement de l'appareil de voie 13 de Sainte-Marguerite

Le risque de choc entre la semelle du frotteur et l'épaulement saillant peut concerner un appareil de voie dévié à gauche, pris en pointe en voie déviée, tel que schématisé ci-dessous.

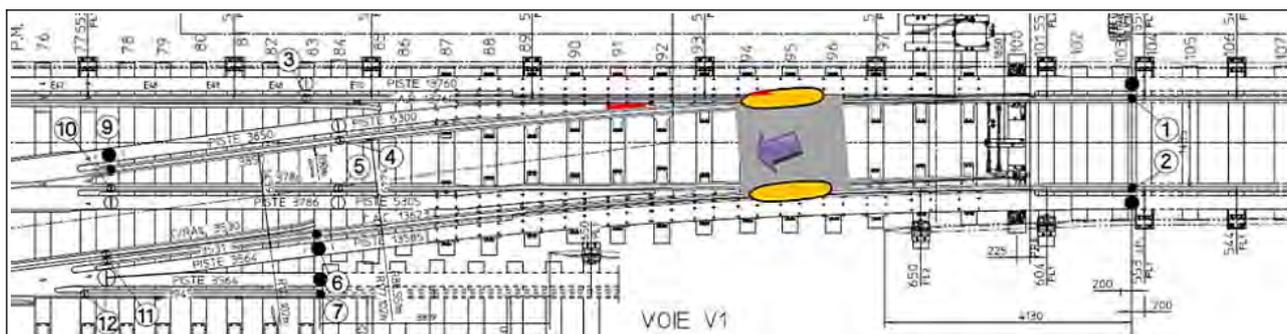


Figure 62 : exemple de configuration pouvant présenter un risque lié à l'épaulement des contre-rails de l'aiguillage au passage en voie déviée (les points de choc sur les frotteurs et sur le contre-rail sont matérialisés en rouge)

En conclusion, les angles saillants des épaulements des contre-rails de l'aiguillage sont des éléments susceptibles de causer un choc latéral sur la semelle du frotteur.

4.4.3 - Seconde hypothèse explorée : le choc du frotteur suite à l'usure différentielle de la pointe de cœur et des pattes de lièvre

Des manœuvres en voie réalisées par la RTM sur une rame (A16) hors exploitation, le 22 mai 2019, ont permis d'entendre en direct un choc au niveau de la pointe de cœur de l'aiguillage 13 et de constater la perte d'un frotteur sur l'aiguillage 13.

Observations dans la pointe de cœur de l'aiguillage 13 à Sainte-Marguerite

Un cœur d'aiguillage est une pièce permettant dans l'aiguillage le croisement des deux files de rail. Son ornière profonde permet le passage du mentonnet de la roue « fer » au travers du rail croisé. Les cœurs de croisement du métro marseillais sont des pièces monoblocs, en acier moulé enrichi au manganèse.

Dans un cœur d'aiguillage, une courte section de contre-rail appelée patte de lièvre (PdL) est la partie de la piste de roulement pneumatique qui se trouve en vis-à-vis de la pointe de cœur. La PdL « directe » est celle située à l'extérieur du cœur quand la rame passe en voie directe. La PdL « déviée » est celle située à l'extérieur du cœur quand la rame passe en voie déviée. Le schéma ci-dessous indique la localisation des pattes de lièvre directe et déviée.

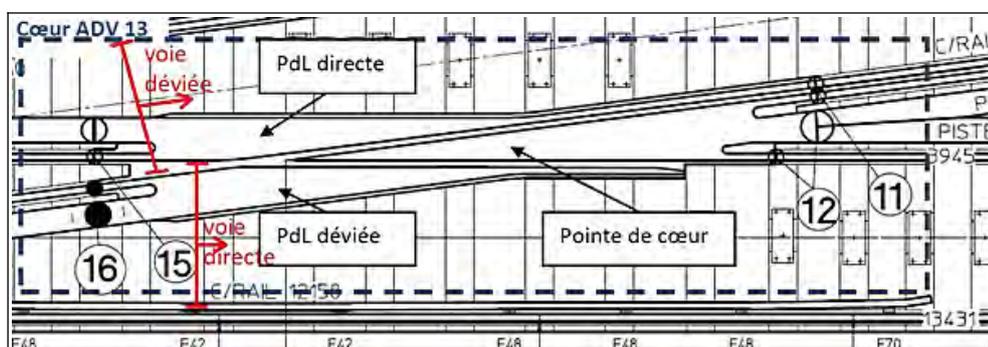


Figure 63 : cœur de l'appareil de voie 13, à Sainte-Marguerite

En se concentrant sur le cœur de l'appareil de voie 13, deux types d'usure peuvent être observés et mesurés : une usure latérale ainsi que des usures verticales de valeurs différentes.

Usure latérale

L'observation visuelle du cœur de l'aiguillage 13 a permis de constater une **usure latérale importante de la patte de lièvre directe**, créant une arête vive sur cette PdL.

A contrario, la patte de lièvre déviée ne présente pas ou peu d'usure latérale.

Le relevé des cotes par un profilomètre confirme les observations visuelles des diverses usures des PdL directe et déviée.

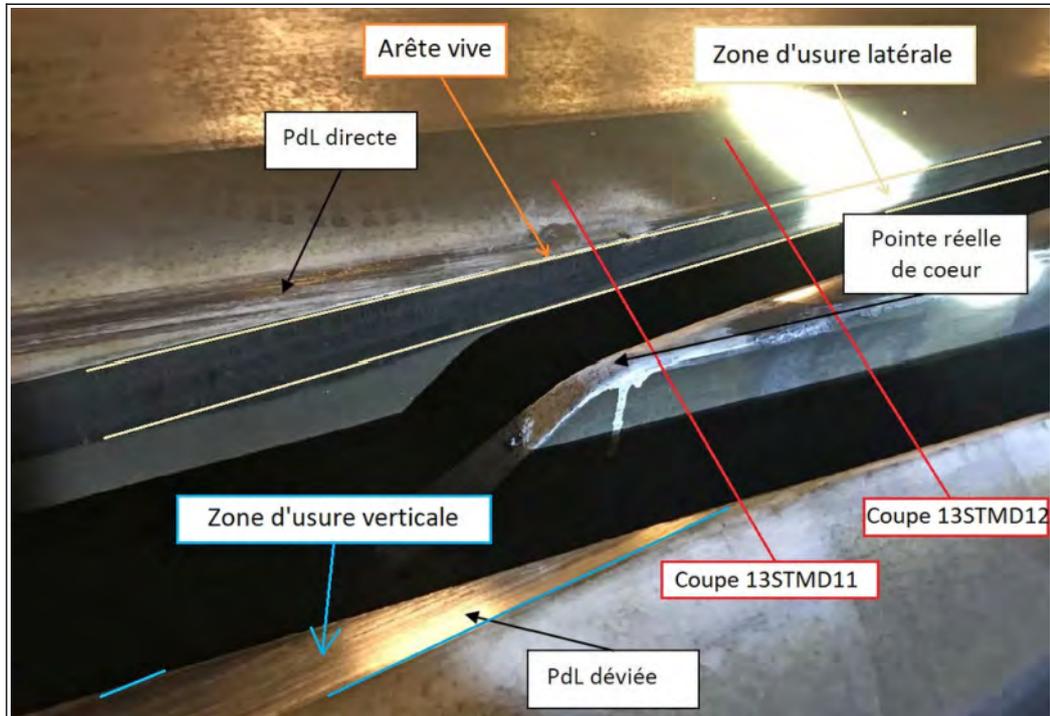


Figure 64 : zone centrale du cœur de l'aiguillage 13, localisation des usures latérale et verticale

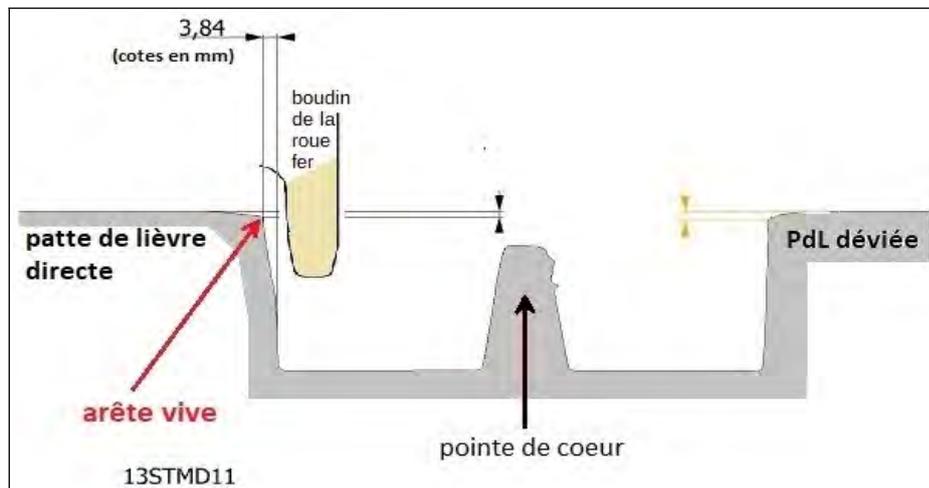
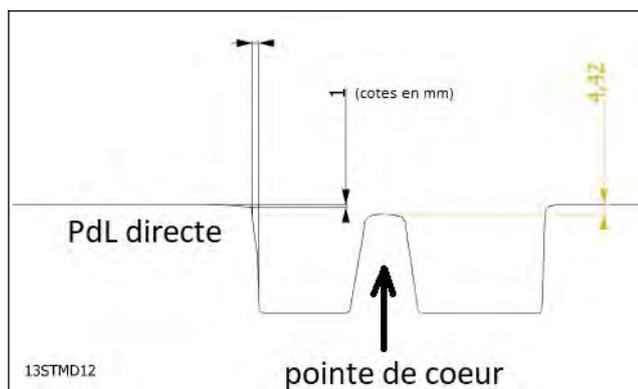


Figure 65 : relevé d'usure latérale par profilomètre dans le cœur de l'aiguillage 13

Avec le profil de roue et la cote de calage des roues, l'inscription des bogies en voie directe génère peu de contact latéral sur la patte de lièvre directe. Par contre, l'inscription des bogies en voie déviée entraîne un contact par guidage latéral des roues « fer » sur la face interne de la patte de lièvre directe, le boudin de la roue fer frotte : il se crée donc une usure latérale sur la PdL directe. Cette usure latérale de la PdL directe remplace le congé latéral (arrondi) par une arête vive.

Différence d'usure verticale

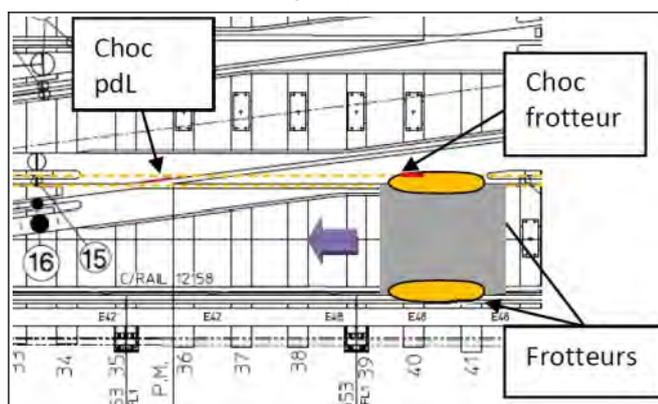
Dans la zone de cœur, le frotteur placé sur l'extérieur du bogie use la partie supérieure des pattes de lièvre et du cœur de l'aiguillage. Or, on observe une **usure verticale non homogène entre l'usure de la pointe de cœur et l'usure de la patte de lièvre directe**. Cette observation est confirmée par les mesures du profilomètre.



**Figure 66 : relevé d'usure verticale par profilomètre dans le cœur de l'aiguillage 13.
La conception de la pointe prévoit un abaissement à l'état neuf de 2,7 mm**

Sur l'aiguillage 13 de Sainte-Marguerite, le différentiel d'usure mesuré entre surfaces des rails est de 1,72 mm (correspondant aux 4,42 mm auquel il faut déduire les 2,7 mm prévus à la construction). Ce différentiel s'explique par une commande des itinéraires dissymétrique avec un itinéraire quasi exclusif en voie déviée : sur une journée, 218 passages sont en voie déviée et 2 passages sont en voie directe. Cela entraîne une usure marquée par les frotteurs sur la PdL déviée et sur le cœur, et légère sur la PdL directe.

Ce différentiel d'usure implique alors que, lors du passage en talon de l'appareil en voie directe, le frotteur passe de la pointe de cœur usée à la patte de lièvre directe avec une hauteur plus importante. Le frotteur descend donc sur la partie usée par rapport à son plan de frottement puis heurte le congé latéral de la patte de lièvre dont nous avons vu plus haut qu'une usure latérale le remplaçait par une arête vive.



**Figure 67 : configuration présentant un risque de choc sur la patte de lièvre
au passage en voie directe**

Conclusion sur les pattes de lièvre

Le choc se situe entre le frotteur négatif ou de masse et l'appareil dans la zone de transfert. Il concerne le passage en voie directe en talon des appareils de voie, au passage de la pointe du cœur vers la patte de lièvre. Les appareils présentant les plus grands risques sont ceux utilisés de manière asymétrique. La situation à risque est la prise en talon sur l'itinéraire utilisé exceptionnellement.

Grâce aux observations visuelles et aux mesures réalisées, deux facteurs peuvent être identifiés comme étant à l'origine probable du choc sur la semelle du frotteur :

- une usure différentielle de hauteur entre la pointe de cœur et la patte de lièvre directe.
- une usure latérale de la patte de lièvre directe qui y crée une arête vive agressive.

4.4.4 - L'étude d'insertion des frotteurs négatifs ou de masse sur les appareils de voie

Le phénomène de perte de frotteur ne se produit pas à chaque passage sur un appareil de voie présentant une configuration à risque. Ce phénomène, aléatoire, pourrait s'expliquer par la dynamique des trains et les dépôts possibles du frotteur, plus importants dans certains cas que dans d'autres. Pour évaluer les positions et le franchissement du frotteur sur les différentes pièces d'aiguillage, la RTM a commandé à Vossloh une étude d'inscription des frotteurs négatifs ou de masse du métro dans le type d'appareil de voie Vossloh concerné par les casses.

Sur la base des analyses vues précédemment et connues au moment de son étude, Vossloh prend comme donnée d'entrée le scénario d'une rupture des frotteurs dans l'appareil de voie, localisée dans la zone de transfert du frotteur négatif de la pointe de cœur de croisement vers la patte de lièvre en franchissement en voie directe, avec une usure déséquilibrée entre la voie déviée et la voie directe (cas du § 4.4.3.).

Vossloh identifie également des limites à son étude du fait de données d'entrées manquantes.

Franchissement des cœurs et des pattes de lièvre

Vossloh a modélisé l'inscription du bogie et des frotteurs négatifs ou de masse (qu'ils soient neufs ou usés) dans différentes zones des aiguillages, dont la zone de cœur. La trace d'usure de la voie déviée est prise en compte dans la modélisation. Pour le franchissement du bogie en voie directe dans la zone de cœur et avec une différence d'usure de 3 mm entre la pointe de cœur et la patte de lièvre, l'inscription modélisée indique un choc du frotteur sur la face verticale de la patte de lièvre directe. Ces 3 mm sont supérieurs aux 1,72 mm mesurés à Sainte Marguerite mais nous verrons par la suite que le paramètre important est la présence d'une arête vive sur la patte de lièvre.

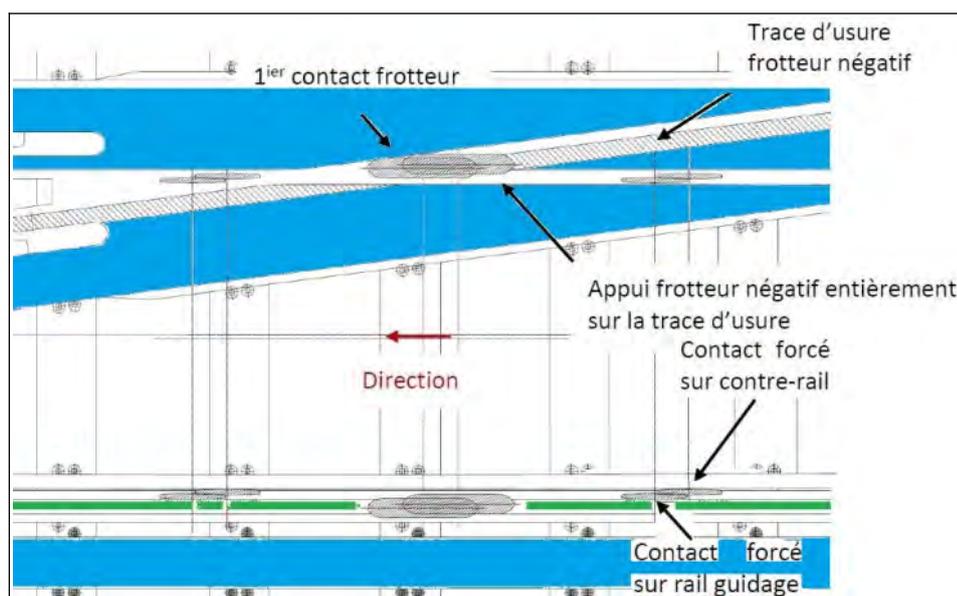


Figure 68 : localisation du 1^{er} contact (choc) entre le frotteur et la face verticale de la PdL directe lors du franchissement du bogie en voie directe dans la zone de cœur

La modélisation confirme l'absence de choc en cas de franchissement du bogie en voie déviée dans la zone de cœur. A contrario lors du franchissement du bogie en voie directe en talon dans la zone de cœur, il y a un risque de choc latéral.

Lors du franchissement, le frotteur passe de la pointe de cœur usée à la patte de lièvre directe d'une hauteur plus importante et présentant une arête vive. L'intensité du choc sera principalement et directement liée à la forme de la semelle du frotteur (neuve à usée, et éventuellement usée en creux) et à l'usure asymétrique entre la pointe de cœur et la patte de lièvre en voie directe.

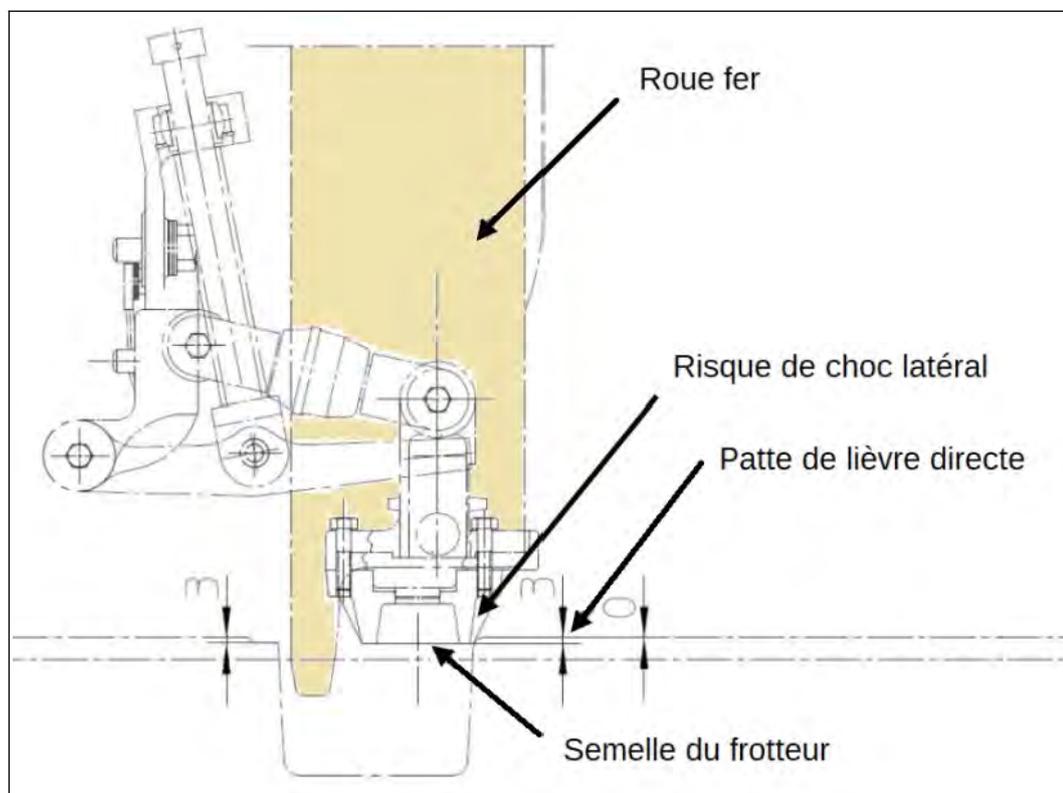


Figure 69 : franchissement du bogie en voie directe dans la zone de cœur, vue en coupe au droit du point de contact vertical du frotteur neuf, avec usure asymétrique de 3 mm

Conclusion sur les éléments de voie à l'origine du choc

Suite aux observations effectuées sur les différents aiguillages du métro de Marseille, deux hypothèses de choc sur les frotteurs ont été identifiées :

- un risque lié aux parties saillantes de l'épaulement des contre-rails ;
- un risque lié à l'usure latérale des pattes de lièvre et l'usure différentielle de la pointe de cœur et des pattes de lièvre.

Vossloh conclut son étude de la façon suivante :

« les appareils de voie sont compatibles avec le franchissement du frotteur négatif dans la zone rectiligne des cœurs de croisements et dans la zone courbe de rayon de 150 m des entretoises/contre-rail d'aiguillage. Il n'y a donc en principe pas de risque de choc latéral sur les frotteurs négatifs, sauf dans le cas d'une usure asymétrique prononcée des cœurs entre les itinéraires voie déviée et voie directe.

Par ailleurs, les cas observés suivants peuvent également induire des chocs :

1. Cas où les dimensions et le positionnement transversal des ensembles de frotteurs ont un **déport** supérieur à celui [pris en hypothèse] ; dans ce cas, il existe un risque de choc sur les entretoises d'aiguillage.

2. Cas où les frotteurs négatifs [font face à] une **usure asymétrique supérieure à 3 mm** ; ici il existe un risque de choc sur les entretoises d'aiguillage et dans les lacunes de cœurs.

3. Cas où les rails [des] aiguilles ont une usure latérale supérieure à 8 mm ou une usure verticale supérieure à 5 mm ; dans ce cas, il existe un risque de choc sur les entretoises d'aiguillage. »

Prescriptions de maintenance de Vossloh

En action corrective, Vossloh a proposé à la RTM de compléter les prescriptions de maintenance par les actions suivantes :

- surveiller la valeur d'asymétrie d'usure des frotteurs négatifs ;
- surveiller la valeur des rayons de raccord entre les pattes de lièvre et les ornières de cœurs dans la zone de la lacune du cœur ;
- surveiller la valeur d'asymétrie d'usure des pattes de lièvre et des pointes de cœurs.

4.4.5 - Hypothèse sur l'origine des usures verticales

La pointe de cœur de l'aiguillage 13 à Sainte-Marguerite présente des sillons d'usure dus aux frotteurs négatifs ou de masse. Des mesures au profilomètre le confirment.

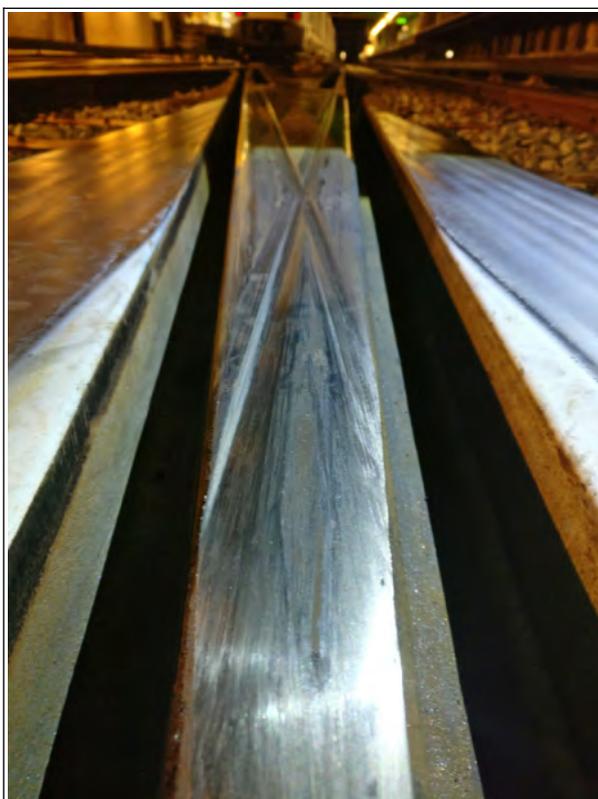


Figure 70 : vue du cœur de l'aiguillage 13 à Sainte-Marguerite avec traces d'usure

La figure ci-dessous reprend la forme de pointe de cœur relevée par profilomètre : le dessus de la pointe de cœur, à l'origine de forme plate, s'est creusé suivant un sillon. Vossloh suppose que ce sillon est probablement dû à une usure asymétrique de la sous-face des frotteurs, ici tracée avec un creux de 3 mm. Le rail use le frotteur et celui-ci à son tour use le cœur d'aiguillage.

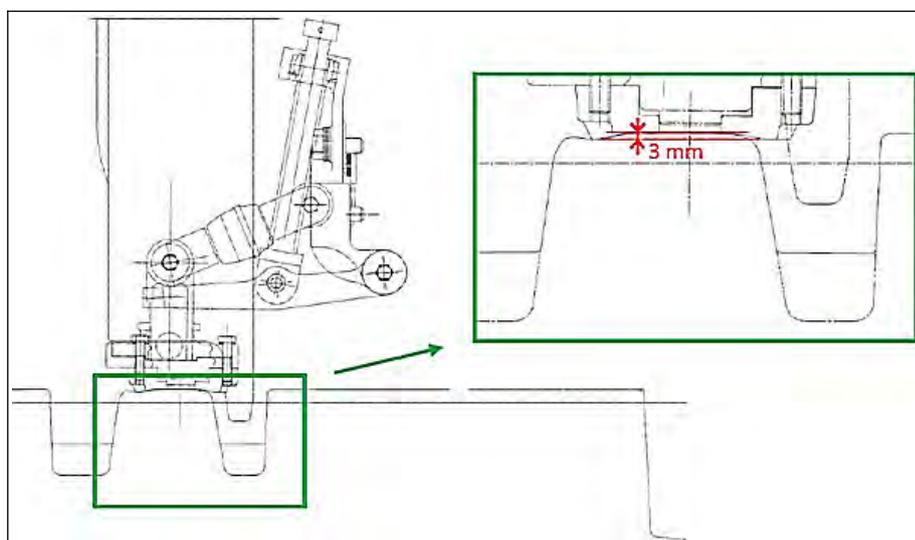


Figure 71 : franchissement du bogie en voie déviée dans la zone de cœur, vue en coupe et détail du profil d'usure de la pointe de cœur usé

Le profil asymétrique d'usure de la semelle du frotteur peut expliquer l'usure du cœur d'aiguillage mais aussi l'usure verticale des pattes de lièvre.

4.5 - Mesures correctives mises en œuvre par l'exploitant

Suite aux différents constats et aux analyses exposées ci-dessus, la RTM a mis en œuvre et achevé des actions correctives pour éliminer tout angle saillant ou toute usure différentielle de la pointe de cœur et des pattes de lièvre dans les aiguillages, par ordre chronologique :

1. la reprise des défauts de voie supérieurs à 2 mm sur la ligne M2 ;
2. le meulage des épaulements du contre-rail de l'aiguillage ;
3. le meulage des arêtes vives (réalisé à partir du 12 septembre 2019) pour créer un congé (arrondi) sur les pattes de lièvre des appareils de voie concernés par cette problématique (Sainte-Marguerite, Zoccola, Bougainville) ;
4. le rechargement complet des cœurs des appareils de voie sur la ligne M2 dont notamment l'appareil de voie 13 de Sainte-Marguerite (à partir du 2 octobre 2019 jusqu'au 22 novembre 2019).

Malgré les reprises n° 1 et 2, des casses des bras de frotteurs avaient encore été observées. **L'absence de casse de frotteur a été observée à partir de l'étape n° 3 réalisée en septembre 2019.** Ainsi, il semble que les hypothèses « défaut de voie courante » et « épaulements du contrerail de l'aiguillage » ne soient pas à l'origine des casses.

La partie d'aiguillage à l'origine du choc serait l'arête vive de la patte de lièvre directe.

Le délai court entre le meulage des arêtes vives et le rechargement de l'appareil de voie 13 ne permet pas de préciser si l'arrête vive est une cause suffisante à la casse ou si elle doit être associée à une usure horizontale.

Ces actions finalisées en décembre 2019 semblent apporter des réponses pertinentes au vu de l'absence de casse de bras de frotteur négatif ou de masse depuis cette date.

En écho à la proposition de surveillance de la valeur des rayons de raccord entre les pattes de lièvre et les ornières de cœurs dans la zone de la lacune du cœur au § 4.4.4, la RTM a mis en place un mode opératoire afin d'effectuer des relevés au profilomètre et contrôler la présence d'arêtes vives sur les pattes de lièvre. Si besoin, un meulage immédiat est réalisé et une nouvelle mesure au profilomètre est effectuée.

4.6 - La prise en compte de l'interaction frotteur/voie au long de la vie du système

4.6.1 - L'analyse préliminaire des dangers du métro marseillais

Une analyse préliminaire des dangers (APD) des sous-systèmes du métro et de leurs interfaces a été effectuée en 2009 dans le cadre du Dossier de Sécurité Régularisé¹¹ du métro de Marseille. Cette analyse consiste à :

- rechercher les causes et les circonstances d'accidents potentiels ;
- identifier les sous-systèmes ou éléments du métro potentiellement dangereux ;
- permettre de définir des mesures mises en place pour réduire ou éliminer l'occurrence et/ou la gravité des dangers potentiels.

L'analyse s'appuie sur l'élaboration d'une arborescence des dangers, qui détaille les accidents potentiels applicables à l'ensemble du système métro dont les conséquences seraient catastrophiques, critiques ou marginales¹².

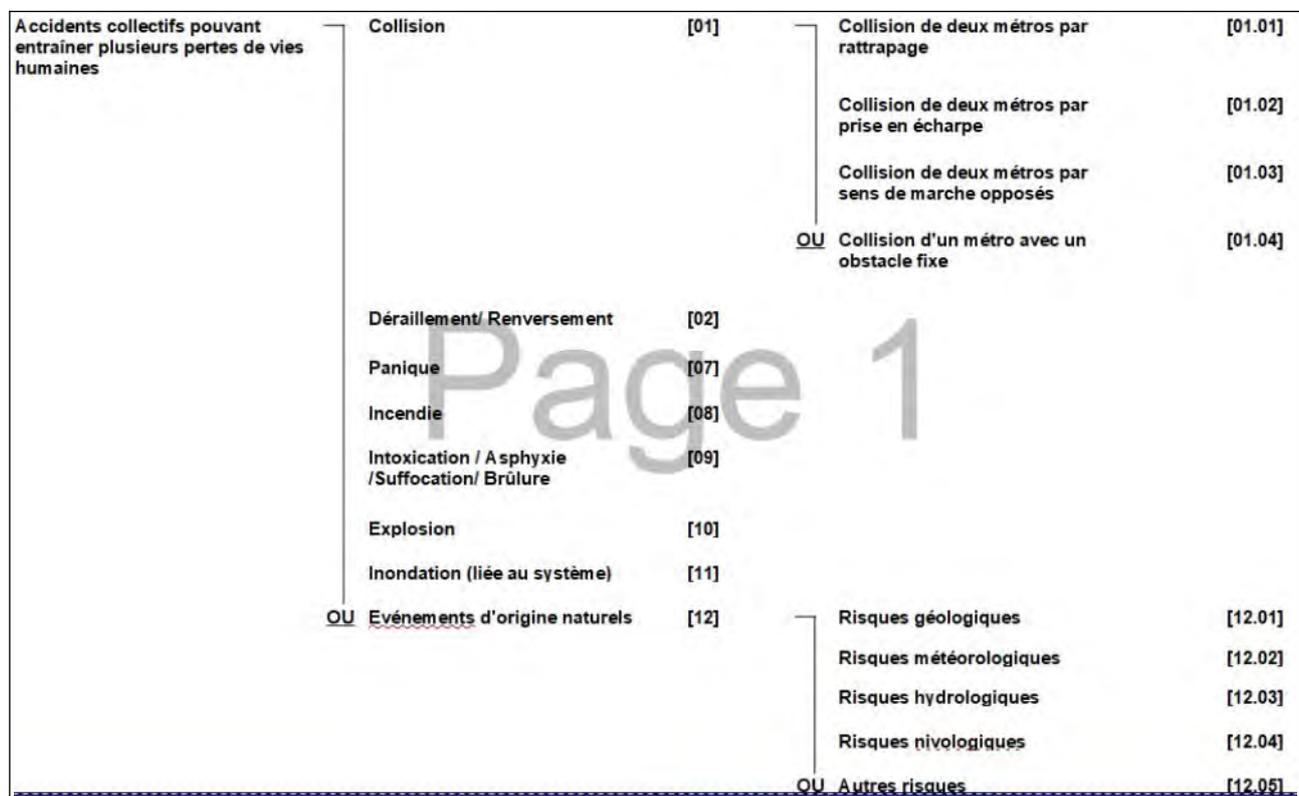


Figure 72 : extrait de l'arborescence détaillée des dangers de gravité catastrophique

11 Le Décret n° 2003-425 du 9 mai 2003 modifié, relatif à la sécurité des transports publics guidés (dit Décret STPG), demande la fourniture de différents documents de sécurité dont le Dossier de Sécurité Régularisé (DSR). Le DSR ne concerne que les systèmes de transports guidés ayant été construits avant 2003. L'objectif du DSR est de s'assurer de la sécurité du système, en se basant notamment sur le retour d'expérience d'une exploitation sur plusieurs années. Le DSR est également accompagné d'une évaluation par un Organisme Qualifié Agréé et est instruit par le STRMTG.

Pour les projets de systèmes de transports publics guidés construits après 2003, que ce soit à la phase de conception, de travaux ou de mise en service de ces systèmes, le Décret STPG exige la production de dossiers de sécurité, basés sur une démarche de construction et de démonstration de sécurité.

12 La norme EN 50126 « Applications ferroviaires - Spécification et démonstration de la fiabilité, de la disponibilité, de la maintenabilité et de la sécurité » détaille les niveaux de gravité.

À partir de cette arborescence, des tableaux d'analyse des dangers identifient les scénarios qui peuvent être à l'origine des dangers, en fonction des circonstances dans lesquelles ces derniers peuvent se produire. Les tableaux d'analyse mettent également en évidence les mesures pour réduire ou éliminer les dangers.

Dans l'APD du métro de Marseille de 2009, un des scénarios correspond à celui de l'accident du 21 décembre 2018. Il s'agit de la « *Collision d'un métro avec un obstacle fixe (permanent, non permanent)* », cet obstacle étant un « *Objet sur la voie provenant d'une rame de métro* ».

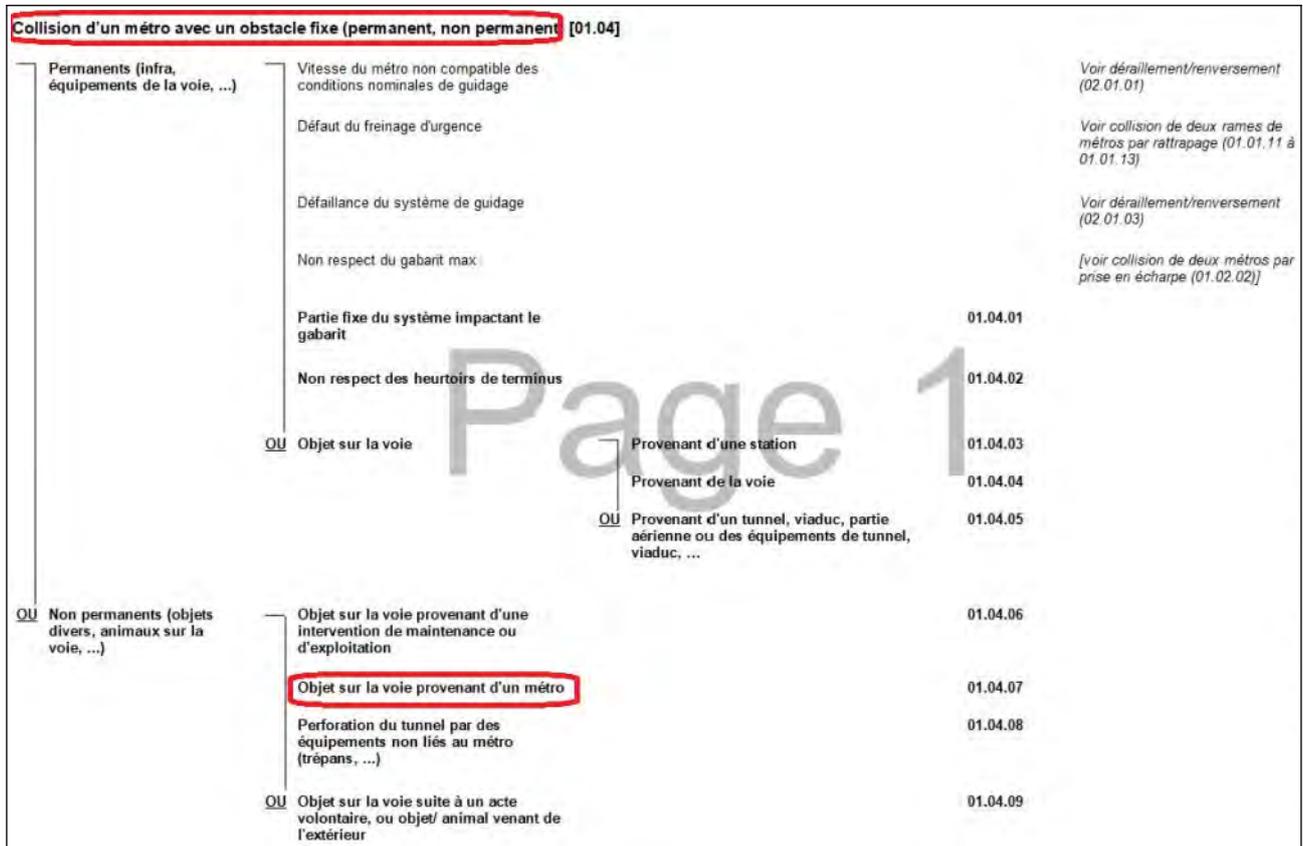


Figure 73 : extrait du DSR
Annexe APD, onglet collision d'un métro avec un objet sur la voie provenant d'un métro

Les causes possibles de ce risque identifié sont l'erreur de conception, la mauvaise fixation, la cassure d'une partie mécanique et l'usure des pièces du véhicule.

Les mesures de prévention/protection apportées dans l'APD à cette situation dangereuse sont les suivantes :

- les liaisons mécaniques et inter caisses, la barre d'attelage... doivent être dimensionnés pour garantir l'intégrité du matériel roulant compte tenu des efforts longitudinaux en traction et en freinage.
- pour les équipements sous caisses du matériel roulant, des dispositifs de sécurité pour les organes susceptibles de se désolidariser doivent être prévus en tant que de besoin : fixation suivant les critères accélérométriques en fonction des catégories de véhicules.
- des procédures de contrôle sont réalisées aux différents stades de la fabrication.
- des contrôles et entretiens périodiques sont préconisés lors des opérations de maintenance.

Le frotteur de masse ou négatif est par ailleurs mentionné dans d'autres scénarios comme étant :

- une mesure permettant de détecter la présence des trains pour le sous-système Signalisation ferroviaire : « *Détecter la présence des trains : le circuit de voie (CdV) permet de détecter et de situer la position d'une rame métro en tout endroit de la voie ainsi équipée. [...] Des tests périodiques TPFG sont réalisés afin de pallier à une éventuelle perte de ligne de frotteurs sur matériel roulant* ».
- une mesure permettant d'assurer le contact sur le rail avec la rame : « *Pour conserver à la surface un état suffisamment propre un cordon en acier inoxydable est appliqué par soudure à l'arc sur les champignons des profilés courant de rail, les pièces moulées au lieu de passage des frotteurs négatifs sauf aux intersections avec la voie sécante afin que les champignons de rail servant au fonctionnement des CdV soient exempts de rouille.* »
- une mesure permettant la mise au potentiel négatif de la rame : « *Des frotteurs de masse équipent également les quatre voitures du train. Ils assurent la mise au potentiel négatif des caisses des voitures du train en cas de mise en charge accidentelle causée par une défaillance des frotteurs négatifs.* »

En conclusion, le risque de collision d'un métro avec un objet sur la voie provenant d'un métro est bien identifié dans l'APD. Le frotteur négatif ou de masse est traité comme moyen de shuntage des circuits de voie ou de mise au potentiel de la rame. Toutefois, il n'est pas considéré comme un objet susceptible de tomber et de présenter un risque pour le matériel roulant. **Malgré son statut d'équipement sous caisse susceptible de se désolidariser, aucune analyse de la bonne fixation n'a pu être retrouvée.**

4.6.2 - Le cahier des charges du renouvellement des appareils de voie

Lors de la campagne de remplacement de certains appareils de voie en 2015 par Vossloh, le Cahier des Clauses Techniques Particulières du marché de travaux ne donnait aucune prescription concernant les frotteurs. Le cahier des charges incluait les plans des appareils existants à remplacer, le plan de la rame type de métro ainsi que les gabarits dynamiques de la rame en alignement droit et en courbe de 150 m. Le plan de la rame type visualisait un frotteur, sans toutefois le nommer ni donner d'information technique à son sujet (voir figures ci-dessous).

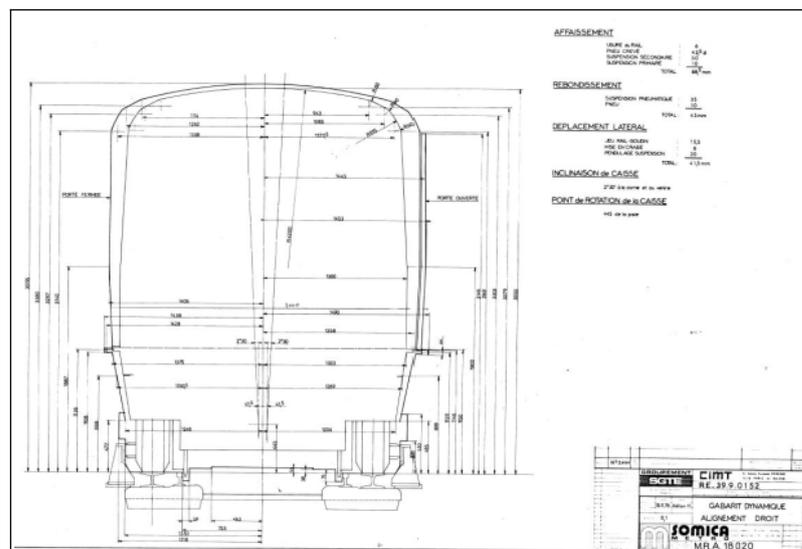


Figure 74 : gabarit dynamique de la rame en alignement droit du métro marseillais, frotteur non représenté

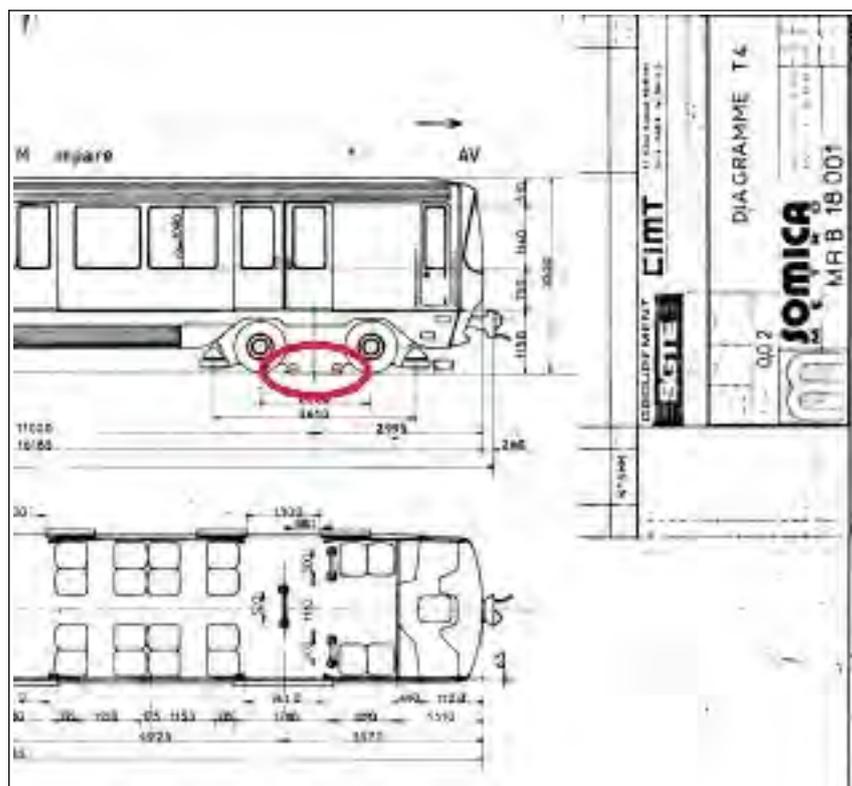


Figure 75 : extrait du diagramme de la rame avec visualisation du frotteur (entouré de rouge ici)

Dans le cadre de l'exécution du marché, une étude de sécurité réalisée par Vossloh sur les appareils de voie de 2015 a porté sur l'inscription du bogie et du véhicule dans la géométrie des appareils. Elle intègre la fonction guidage et la fonction roulement de la roue fer. Elle démontre que le franchissement du matériel roulant dans ce type d'appareils de voie se fait en sécurité pour les organes de roulement. Les frotteurs ne sont pas étudiés.

Le plan d'exécution d'aiguillage présente une rampe pour les frotteurs, sans autre précision. Cette rampe ne se situe pas dans le cœur où les chocs ont lieu. Il s'agit de la seule indication témoignant de la prise en compte de l'interface entre les frotteurs et les aiguillages par le constructeur des aiguillages.

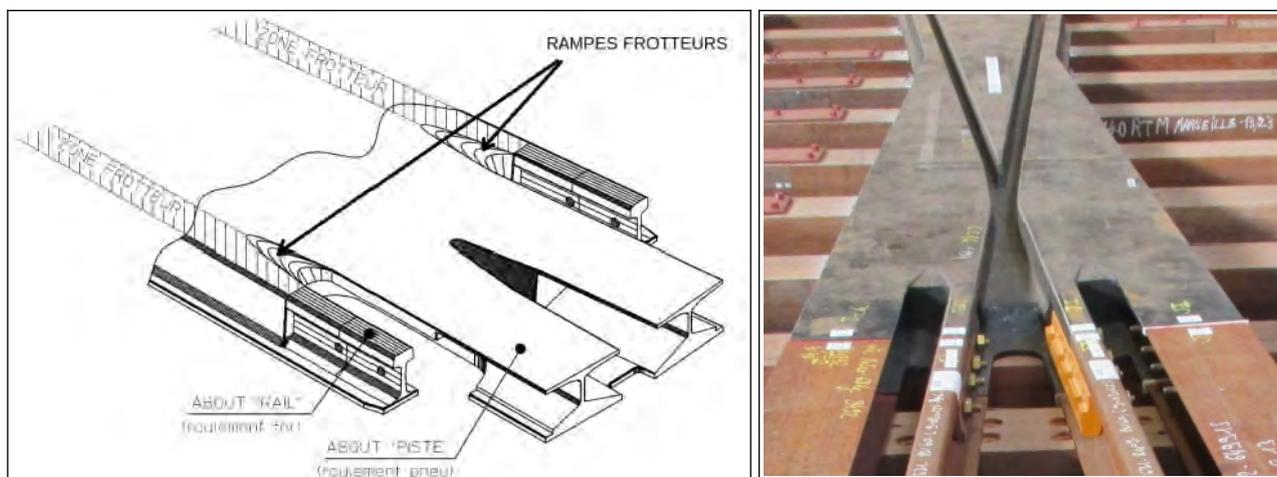


Figure 76 : plan de détail de la zone de croisement d'un aiguillage incluant une rampe pour les frotteurs, et zoom sur cette partie de l'aiguillage 13 de Marseille

En conclusion, l'interaction entre les frotteurs négatifs ou de masse et les aiguillages n'a été prise en compte ni dans le cahier des charges, ni dans la conception, ni pour les frotteurs, ni pour les aiguillages. La conception détaillée des appareils de voie à « cœur fixe » était déjà connue de Vossloh, bien que Vossloh ne dispose pas des éléments techniques utilisés et traités lors de la conception détaillée des appareils de voie réalisée à partir de 1974. L'interaction entre le véhicule et la voie n'a pas été traitée dans le cadre du marché de renouvellement de 2015.

La vérification de la compatibilité des appareils de voie avec le franchissement du frotteur négatif sans risque de choc latéral sur les frotteurs a été réalisée dans l'étude de novembre 2019, comme vu précédemment au § 4.4.4.

4.6.3 - Les fiches de maintenance voie

Dans le cadre de la fourniture des aiguillages en 2015, Vossloh a fourni à la RTM le manuel de maintenance des voies et appareils de voie. Ce manuel indique les cycles de maintenance, les seuils d'alerte et les tâches à réaliser.

Selon le manuel, les pattes de lièvre sont à contrôler lors du contrôle visuel de l'état des cœurs et celles-ci peuvent faire l'objet d'un rechargement en cas de mauvais état. La détection d'une usure verticale et/ou latérale anormale des pattes de lièvre n'y est pas mentionnée.

L'annexe 1 du manuel de maintenance, portant sur le contrôle des cotes des appareils de voie, indique qu'il faut mesurer la cote de protection de pointe de cœur. Cette mesure s'effectue entre la face intérieure de roulement du cœur et la face interne de la patte de lièvre du cœur opposée dans le cas des voies déviées des communications. Les mesures n'ont pas détecté les variations de quelques millimètres.

4.6.4 - L'analyse des incidents de perte de frotteur par l'exploitant

En 40 ans d'exploitation du métro marseillais, des casses de bras de frotteurs négatifs ou de masse se sont déjà produites. Elles n'ont jamais eu la conséquence de celle du 21 décembre 2018. L'usure anormale identifiée en 2011 sur les frotteurs (voir § 4.3.1) n'était pas traitée comme un sujet de sécurité mais comme un problème de maintenance entraînant l'immobilisation du matériel roulant et de coût de remplacement.

Les agents de la maintenance voie ramassent parfois des frotteurs, souvent en arrière-gare ou en atelier, dans des endroits non gênants : cela n'est pas vu comme un risque. L'exploitant-mainteneur n'a jamais envisagé que la perte de ce type de pièce pouvait avoir pour conséquence un déraillement.

Un signal faible est habituellement identifié en opérationnel comme une insuffisance, alors qu'il apparaîtra en bonne place et en tant que précurseur dans les causes d'un évènement critique survenu a posteriori. 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 chutes récurrentes de frotteurs en voie étaient des signaux faibles qui n'ont pas été identifiés comme tels. La détection a bien été faite, mais la communication et l'interprétation n'ont pas été prises en compte dans les processus de prévention des risques.

4.6.5 - *L'analyse de la perte d'autres composants des matériels roulants sur la voie*

Le service maintenance voie retrouve des « fins » de sabots de frein dans les voies. Ce sont des morceaux de bois en fin de vie. Le métro freine d'abord par récupération d'énergie mais également des freins à sabots participent de façon mécanique au freinage de la rame.



Figure 77 : freinage par sabot de bois
Un sabot rodé installé sur l'essieu à gauche, le stock des sabots usés à droite

Tous les 10 000 km, la maintenance du matériel roulant effectue le remplacement préventif d'une partie des sabots en bois d'une rame par des sabots neufs. À cette occasion, sont réalisés un contrôle de l'ensemble des autres essieux et de leurs sabots de frein, ainsi que le remplacement des sabots en limite d'usure (dont l'épaisseur est inférieure à 30 mm) par des sabots rodés.

Il nous semble que ce matériau est suffisamment résistant pour que sa chute dans la voie entraîne un risque similaire à la perte des frotteurs négatifs ou de masse.

4.6.6 - *Conclusion sur la prise en compte de l'interaction frotteur/voie tout au long de la vie du système*

De la conception jusqu'au retour d'expérience de l'exploitation, le risque de perte d'un frotteur négatif ou de masse n'a pas été considéré et n'a donc pas été traité, ni dans l'APD, ni dans le cahier des charges du renouvellement des aiguillages, ni dans le manuel de maintenance voie, ni lors d'un retour d'expérience suite à la récupération régulière des frotteurs tombés dans la voie. De plus, ce n'est pas le seul composant tombé à la voie dont le risque n'a pas été étudié.

5 - Restitution du déroulement de l'événement

Ce chapitre restitue l'analyse du BEA-TT du déroulement de l'accident, le 21 décembre 2018, en conclusion des investigations conduites.

Au cours de l'exploitation normale, la rame de métro B14 passe sur des aiguillages. Sur l'un d'eux, un choc a lieu entre le frotteur négatif côté gauche du bogie B128 et la patte de lièvre de l'aiguillage.

Ce choc crée un couple de flexion sur le bras du frotteur qui entraîne sa rupture. La semelle du frotteur reste solidarifiée au bogie par l'intermédiaire de la bielle de maintien de l'horizontalité. Elle est alors le dernier lien physique entre la partie haute et la partie basse du frotteur.

La rame continue sa circulation puis elle effectue une manœuvre de retournement à la station Sainte-Marguerite. En sortie de cette station, à 8 h 25, la bielle casse au passage de l'aiguillage 21.

La semelle du frotteur tombe alors dans l'aiguillage 21 et se coince. Elle fait office de rampe sur laquelle la roue fer du bogie B152 roule. La roue monte sur le rail, provoquant pour le bogie B152 la sortie des rails.

Le contact de la barre latérale de guidage et d'alimentation électrique avec la bande de roulement pneu de la voie à côté provoque la disjonction de l'alimentation et par conséquence, l'arrêt automatique de la rame.

Du fait des secousses dans la rame lors du déraillement, on déplore 15 blessés dont 14 pris en charge par les marins pompiers. L'évacuation se déroule dans de bonnes conditions. De gros dégâts matériels sont constatés au niveau de la voie et de la rame.

Le trafic est interrompu entre Castellane et Sainte-Marguerite jusqu'au lendemain samedi à 16 heures. Des travaux de remise en état provisoire sont réalisés par les agents d'entretien de la voie, puis les essais de remise en service permettent la remise en circulation sous conditions. La barre de guidage et d'alimentation électrique est définitivement réparée quatre jours plus tard.

6 - Analyse des causes et facteurs associés, orientations préventives

6.1 - L'arbre des causes

Les investigations conduites permettent d'établir le graphique ci-après qui synthétise le déroulement de l'accident, les causes et les facteurs associés.

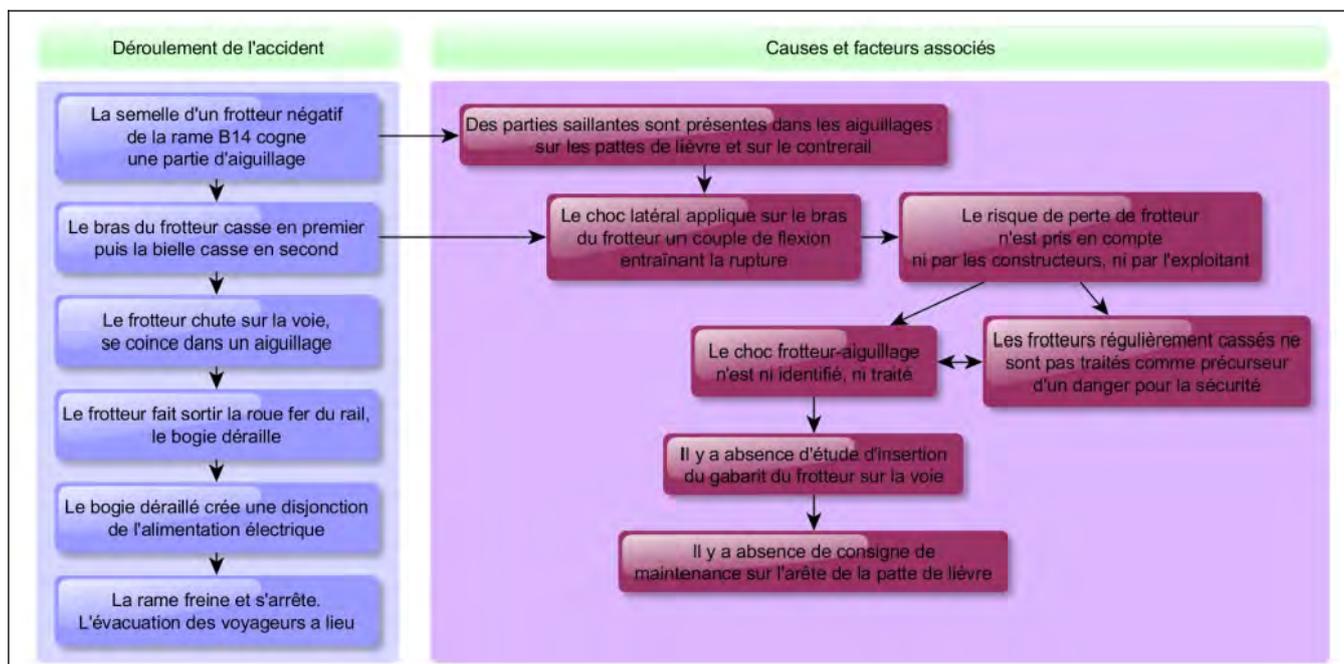


Figure 78 : arbre des causes du déraillement du métro marseillais le 21 décembre 2018

6.2 - Les causes de l'événement

Le vendredi 21 décembre 2018, à 8 h 25, une rame de la ligne 2 du métro de Marseille déraile d'un bogie, juste après son départ de la station terminus Sainte-Marguerite-Dromel en direction de Bougainville.

La cause du déraillement de la rame est la perte, dans un cœur d'aiguillage, d'une pièce d'un des bogies de la rame B14. Il s'agit d'un frotteur négatif. Faisant obstacle au passage des roues, cette pièce provoque la montée des roues du bogie suivant, la sortie du rail de ce bogie et donc son déraillement. Dans le choc, le bogie déraillé a poussé la barre latérale de guidage et d'alimentation électrique contre la bande de roulement pneu de la voie à côté, ce qui a déclenché la disjonction de l'alimentation électrique et de ce fait, l'arrêt automatique de la rame.

La perte de la pièce est due à sa casse préalable. Cette casse a été provoquée par un choc appliqué latéralement par un élément de voie. Le choc a appliqué sur la pièce un couple de flexion non prévu en conception. Toutefois, après la casse de la pièce, un dernier élément constituant une bielle de maintien reliait encore les deux parties de la pièce, les maintenant solidaires. Cette bielle a cassé à la station Sainte-Marguerite entraînant la chute de la semelle.

Deux parties d'aiguillage ont été identifiées comme pouvant être à l'origine du choc : la première est un angle saillant de l'épaulement des contre-rails ; la seconde, une arête vive de la patte de lièvre directe. Les actions correctives apportées par la RTM et l'arrêt des casses des bras de frotteurs après la correction du second défaut indiquent qu'il s'agit de l'arête vive de la patte de lièvre directe.

Deux facteurs ont contribué à l'avènement de l'accident :

- la non-évaluation du risque d'interaction entre la voie et la pièce du bogie lors de la conception, et de ce fait, l'absence de prescription de maintenance des aiguillages prévenant l'évolution de ce risque ;
- la non-identification de la récurrence des casses antérieures de cette pièce comme précurseur d'un danger pour la sécurité.

Les orientations préventives à rechercher portent sur les sujets suivants :

- le traitement du risque de perte d'un composant du matériel roulant dans l'analyse préliminaire des dangers préalable à la mise en service d'un équipement ;
- l'identification des composants pouvant présenter un risque et leur traitement ;
- le traitement exhaustif des risques liés à l'interface entre la voie et les frotteurs négatifs ou de masse du matériel roulant, notamment dans les manuels de maintenance voie et matériel roulant ;
- le retour d'expérience en exploitation et maintenance en ce qui concerne la perte d'une pièce.

6.3 - L'analyse préliminaire des dangers

Ni lors de la conception, ni dans l'analyse préliminaire des dangers de 2009, ni au long de la vie du métro et des casses des bras de frotteurs, la problématique de perte de frotteur négatif ou de masse entraînant un déraillement d'un bogie n'a été identifiée comme un risque pour la sécurité.

Pour les nouveaux matériels roulants et les nouveaux appareils de voie de métro qui équiperont les réseaux français dans le cadre d'un projet de ligne nouvelle, d'une extension, d'un renforcement de l'offre de transport ou bien en remplacement de l'existant, il conviendra que le risque de perte de tout composant du matériel roulant soit intégré et traité dans l'analyse préliminaire des dangers. Ce risque de perte est à traiter depuis l'arborescence des dangers jusqu'aux mesures de traitement des dangers, que celles-ci touchent le matériel, l'exploitation ou la maintenance. Des études d'interfaces statiques et dynamiques des frotteurs entre les futurs matériels roulants et les nouveaux appareils de voie de métro s'avèrent désormais indispensables.

Pour ces projets, il conviendra de plus que les interfaces entre voie et matériel roulant soient vérifiées au cours de l'évaluation par le second regard de l'Organisme Qualifié Agréé ainsi qu'au cours de l'instruction des dossiers de sécurité par le STRMTG, afin de s'assurer que le risque de perte d'un composant du matériel roulant soit bien traité.

À cette fin, le BEA-TT émet la recommandation suivante.

Recommandation R1 à l'attention du Service technique des remontées mécaniques et des transports guidés (STRMTG) :

Inciter les porteurs de projet de métro, et à travers eux les constructeurs de matériel roulant et fournisseurs d'éléments de la voie, à traiter dans l'analyse préliminaire des dangers, le risque de perte d'un composant susceptible d'engendrer un déraillement et à y intégrer l'identification des composants potentiellement concernés et les mesures adéquates en conception et en maintenance. S'assurer lors de l'instruction des dossiers réglementaires des nouveaux projets de métro que ce risque a fait l'objet d'une attention particulière.

En particulier, demander la fourniture d'une étude des interfaces statiques et dynamiques entre la voie et les frotteurs négatifs ou de masse pour tout nouveau matériel roulant et/ou nouvel appareil de voie de métro à pneus.

6.4 - La vérification des composants actuels pouvant présenter un risque

Sur le réseau de métro marseillais, depuis le déraillement du 21 décembre 2018, l'exploitant-mainteneur RTM a investi de façon importante du temps et des moyens afin de comprendre les causes de cet accident. Il s'est entouré des experts de Faiveley, de Vossloh et de la RATP. Cet investissement a permis une compréhension quasi totale des causes de l'accident.

Tout frotteur négatif ou de masse perdu à la voie ou cassé est par ailleurs désormais suivi de façon exhaustive et étudié en détail par l'exploitant. Un processus durable de surveillance est en cours de mise en place par la RTM avec une traçabilité des pièces cassées et leur géolocalisation.

Pour éviter les chocs sur la patte de lièvre, la RTM a identifié trois solutions possibles :

- le meulage des arêtes vives et du cœur ;
- le rechargement du cœur ;
- ou encore le remplacement de cœur.

Chacune de ces opérations a été menée à bien selon les zones et les besoins. Les essais qui ont suivi sont positifs. Il n'a pas été constaté de nouvelle casse de bras de frotteur négatif ou de masse depuis la mise en œuvre de ces mesures.

Les mesures d'exploitation qui avaient été prises après le déraillement dans l'attente de la compréhension de l'événement et des actions correctives adéquates, sont suivies et leurs conditions de levées ont été définies par la RTM.

Le BEA-TT salue les moyens intellectuels et financiers mis en œuvre par la RTM dans la compréhension et la résolution de cet accident. Il prend acte des actions correctives menées. Il n'émet pas de recommandation sur ce thème.

D'autres composants des matériels roulants de métro peuvent toutefois tomber à la voie, tels que par exemple les plaquettes de frein en bois. Aussi, le BEA-TT émet la recommandation ci-dessous.

Recommandation R2 à l'attention de la Régie des transports métropolitains (RTM) : Identifier tous les composants des matériels roulants du métro de Marseille pouvant présenter un risque de déraillement suite à la chute à la voie de ces composants et traiter le risque.

Le processus de gestion des pertes en ligne de composants doit être finalisé et formalisé dans le Système de Management de la Sécurité de la RTM.

Le BEA-TT invite la RTM à formaliser dans son Système de Management de la Sécurité les modalités de suivi et de traitement de la perte en ligne de tout constituant du matériel roulant.

6.5 - Les manuels de maintenance de la voie et du matériel roulant

La RTM a commandé à Vossloh une étude d'insertion des frotteurs négatifs ou de masse pour évaluer les positions de ces frotteurs et les conditions de franchissement sur les différentes pièces d'aiguillage d'appareils de voie Vossloh. À l'issue de cette étude, il reste encore quelques incertitudes.

Les consignes de surveillance des usures des appareils de voie par Vossloh sont restées identiques à l'existant malgré l'accident du 21 décembre 2018. Cette situation n'est pas satisfaisante en l'état. Il conviendra de définir les bons cycles et les bonnes valeurs de contrôle en maintenance qui permettraient d'éviter les chocs entre le frotteur et un composant des appareils de voie.

Le BEA-TT encourage la RTM à poursuivre, avec l'assistance de Vossloh, les investigations pour obtenir un traitement parfait et complet des causes de la casse des bras des frotteurs négatifs ou de masse, en particulier concernant les pattes de lièvre ainsi que l'usure asymétrique au niveau des cœurs entre les itinéraires voie déviée et voie directe. À cette fin, il émet à l'adresse de ces deux acteurs la recommandation ci-après.

Recommandation R3 à l'attention de la Régie des transports métropolitains (RTM) et de la société Vossloh :

S'accorder et finaliser les procédures de maintenance de la voie et du matériel roulant permettant de traiter de façon satisfaisante les risques liés à l'interface entre la voie et les frotteurs négatifs ou de masse du matériel roulant.

Un relevé précis de la géométrie des cœurs a été fait avec un profilomètre. L'outil permet de rentrer dans la simulation les profils avec des usures réelles. La RTM a prévu de s'équiper d'un tel outil ainsi que d'indicateurs pour suivre les évolutions d'usure des appareils de voie. La périodicité des contrôles reste à fixer. Le pas devra être suffisamment fin pour anticiper toute évolution pouvant entraîner de nouvelles casses.

Lors de la maintenance des appareils de voie, les opérateurs de la RTM vérifiaient les cotes nécessaires et inscrivaient les valeurs mesurées, mais aucune valeur seuil relative à l'appareil de voie n'était définie. La maintenance et la validation des cotes était basée sur une appréciation conforme ou non conforme, fondée sur l'expérience des agents. Désormais la RTM a entrepris d'améliorer ses procédures. Le manque de formalisation a incité la Direction Maintenance des Installations Fixes de la RTM à créer une structure spécifique d'ingénierie de la maintenance en charge de l'amélioration des processus et de leur traçabilité.

Le BEA-TT prend acte de l'amélioration du processus de contrôle en cours et il n'émet pas de recommandation à ce sujet.

6.6 - L'amélioration du retour d'expérience en exploitation et en maintenance concernant la perte d'une pièce

Peu après le déraillement de Marseille, une enquête a été lancée par le STRMTG auprès des exploitants de réseaux de métros sur pneus sur la problématique de la perte de frotteur en voie. L'enquête montre que « *des pertes de frotteurs ont lieu sur d'autres lignes en France et donc que le phénomène revêt un caractère générique avec un risque associé grave bien que très peu probable* ».

Le STRMTG a demandé que la RTM, mais également les autres exploitants de métros sur pneumatiques soient vigilants à cette problématique de perte de frotteur en voie. Une recommandation nationale a été émise par le STRMTG à destination des exploitants de métro sur ce sujet en octobre 2019.

Nous pouvons synthétiser la recommandation de la façon suivante :

- à l'attention des réseaux de métros lourds : après la perte de tout ou partie de frotteur négatif ou de masse, mettre en œuvre des actions telles qu'un contrôle en géométrie des appareils de voie, une surveillance renforcée des voies sur la ligne où survient cet événement et un contrôle du parc de matériel roulant. Un signalement doit alors être fait au STRMTG puis une transmission des éléments descriptifs et analytiques de l'événement, et une information sur l'avancement des investigations et du plan d'actions à la suite de l'événement ;
- à l'attention des systèmes de métros VAL (Véhicule Automatique Léger : métro léger sur pneus totalement automatique) : après la perte d'un frotteur négatif ou de masse, signaler l'événement au STRMTG (via le rapport annuel) et l'évoquer en groupe de travail inter-systèmes animé par le STRMTG.

Le BEA-TT prend acte de la recommandation du STRMTG spécifique aux frotteurs négatifs ou de masse. Les dispositions apparaissent satisfaisantes quant au traitement du retour d'expérience national.

De façon plus générale, on note que le déraillement d'une rame de métro circulant sur la ligne 2 du métro parisien du 2 décembre 2016 à la station Barbès-Rochechouart avait pour cause directe la chute sur la voie d'un coffre onduleur¹³. Un précédent n'avait pas été pris en compte de façon complète.

On retrouve un facteur causal similaire et une conséquence identique sur le déraillement du métro le 21 décembre 2018 à Marseille. De même, des casses de bras de frotteurs ont été identifiées mais non traitées comme un risque pour la sécurité.

Le BEA-TT invite le STRMTG à sensibiliser les exploitants de métro au risque de perte de toute pièce d'un matériel roulant, au suivi de ces pertes, leur analyse et leur traitement en tant que précurseurs.

¹³ Le BEA-TT a publié un rapport 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. La cause directe de ce déraillement est la chute du coffre onduleur de la 4^e voiture, situé sous caisse. Les essieux du bogie de cette voiture sont alors montés sur le coffre, ce qui a conduit au déraillement.

7 - Conclusions et recommandations

7.1 - Conclusions

Le vendredi 21 décembre 2018, à 8 h 25, une rame de la ligne 2 du métro de Marseille déraile d'un bogie, juste après son départ de la station terminus Sainte-Marguerite-Dromel en direction de Bougainville.

La cause du déraillement de la rame est la perte, dans un cœur d'aiguillage, d'une pièce d'un des bogies de la rame B14. Il s'agit d'un frotteur négatif. Faisant obstacle au passage des roues, cette pièce a provoqué la montée des roues du bogie suivant, la sortie du rail de ce bogie et donc son déraillement. Dans le choc, le bogie déraillé a poussé la barre latérale de guidage et d'alimentation électrique contre la bande de roulement pneu de la voie à côté, ce qui a déclenché la disjonction de l'alimentation électrique et de ce fait, l'arrêt automatique de la rame.

La perte de la pièce est due à sa casse préalable. Cette casse a été provoquée par un choc appliqué latéralement par un élément de voie. Le choc a appliqué sur la pièce un couple de flexion non prévu en conception.

Toutefois, après la casse de la pièce, un dernier élément constituant une bielle de maintien reliait encore les deux parties de la pièce, les maintenant solidaires. Cette bielle a cassé à la station Sainte-Marguerite entraînant la chute de la semelle.

Une partie d'aiguillage a été identifiée comme pouvant être à l'origine du choc : une arête vive de la patte de lièvre directe.

Deux facteurs ont contribué à l'avènement de l'accident :

- la non-évaluation du risque d'interaction entre la voie et la pièce du bogie lors de la conception, et de ce fait, l'absence de prescription de maintenance des aiguillages prévenant l'évolution de ce risque ;
- la non-identification de la récurrence des casses antérieures de cette pièce comme précurseur d'un danger pour la sécurité.

Le BEA-TT émet **3 recommandations** et **2 invitations** dans les domaines suivants :

- le traitement du risque de perte d'un composant du matériel roulant dans l'analyse préliminaire des dangers préalable à la mise en service d'un équipement ;
- l'identification des composants pouvant présenter un risque et leur traitement ;
- le traitement exhaustif des risques liés à l'interface entre la voie et les frotteurs négatifs ou de masse du matériel roulant, notamment dans les manuels de maintenance voie et matériel roulant ;
- le retour d'expérience en exploitation et maintenance en ce qui concerne la perte d'une pièce.

7.2 - Recommandations

Recommandation R1 à l'attention du Service technique des remontées mécaniques et des transports guidés (STRMTG) :

Inciter les porteurs de projet de métro, et à travers eux les constructeurs de matériel roulant et fournisseurs d'éléments de la voie, à traiter dans l'analyse préliminaire des dangers, le risque de perte d'un composant susceptible d'engendrer un déraillement et à y intégrer l'identification des composants potentiellement concernés et les mesures adéquates en conception et en maintenance. S'assurer lors de l'instruction des dossiers réglementaires des nouveaux projets de métro que ce risque a fait l'objet d'une attention particulière.

En particulier, demander la fourniture d'une étude des interfaces statiques et dynamiques entre la voie et les frotteurs négatifs ou de masse pour tout nouveau matériel roulant et/ou nouvel appareil de voie de métro à pneus.

Recommandation R2 à l'attention de la Régie des transports métropolitains (RTM) : Identifier tous les composants des matériels roulants du métro de Marseille pouvant présenter un risque de déraillement suite à la chute à la voie de ces composants et traiter le risque.

Recommandation R3 à l'attention de la Régie des transports métropolitains (RTM) et de la société Vossloh :

S'accorder et finaliser les procédures de maintenance de la voie et du matériel roulant permettant de traiter de façon satisfaisante les risques liés à l'interface entre la voie et les frotteurs négatifs ou de masse du matériel roulant.

Le BEA-TT invite la RTM à formaliser dans son Système de Management de la Sécurité les modalités de suivi et de traitement de la perte en ligne de tout constituant du matériel roulant.

Le BEA-TT invite le STRMTG à sensibiliser les exploitants de métro au risque de perte de toute pièce d'un matériel roulant, au suivi de ces pertes, leur analyse et leur traitement en tant que précurseurs.

ANNEXES

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête

Annexe 2 : Archives de l'écran de régulation

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête



MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE

MINISTÈRE CHARGÉ DES TRANSPORTS



Le Directeur

La Défense, le 21 DEC. 2018

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 de métro le 21 décembre 2018 à Marseille dans les Bouches-du-Rhône ;

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 de métro à la station Sainte-Marguerite de la ligne M2, à Marseille (13), survenu le 21 décembre 2018

Jean PANHALEUX

Annexe 2 : Archives de l'écran de régulation

Lors de l'accident du 21 décembre 2018, le régulateur voit ceci sur son écran :



Figure 79 : écran de l'accident du 21 décembre 2018 8 h 28 min 45 s
la rame est à quai



Figure 80 : écran de l'accident du 21 décembre 2018 8 h 31 min 20s
la rame est arrêtée, la ligne a disjoncté

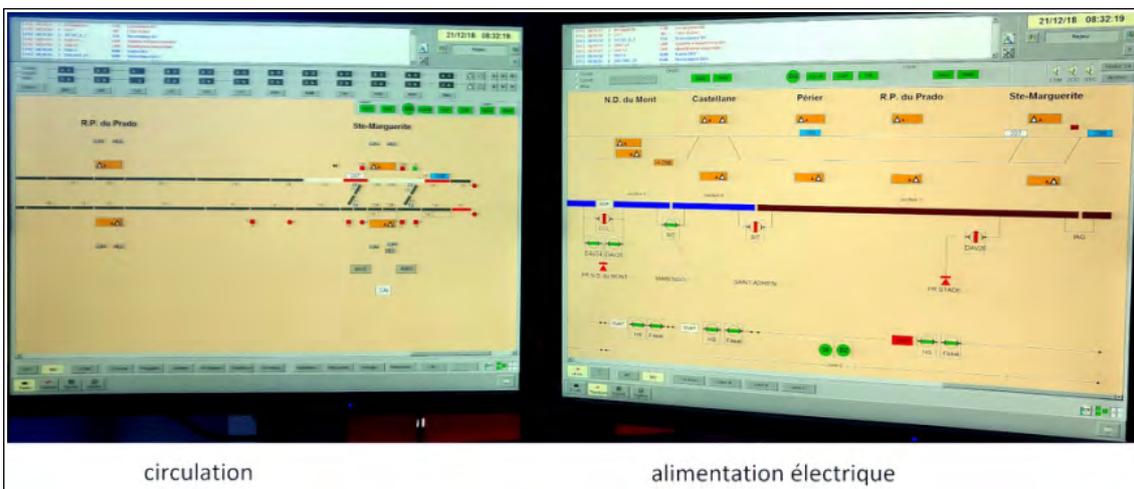


Figure 81 : écran de l'accident du 21 décembre 2018 8 h 32 min 19 s
le régulateur a sécurisé la zone, l'énergie est coupée



Bureau d'Enquêtes sur les Accidents de Transport Terrestre



Grande Arche - Paroi Sud
92055 La Défense cedex

Téléphone : 01 40 81 21 83

Télécopie : 01 40 81 21 50

bea-tt@developpement-durable.gouv.fr

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

