

RAPPORT D'ENQUÊTE TECHNIQUE

sur le tamponnement de deux rames
du métro automatique de Toulouse
survenu à la station « Bagatelle »
le 18 juin 2013

Septembre 2016

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

Affaire n° BEATT-2013-016

**Rapport d'enquête technique
sur le tamponnement de deux rames
du métro automatique de Toulouse
survenu à la station « Bagatelle » le 18 juin 2013**

Bordereau documentaire

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

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

Titre du document : Rapport d'enquête technique sur le tamponnement de deux rames du métro automatique de Toulouse survenu à la station « Bagatelle » le 18 juin 2013

N° ISRN : EQ-BEAT--16-12--FR

Proposition de mots-clés : transport guidé, métro automatique, VAL, tamponnement, collision, adhérence, pneu, pneumatique, piste de roulement

Avertissement

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

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

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

SOMMAIRE

GLOSSAIRE.....	9
RÉSUMÉ.....	11
1 - CONSTATS IMMÉDIATS ET ENGAGEMENT DE L'ENQUÊTE.....	13
1.1 - Les circonstances de l'accident.....	13
1.2 - Le bilan humain et matériel.....	13
1.3 - L'engagement et l'organisation de l'enquête.....	13
2 - CONTEXTE DE L'ACCIDENT.....	15
2.1 - Le réseau de métro de Toulouse.....	15
2.1.1 -Données générales.....	15
2.1.2 -La section de ligne comprise entre les stations « Mirail-Université » et « Bagatelle ».....	16
2.2 - Le fonctionnement du métro automatique de type « VAL ».....	17
2.2.1 -Les rames.....	17
2.2.2 -Les voies.....	17
2.2.3 -Les automatismes.....	18
2.2.4 -Les réseaux de VAL en France.....	19
2.3 - L'adhérence des pneumatiques sur le sol.....	20
3 - COMPTE RENDU DES INVESTIGATIONS EFFECTUÉES.....	23
3.1 - Les résumés des témoignages.....	23
3.1.1 -Le témoignage d'un passager de la rame 39 percutée.....	23
3.1.2 -Le témoignage d'un passager de la rame 18.....	23
3.1.3 -Le témoignage d'un agent en poste au PCC.....	23
3.2 - L'examen des enregistrements et des relevés techniques.....	24
3.2.1 -Les relevés météorologiques.....	24
3.2.2 -Les enregistrements vidéo de la caméra filmant la voie.....	24
3.2.3 -Les enregistrements vidéos des caméras filmant les quais.....	25
3.2.4 -Les enregistrements techniques des automatismes.....	26
3.3 - L'examen des équipements et de leur maintenance.....	28
3.3.1 -L'examen des rames et de leurs pneumatiques.....	28
3.3.2 -L'examen des pistes de roulement.....	29
3.3.3 -L'examen du tunnel.....	31
3.3.4 -L'examen des automatismes.....	31
3.3.5 -L'examen des consignes d'exploitation et de leur application.....	31
3.4 - Conclusions sur les causes directes du tamponnement.....	32
3.5 - Les investigations menées sur l'adhérence.....	32
3.5.1 -L'examen des démonstrations de sécurité initiales.....	32
3.5.2 -Le recensement des autres cas de glissade et d'adhérence insuffisante.....	33

3.5.3 -Les investigations portant sur l'évacuation de l'eau présente sur les pistes de roulement.....	34
3.5.4 -Les essais de reproduction du blocage des roues et de la glissade de la rame.....	36
3.6 - Les investigations menées sur les automatismes.....	38
3.6.1 -L'interruption temporaire du freinage durant la glissade de la rame 18.....	38
3.6.2 -L'absence de l'alarme « station ratée » lors de l'arrêt décalé de la rame 39 à la station « Bagatelle »	38
3.6.3 -L'absence d'alarme lors de l'engagement de la rame 18 sur le canton occupé par la rame 39.....	39
3.6.4 -La transmission différée des alarmes provenant des rames.....	39
3.7 - Les suites données à l'accident.....	40
4 - DÉROULEMENT DE L'ACCIDENT ET DES SECOURS.....	43
4.1 - Le contexte.....	43
4.2 - Le déroulement du tamponnement.....	43
4.3 - Le déroulement de l'alerte et de l'évacuation.....	44
5 - ANALYSE DES CAUSES ET FACTEURS ASSOCIÉS, ORIENTATIONS PRÉVENTIVES.	45
5.1 - L'évacuation de l'eau sur les pistes de roulement.....	46
5.2 - La restauration et le suivi dans le temps de l'adhérence sur les pistes de roulement....	47
5.2.1 -La restauration de l'état de surface des pistes de roulement.....	47
5.2.2 -Le suivi de l'adhérence dans le temps.....	48
5.2.3 -La limitation du blocage des roues.....	49
5.2.4 -L'adhérence des pneumatiques.....	50
6 - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	51
6.1 - Les causes de l'accident.....	51
6.2 - Les recommandations.....	51
ANNEXES.....	53
Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête.....	55
Annexe 2 : Plan d'actions mis en œuvre conjointement par l'exploitant Tisséo et le constructeur Siemens à l'issue de l'accident.....	57

Glossaire

- **ABS** : AntiBlockierSystem
- **ALDC** : Alarme Logique De Canton
- **AOM** : Autorité Organisatrice de la Mobilité
- **AREC** : Antenne de RECEPTION
- **DP** : Détection Positive (boucle à)
- **EAC** : Émetteur Anti-Collision
- **EVAC** : alarme EVACuation
- **FU** : Freinage d'Urgence
- **FNS** : Freinage Normal de Service
- **IFSSTAR** : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux
- **PAE** : Pilotage Automatique Embarqué
- **PAL** : Pilotage Automatique Ligne
- **PCC** : Poste de Commande Centralisé
- **PM** : Point Métrique
- **PN** : Programme Normal
- **PP** : Programme Perturbé
- **Ra** : indice de Rugosité Arithmétique
- **STRMTG** : Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés
- **VAL** : acronyme commercial de Véhicule Automatique Léger

Résumé

Le mardi 18 juin 2013 à 18h33, sur la ligne A du métro automatique sur pneumatiques de Toulouse, à la fin d'un épisode orageux, la rame 18 circulant en direction du terminus « Balma-Gramont » heurte à 10-15 km/h la rame 39 stationnée à la station « Bagatelle », occasionnant trois blessés légers.

La rame 18 effectuait préalablement un freinage normal de service afin de s'arrêter avant le début du canton occupé par la rame 39. Parce qu'elle ne décélérait pas suffisamment rapidement, ses automatismes ont déclenché un freinage d'urgence. Elle était alors en tunnel, sur une portion de voie en pente à 7 %. Ses roues se sont bloquées et elle a glissé sur 170 mètres environ.

La rame 39, quant à elle, stationnait depuis une minute trente-six en attente d'un ordre de redémarrage du PCC après n'avoir pu correctement s'arrêter en station, également à la suite de problèmes d'adhérence.

La cause directe du tamponnement est une adhérence insuffisante des pneumatiques des rames sur les pistes de roulement métalliques mouillées. Trois facteurs ont contribué à cet accident :

- la mauvaise évacuation de l'eau présente sur les pistes, le striage de celles-ci présentant une orientation non favorable et des défauts d'usinage ;
- le polissage des pistes de roulement par le passage répété des rames, réduisant leur rugosité ;
- la sous-estimation des conséquences d'un blocage des roues sur la distance d'arrêt des rames lors des études initiales de sécurité.

Cette analyse conduit le BEA-TT à formuler quatre recommandations et quatre invitations portant sur les thèmes suivants :

- l'amélioration de l'évacuation de l'eau présente sur les pistes de roulement ;
- la restauration et le maintien dans le temps de l'adhérence sur les pistes de roulement.

1 - Constats immédiats et engagement de l'enquête

1.1 - Les circonstances de l'accident

Le mardi 18 juin 2013 à 18h33, sur la ligne A du métro automatique sur pneumatiques de Toulouse, la rame 18 circulant en direction du terminus « Balma-Gramont » heurte à faible vitesse la rame 39 stationnée à la station « Bagatelle ».

1.2 - Le bilan humain et matériel

Les pompiers appelés sur les lieux de l'accident ont recensé trois blessés légers, deux qu'ils ont laissé repartir après les avoir examinés sur place et un qu'ils ont acheminé à l'hôpital pour des examens complémentaires. L'exploitant a par ailleurs reçu les jours suivant l'accident 17 dossiers de voyageurs faisant état de soucis de santé.

Les dégâts matériels sont modérés.

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

Au vu des circonstances de cet accident, le directeur du bureau d'enquêtes sur les accidents de transport terrestre (BEA-TT) a ouvert, le 20 juin 2013, une enquête technique en application des articles L. 1621-1 à 1622-2 du code des transports.

Les enquêteurs techniques du BEA-TT se sont rendus sur place. Ils ont rencontré les représentants de l'autorité organisatrice de la mobilité de l'agglomération toulousaine « Tisséo-SMTC », de l'exploitant du métro automatique de Toulouse, « Tisséo-réseau urbain », de son constructeur, « Siemens Transportation System », du fournisseur de pneumatiques, Michelin, du préfet et du service technique des remontées mécaniques et des transports guidés (STRMTG).

Ils ont eu communication de l'ensemble des pièces et documents nécessaires à leur analyse, notamment le procès-verbal de constatation rédigé par le commissariat central de Toulouse et les rapports d'accident établis par l'exploitant et le constructeur.

Ils ont également participé à des essais visant à reconstituer les phénomènes physiques à l'origine de l'accident et à apprécier, dans différentes configurations, les conditions d'adhérence des pneumatiques de rames de modèles différents sur les pistes de roulement.

2 - Contexte de l'accident

2.1 - Le réseau de métro de Toulouse

2.1.1 - Données générales

Le réseau de métro de l'agglomération toulousaine comprend deux lignes A et B desservant au total 38 stations réparties sur 28 kilomètres. Ses rames sont intégralement automatiques selon la technologie « VAL », acronyme commercial de « véhicule automatique léger ». La ligne A a été mise en service en 1993 entre les stations « Basso-Cambo » et « Jolimont », puis prolongée en 2003 jusqu'au terminus actuel « Balma-Gramont ». La ligne B, quant à elle, a été ouverte en 2007.

L'autorité organisatrice de la mobilité (AOM) en est le syndicat mixte « Tisséo - SMTC », composé de quatre collectivités locales couvrant 99 communes¹. Elle en a confié l'exploitation à la régie sous forme d'établissement public « Tisséo - réseau urbain » employant quelque 1650 personnes. Par commodité, cette entité sera dénommée « l'exploitant Tisséo » dans la suite du rapport.

En 2015, l'exploitant a recensé sur ces deux lignes de métro 107 millions de voyages effectués pour 8 millions de kilomètres parcourus par les rames.

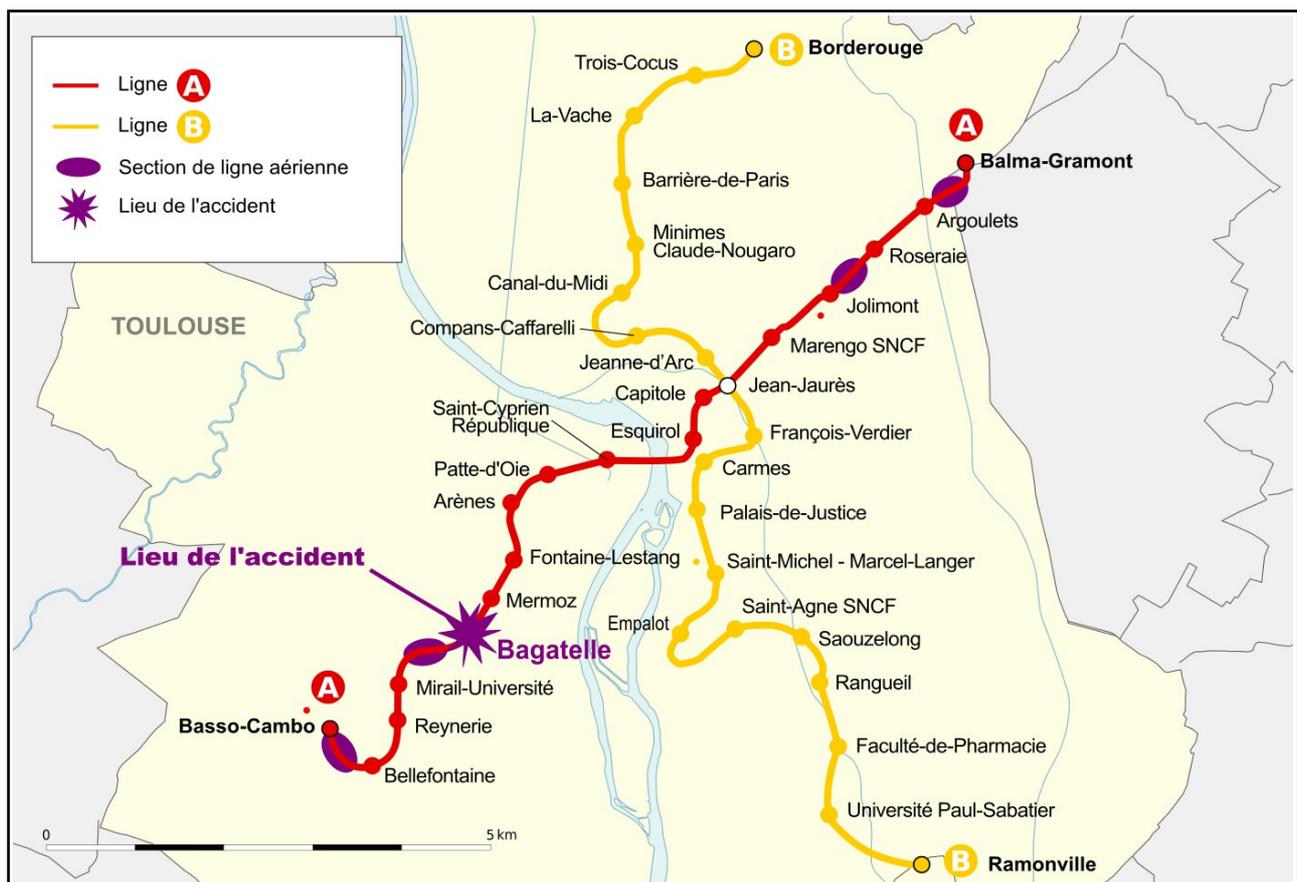


Fig. 1 : Les deux lignes du métro automatique VAL de l'agglomération toulousaine

¹ Ces quatre collectivités sont la communauté urbaine Toulouse métropole, les deux communautés d'agglomération du Sicoval et du Muretain et le syndicat intercommunal des transports de la région toulousaine.

2.1.2 - La section de ligne comprise entre les stations « Mirail-Université » et « Bagatelle »

Les stations « Mirail-Université » et « Bagatelle » sont toutes deux enterrées. Le tracé qui les relie franchit l'autoroute A 620 grâce à un viaduc. De part et d'autre de celui-ci, des trémies métalliques, couvertes mais ouvertes sur les côtés, assurent la transition avec les tunnels rejoignant ces stations. Compte tenu de cette configuration, les pentes atteignent 7 % en tunnel. La longueur de cette interstation est de 1,092 kilomètre, que les rames parcourent en 75 secondes lorsqu'elles sont à la vitesse maximale autorisée.

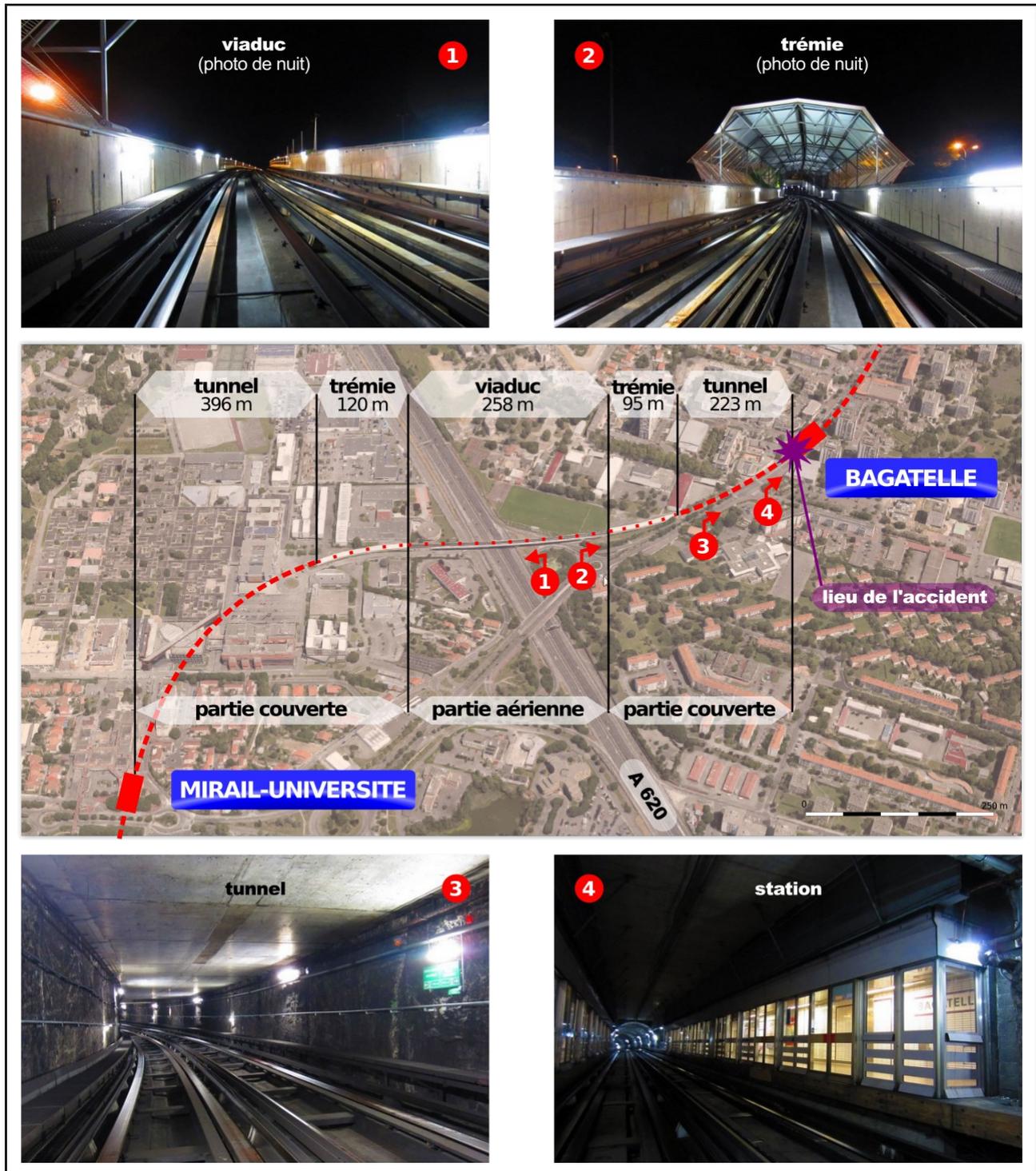


Fig. 2 : La section entre les stations « Mirail-Université » et « Bagatelle »

2.2 - Le fonctionnement du métro automatique de type « VAL »

2.2.1 - Les rames

Chaque rame du métro de Toulouse est composée de deux voitures, reposant chacune sur deux essieux équipés de pneumatiques. Leur longueur totale est de 26,1 m, leur largeur de 2,1 m environ² et leur poids à vide de 31 tonnes. Trois modèles différents circulent à Toulouse :

- 28 rames VAL 206 mises en service en 1993. Elles possèdent notamment un moteur par essieu, soit quatre au total, dont les efforts sont transmis aux deux roues par un différentiel similaire à celui des camions routiers ;
- 14 rames VAL 208 AG (pour ancienne génération) mises en service en 2001-2002. De conception très différente de la précédente génération, elles possèdent notamment un moteur asynchrone par roue, soit huit au total, et n'ont donc pas de différentiel ;
- 74 rames VAL 208 NG (pour nouvelle génération) mises en service en 2007 et 2012, de conception proche de la précédente génération.

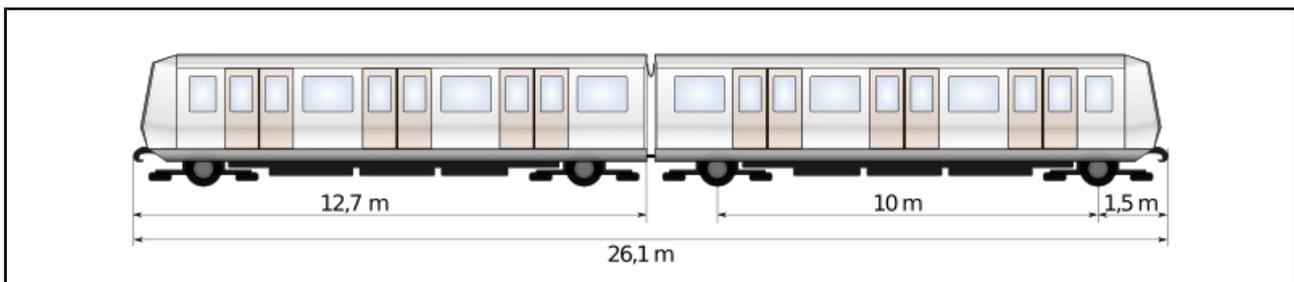


Fig. 3 : Schéma d'une rame VAL 206

Les rames disposent de deux modes de freinage :

- le freinage normal de service (FNS). Il est obtenu par conjugaison d'un freinage mécanique, en serrant des plaquettes sur un disque, et d'un freinage électrique, en renvoyant en ligne l'énergie électrique des moteurs qui fonctionnent alors en générateurs³ ;
- le freinage d'urgence (FU). Il ne recourt qu'aux freins mécaniques et est conçu pour assurer une décélération minimale de 1,8 m/s² sur une section plane. Des décélérostats limitent⁴ en outre cette décélération à 2,4 m/s².

2.2.2 - Les voies

Les rames roulent sur des pistes de roulement. Il s'agit de profilés métalliques en forme de H renversé, comme l'illustre la figure ci-après. La surface de roulement présente une largeur de 25 cm et peut accuser un léger creux de part et d'autre de l'âme, d'une profondeur maximale de 0,8 mm. Elle a fait l'objet des traitements suivants :

- un grenailage (par l'envoi à forte vitesse de petites billes d'acier créant un micro-relief) afin, d'une part, d'enlever la calamine qui s'est formée lors de la fabrication, et, d'autre part, de créer une rugosité favorisant l'adhérence des pneumatiques ;

² La largeur donne son nom à la génération de matériel : elle est de 206 cm pour le VAL 206 et de 208 cm pour le VAL 208.

³ Cette conjugaison est effective entre 3 et 23 km/h. Au-dessus, seul le freinage électrique est commandé, en dessous, seul le freinage mécanique agit.

⁴ Dès que ces décélérostats détectent une décélération instantanée supérieure à ce seuil, ils empêchent les freins mécaniques de délivrer un effort de freinage plus important.

- un striage pour les seules pistes situées à l'air libre ou en entrée de tunnel⁵, afin d'améliorer l'adhérence par temps de pluie. Vues de dessus, les stries se présentent sous forme d'arcs de cercles espacés de 8 mm orientés dans le sens de déplacement de la rame. Leur profil forme un « v » d'une profondeur comprise entre 1 et 1,5 mm au centre.

Ces pistes de roulement sont interrompues régulièrement. La longueur vide entre deux pistes bout à bout est de deux centimètres, et est dénommée « joint d'éclisse ». Il existe ainsi quatre joints d'éclisse sur les 223 mètres du tunnel précédant la station « Bagatelle ».

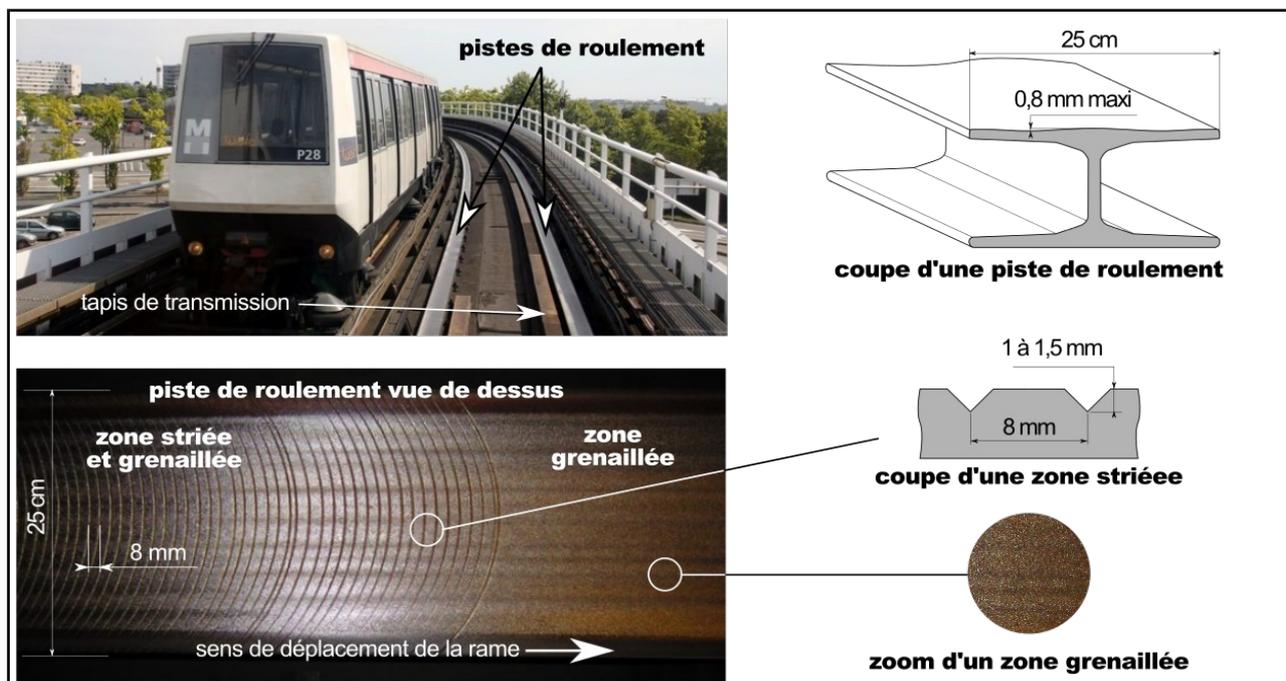


Fig. 4 : Les pistes de roulement et les traitements de leur surface

2.2.3 - Les automatismes

Pour éviter toute collision entre deux rames qui se suivent, la ligne est divisée en cantons, et aucune rame ne pourra pénétrer sur l'un d'eux s'il est déjà occupé. Pour détecter qu'une rame occupe un canton, chacune d'elles est équipée d'une balise dite « EAC » (émetteur anti-collision) qui émet continûment un signal capté par une antenne réceptrice dite « boucle DP » (détection positive) courant sur toute la longueur de ce canton⁶.

La vitesse que doit respecter une rame lui est indiquée par une information provenant d'un tapis de transmission implanté sur tout le long de la ligne entre les deux pistes de roulement, tel qu'indiqué à la figure 4⁷. Deux profils de vitesse ont été définis, le programme

5 Sur la portion de ligne entre la station « Jolimont » et le terminus « Balma-Gramont » mise en service en 2003, les pistes ont été striées sur toute leur longueur, qu'elles soient en tunnel ou en aérien.

6 Une boucle DP' de courte longueur, à cheval sur deux cantons, permet de s'assurer du bon passage d'une rame d'un canton à l'autre.

7 Un fil électrique, dont les deux brins sont régulièrement entrecroisés de façon à former régulièrement des boucles, est implanté dans ce tapis. Chaque boucle crée un champ électro-magnétique de polarité opposée à ses voisines, que détectent les rames, grâce leur balise dite « AREC » (antennes de réception) placée sous leur châssis. Elles régulent leur vitesse de sorte à parcourir ces boucles en 300 ms : si elles mettent moins de temps, elles ralentissent, si elles en mettent plus, elles accélèrent. Le profil de vitesse que l'on souhaite donner aux rames tout au long de la ligne est ainsi déterminé en jouant sur la longueur des boucles au sol. Le tapis de transmission contient deux nappes de fils, l'un correspondant au programme normal PN, l'autre au programme perturbé PP. Il s'agit donc d'un asservissement de vitesse à partir des consignes de vitesse. L'asservissement en station est toutefois différent, une précision plus grande étant nécessaire afin de faire coïncider les portes de la rame aux portes des quais (il s'agit alors d'un asservissement de position appliqué dès que la rame passe au-dessus d'une balise marquant l'arrivée de la station).

dit normal « PN » et le programme dit perturbé « PP ». Lorsqu'une rame s'engage sur un canton, les automatismes lui commandent de respecter :

- soit le programme normal si le canton suivant est libre. Ils lui font ainsi franchir le canton sans s'arrêter dès lors qu'il n'y a pas de station ;
- soit le programme perturbé si le canton suivant est occupé. Ils font alors s'arrêter la rame à une distance de sécurité « d » avant le début du canton suivant, et elle ne repartira pas tant que celui-ci ne sera pas libéré.

La distance de sécurité « d » est déterminée pour chaque canton de sorte à être au moins égale à la distance de freinage d'une rame décélérant à $1,8 \text{ m/s}^2$ en tenant compte des effets de la pente⁸.

Par ailleurs, si les automatismes détectent qu'une rame dépasse de plus de 10 % la vitesse qui lui est commandée, ils déclenchent un freinage d'urgence.

La vitesse maximale que les automatismes peuvent commander aux rames est, sur l'interstation « Mirail-Université » / « Bagatelle », de 64 km/h si elles respectent leur horaire, ou de 75 km/h si elles sont en retard de plus de quelques secondes.

La figure ci-après schématise les quatre cantons, les profils de vitesse des programmes normal et perturbé entre les stations « Mirail-Université » et « Bagatelle », ainsi que le comportement des rames selon l'occupation des cantons.

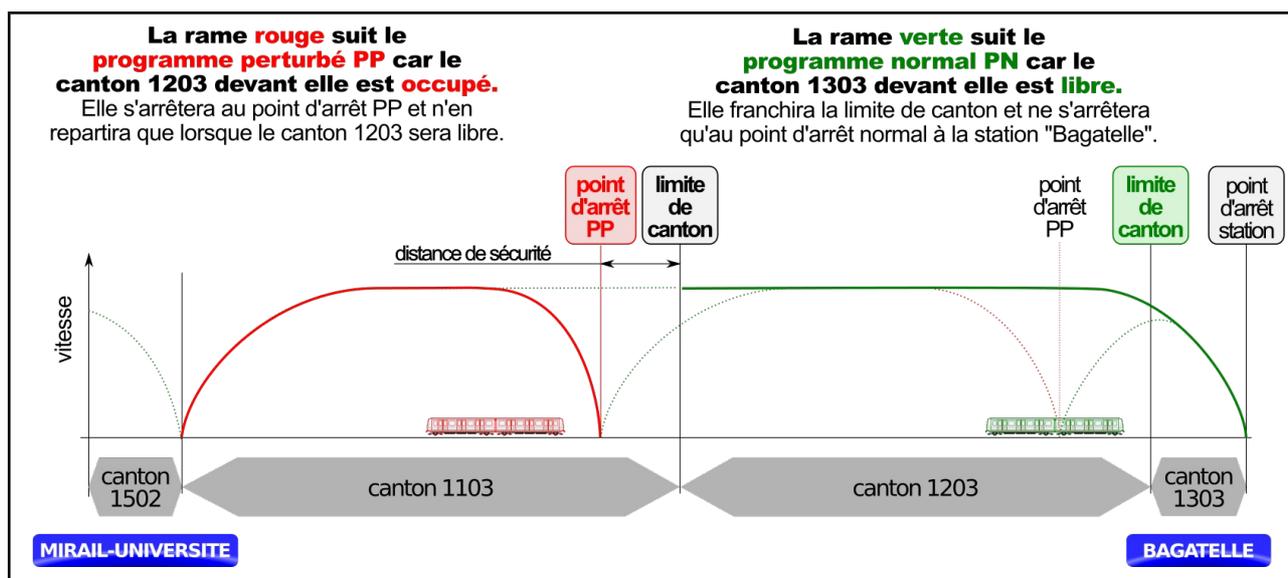


Fig. 5 : Schéma des cantons et des programmes normal (PN) et perturbé (PP) de l'interstation « Mirail-Université » - « Bagatelle »

2.2.4 - Les réseaux de VAL en France

Outre celui de Toulouse, il existe à ce jour quatre autres réseaux de métro « VAL » en France, présentés ci-après par ordre d'ancienneté :

- le réseau de Lille, cumulant 44 km sur deux lignes et exploitant des rames VAL 206 et VAL 208 AG. Il comprend aussi bien des parties en tunnel qu'aériennes, et présente la particularité d'avoir des portions de pistes de roulement en béton ;

8 Pour connaître la décélération d'un mobile sur une pente constante, il convient de retrancher dix fois la valeur de la pente (exprimée en pourcentage) à la décélération qu'il a dans les mêmes conditions sur section plane (il s'agit cependant d'une approximation valant pour les pentes inférieures à 17 %). Ainsi, une rame ayant une décélération de $1,8 \text{ m/s}^2$ sur une section plane, aura une décélération de $1,1 \text{ m/s}^2$ ($1,8 - 10 \times 0,07$) sur une pente à 7 %.

- la ligne Orlyval de 7 km exploitée exclusivement avec du matériel VAL 206 circulant sur une longue portion aérienne et quelques parties en tunnel ;
- la ligne de Rennes, de 9 km, en tunnel et en aérien, exploitée avec les deux générations de matériel roulant VAL 208 ;
- le réseau de Roissy, qui comprend 2 lignes représentant 4 km, exploités avec la nouvelle génération de VAL 208. Elle comprend des parties aériennes et en tunnel.

2.3 - L'adhérence des pneumatiques sur le sol

La bande de roulement d'un pneumatique est constitué de caoutchouc, dont les propriétés visco-élastiques permettent l'adhérence sur sa surface de roulement au travers de deux mécanismes :

- l'adhésion : quand le pneumatique est en contact direct avec le sol, des liaisons moléculaires entre le caoutchouc et le matériau du sol se créent, puis s'étirent et se rompent en fonction de son avancement, générant ainsi une force de frottement qui s'oppose au glissement. Toutefois, en présence d'une pellicule d'eau, même de quelques microns, ce mécanisme devient inopérant ;
- l'indentation : en présence de rugosités du sol, la gomme caoutchouteuse vient buter contre l'aspérité, se déforme localement mais ne reprend pas immédiatement sa forme. Cette déformation dissymétrique génère une force qui s'oppose au glissement.

Par temps de pluie, la rugosité du matériau sur lequel roule le pneumatique revêt une grande importance :

- la micro-rugosité, en créant des pressions locales élevées entre le sol et le pneumatique, aide à transpercer le film d'eau et à restaurer, à ces endroits, le phénomène d'adhésion ;
- la macro-rugosité (de 0,2 mm à 1 cm), permet le phénomène d'indentation, et favorise le stockage et le drainage de l'eau.

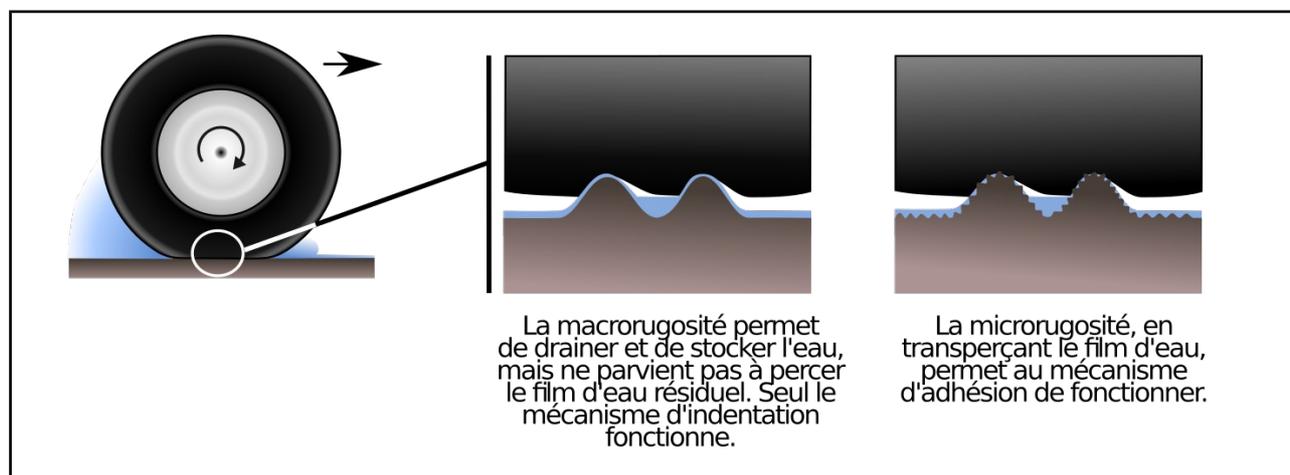


Fig. 6 : Le rôle de la macro et de la micro-rugosité dans l'adhérence du pneumatique sur le sol

Le grenailage des pistes de roulement métalliques peut être assimilé à la micro-rugosité, et leur striage à la macro-rugosité.

Le pneumatique joue également un rôle très important par temps de pluie, en évacuant le bourrelet d'eau qui se forme devant lui au fur et à mesure qu'il avance, grâce notamment aux sculptures de sa bande de roulement. Lorsqu'il n'y parvient plus, il se produit alors le phénomène d'hydroplanage.

La pression de gonflage du pneumatique et la vitesse du véhicule ont une grande influence dans la survenue de ce phénomène. Ainsi, pour une pression de gonflage de 11 bars comme sur les rames du métro VAL, il ne se produira pas avant une vitesse de 150 km/h, largement supérieure aux performances des métros. Ce phénomène n'entre donc pas en jeu dans le présent accident.

3 - Compte rendu des investigations effectuées

3.1 - Les résumés des témoignages

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 ont paru 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 ou entre ces déclarations et des constats ou analyses présentés par ailleurs.

3.1.1 - *Le témoignage d'un passager de la rame 39 percutée*

Un passager de la rame 39 percutée relate qu'elle a freiné de manière assez brusque à l'arrivée à la station « Bagatelle » et s'est arrêtée un peu avant les portes des quais. Elle a ensuite redémarré, mais s'est alors arrêtée un peu après ces portes. Il a ensuite ressenti un choc qu'il qualifie de « très violent » lorsque la rame a été percutée par la suivante et quelques personnes sont tombées. Il a tiré un signal d'alarme puis, avec d'autres voyageurs, a ouvert manuellement les portes pour sortir.

Il se souvient qu'une forte averse de grêle a eu lieu alors qu'il a pris place dans la rame au terminus « Basso-Cambo », et il lui semble qu'il pleuvait encore quand elle a franchi la partie en viaduc précédant la station « Bagatelle ».

3.1.2 - *Le témoignage d'un passager de la rame 18*

Un passager de la rame 18 rapporte que, dans le tunnel précédant la station « Bagatelle », juste après la trémie, il a simultanément remarqué « une absence de vibration » et entendu « un bruit de glissement, un son continu » qu'il a comparé à des roues bloquées sur une route mouillée. Il n'y a alors eu aucun freinage brutal ni à-coup avant le choc « brusque et net », qui l'a fortement déséquilibré. Dans sa chute, il a heurté une barre de maintien et a été « sonné » pendant une vingtaine de secondes. Il est ensuite sorti de la rame après que deux usagers, l'un dans la rame, l'autre à l'extérieur, ont ouvert les portes manuellement. Il a alors été conduit hors de la station par des agents de l'exploitant.

Il se souvient qu'au moment où la rame passait sur le viaduc, il n'y avait plus ni grêle, ni pluie forte, mais il ne peut cependant garantir qu'il ne pleuvait pas légèrement.

3.1.3 - *Le témoignage d'un agent en poste au PCC*

L'agent en poste au PCC en charge du mouvement des rames sur la ligne A retrace les événements suivants, sans en garantir l'exhaustivité ni l'ordre de déroulement. : vers 18h20, il est en train de gérer une rame restée à quai sans avoir déclenché d'alarme, à la station « Capitole ».

Quelques alarmes signalent alors le patinage ou l'enrayage⁹ des roues de rames situées dans les parties aériennes entre les stations « Basso-Cambo » et « Bagatelle ». Voyant un temps d'orage par la fenêtre du PCC, ces alarmes ne le surprennent pas, car il est arrivé qu'une quinzaine se déclenche en un quart d'heure lors de grosses pluies.

⁹ Une roue patine lorsqu'au cours d'une accélération, elle tourne sensiblement plus vite que la rame n'avance. Une roue s'enraye lorsqu'au cours d'un freinage, elle tourne sensiblement moins vite que la rame n'avance (cet enrayage peut aller jusqu'au blocage de la roue). De tels phénomènes se produisent lorsque l'adhérence sollicitée par le freinage ou l'accélération est supérieure à l'adhérence disponible, et se traduisent par des glissements au niveau de la surface de contact entre la roue et le rail. Sur les rames VAL 206 de Toulouse, les automatismes déclenchent une alarme « patinage-enrayage » dès que la différence de rotation des deux essieux d'une même voiture conduirait à un écart de vitesse linéaire de plus de 5 km/h.

Il gère, peu après, la rame 18 incorrectement arrêtée à la station « Bellefontaine » qui n'a donc pas ouvert ses portes pour permettre l'échange voyageurs : il lui faut informer ses passagers et lui donner un ordre de redémarrage. Il s'occupe également d'alarmes liées aux portes des quais d'une ou deux stations de la partie centrale de la ligne. Il prend connaissance d'une alarme de freinage d'urgence de la rame 39 incorrectement arrêtée à la station « Bagatelle » et qui n'a pas effectué son échange voyageur, et lui donne l'ordre de redémarrage.

Puis, quasi-simultanément, plusieurs alarmes se déclenchent touchant les rames 18 et 39 et la station « Bagatelle », qui lui signalent notamment l'actionnement des poignées de secours à l'intérieur des deux rames pour en ouvrir les portes, la rupture d'un attelage et la détection d'un obstacle sur la voie. Il pense d'abord à des évacuations de voyageurs en ligne à la suite d'un arrêt inopiné des rames, et prend conscience qu'elles se sont tamponnées en visionnant les enregistrements vidéos.

Un opérateur supplémentaire est sollicité et des agents sont envoyés sur place. Le PCC organise alors l'évacuation des rames bloquées en interstation ainsi que l'exploitation partielle de la ligne entre les stations « Balma-Gramont » et « Arènes ».

3.2 - L'examen des enregistrements et des relevés techniques

3.2.1 - Les relevés météorologiques

Le 18 juin 2013, le ciel a été couvert toute la journée sur Toulouse. Une pluie modérée est tombée la nuit jusqu'à 7 heures, puis à quelques reprises par intermittence par la suite. La température a varié entre 16 et 24 °C et la vitesse moyenne du vent entre 2 et 30 km/h.

Aux alentours de 18h20, un violent et court orage a éclaté, dont les cinq premières minutes ont été les plus intenses : l'équivalent de 7 mm d'eau est ainsi tombé, porté par un vent venant de l'Est. Les cinq minutes suivantes ont été sensiblement plus modérées, représentant 0,6 mm d'eau. L'évolution de la pluviométrie en fonction du temps est présenté à la figure 7 ci-après¹⁰.

La durée de retour d'un tel orage, c'est-à-dire l'intervalle de temps moyen entre deux événements similaires, a été estimé par Météo-France de l'ordre de 2 à 3 ans¹¹.

3.2.2 - Les enregistrements vidéo de la caméra filmant la voie

Une caméra est implantée à l'intérieur de la trémie, orientée vers la station « Mirail-Université ». L'examen de ses enregistrements montre que, sur les lieux de l'accident, l'épisode orageux a débuté à 18h27. De la grêle est d'abord tombée pendant environ 35 secondes, avant de laisser place à de la pluie. Les cinq rames ci-après ont franchi le viaduc et se sont engagées dans la trémie durant cet période :

- la rame 1 approche à 18h26'46". L'orage n'a pas encore débuté ;
- la rame 72 arrive à 18h28'06". La grêle vient de cesser et la pluie est encore modérée, un faible écoulement d'eau se distingue entre les pistes de roulement ;
- la rame 38 passe à 18h29'19". La pluie est alors à son maximum, l'eau s'évacue vivement sur la plate-forme. Un film d'eau formant des vaguelettes se distingue sur les pistes de roulement de la voie la plus proche de la caméra ;

¹⁰ Trois stations météorologiques sont proches des lieux de l'accident : Toulouse-ENM à 3 km à l'Est, Toulouse-Blagnac à 6 km au Nord-Est et Toulouse-Francazal à 5 km au Sud-Est. Les données mentionnées sont celles de la station Toulouse-ENM, dont sa proximité et sa localisation par rapport à la direction du vent lors de l'épisode orageux permettent de considérer qu'elles sont raisonnablement représentatives de la pluviométrie sur les lieux mêmes de l'accident.

¹¹ L'épisode pris en compte est une forte précipitation de 7 mm d'eau en 6 minutes, établi à partir des statistiques sur la période 1966-2011 pour la région de Toulouse en utilisant la loi GEV (Généralized Extreme Value distribution, ou loi généralisée des extrêmes).

- la rame 39 (percutée) est filmée à 18h31'14". La pluie diminue, le brouillard d'eau soulevé après le passage de la rame est moins important que celui des rames précédentes. Le film d'eau formant des vaguelettes sur les pistes de roulement n'apparaît plus après le passage de cette rame ;
- la rame 18 approche à 18h33'00". La pluie est faible, de l'eau ruisselle encore sur la plate-forme, mais on ne distingue plus de film d'eau sur les pistes de roulement elles-mêmes.

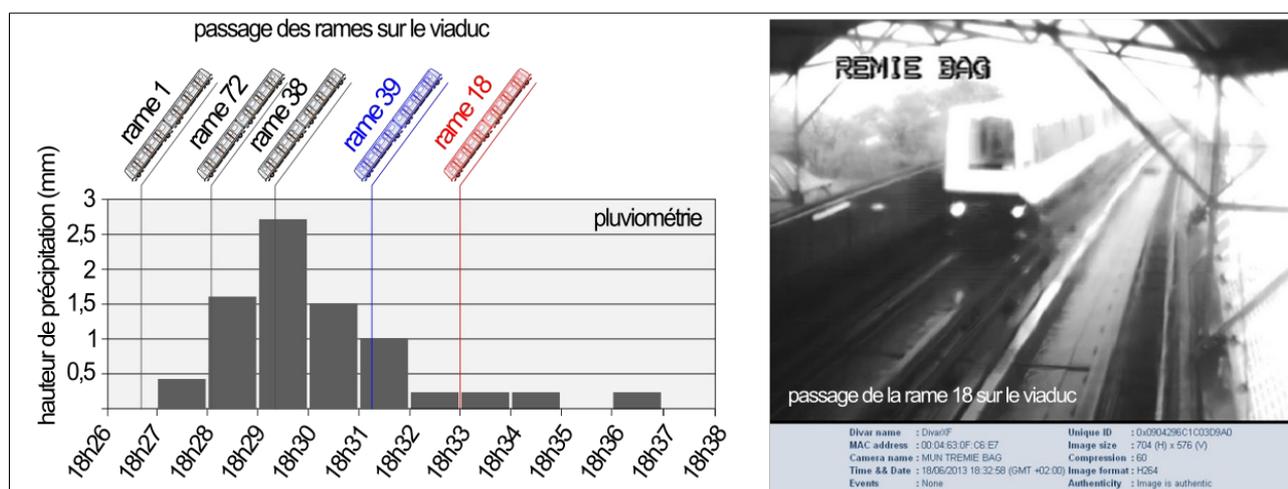


Fig. 7 : La pluviométrie au moment du passage des rames sur le viaduc

3.2.3 - Les enregistrements vidéos des caméras filmant les quais

Chaque quai de la station « Bagatelle » est filmé par deux caméras situées à leurs deux extrémités. Leurs enregistrements permettent de retracer les événements suivants :

- à 18h31'37", la rame 39 arrive en station, mais s'arrête trois portes palières avant son point d'arrêt normal, soit environ 10 mètres. Elle redémarre quasi-immédiatement à très faible vitesse ;
- à 18h31'39", elle s'arrête environ un mètre après son point d'arrêt normal, et n'ouvre pas ses portes ;
- à 18h33'23", la rame 18 percute la rame 39, et la fait brutalement avancer d'environ un mètre ;
- à 18h33'35", un usager sur le quai alerte le PCC à partir de la borne d'urgence ;
- à 18h33'43", les premiers voyageurs sortent de la rame 18 et se dirigent vers la station par le trottoir d'évacuation ;
- à 18h33'48", les premiers voyageurs de la rame 18 ouvrent les portes de fin de quai et arrivent sur le quai ;
- à 18h33'53", les premiers voyageurs de la rame 39 ouvrent les portes des quais et sortent ;
- à 18h36'35", un agent d'exploitation arrive et commence à canaliser les voyageurs ;
- à 18h39'53", soit six minutes trente après le choc, tous les voyageurs ont évacué les quais.

Ces enregistrements permettent également d'estimer que la vitesse de la rame 18 est comprise entre 10 et 15 km/h au moment du choc.

Ils montrent en outre que 31 voyageurs étaient présents dans la rame 18, et environ 88 occupaient la rame 39 percutée.

3.2.4 - Les enregistrements techniques des automatismes

Le PCC reçoit les informations des automatismes de la ligne et des rames, et enregistre certaines, telles que l'occupation des cantons, les alarmes du système et les commandes passées par les opérateurs. Lorsqu'une rame connaît un dysfonctionnement, l'information est transmise sur l'écran de l'opérateur au PCC sous deux formes : d'une part, une alarme s'affiche et, d'autre part, une fenêtre appelé « piège » est créée dans laquelle sont regroupées les informations pertinentes sur la cause de l'alarme et sur l'état de la rame. L'heure à laquelle s'affiche l'alarme et l'heure à laquelle l'opérateur consulte la fenêtre correspondante sont enregistrées.

Le tableau présente les enregistrements réalisés par le PCC. Il est limité aux seules rames **18** (en rouge) et **39** (en violet) et ne reprend que les éléments principaux en lien avec l'accident¹².

Heure ¹³	Temps avant ou après choc	Événement
18h27'01"	-6'22"	La rame 39 part du terminus « Basso-Cambo » avec 1' de retard sur son horaire.
18h27'58"	-5'25"	La rame 18 part du terminus « Basso-Cambo » avec 1' de retard sur son horaire.
18h28'15"	-5'08"	La rame 39 part de la station « Bellefontaine » avec 55" de retard sur son horaire.
18h28'49"	-4'34"	La rame 18 génère au PCC une alarme « patinage-enrayage » à l'approche de la station « Bellefontaine » et déclenche un freinage d'urgence. Le piège correspondant sera examiné par l'agent au PCC 33" plus tard.
18h28'55"	-4'28"	La rame 18 génère au PCC un piège « station ratée » à la station « Bellefontaine » après avoir dépassé son point d'arrêt. Elle n'ouvre pas ses portes et ne repart donc pas en l'attente d'un ordre du PCC.
18h29'25"	-3'58"	La rame 39 part de la station « Reynerie » avec 50" de retard sur son horaire.
18h29'54"	-3'29"	L'opérateur PCC commande le redémarrage de la rame 18 bloquée à la station « Bellefontaine », après avoir informé les voyageurs par phonie de l'arrêt manqué.
18h30'29"	-2'54"	La rame 39 part de la station « Mirail-Université » avec 42" de retard sur son horaire.
18h31'13"	-2'10"	La rame 18 part de la station « Reynerie » avec 1'20" de retard sur son horaire.
18h31'38"	-1'45"	La rame 39 génère au PCC une alarme « patinage-enrayage » puis déclenche un freinage d'urgence par survitesse. Elle est alors sur le canton 1203 situé avant la station « Bagatelle » (l'opérateur consultera le piège une minute plus tard).
18h31'47"	-1'36"	La rame 39 génère au PCC un piège « station ratée » à la station « Bagatelle », n'ouvre pas ses portes et ne repart donc pas en l'attente d'un ordre du PCC.
18h32'15"	-1'08"	La rame 18 part de la station « Mirail-Université » avec 1'15" de retard sur son horaire.
18h33'12"	-11"	La rame 18 déclenche un freinage d'urgence et génère une alarme et un piège au PCC. Elle est alors sur le canton 1203 situé juste avant le canton de la station « Bagatelle ».
18h33'23"	0"	L'opérateur au PCC commande le redémarrage de la rame 39 bloquée à la station « Bagatelle » après son arrêt manqué.
18h33'23"	Choc	(l'instant du choc a été déterminé à partir des vidéos, dont les horloges sont calées sur celles du PCC)

¹² Il ne présente donc pas toutes les alarmes déclenchées ni les actions menées concernant d'autres rames ou équipements, par les agents de PCC, on ne saurait en déduire la charge de travail de ces agents.

¹³ Les automatismes datent les événements à l'heure de la réception de l'information au PCC et non à l'heure d'émission. Il peut y avoir une différence allant jusqu'à 4,7 secondes entre le moment où elle est émise et celui où elle est reçue.

Heure ¹⁴	Temps avant ou après choc	Événement
18h33'24"	+1"	La rame 39 génère une alarme et un piège « détection d'obstacle sur la voie » (DOV) ¹⁵ lorsque la rame 18 la percute.
18h33'31"	+8"	Les automatismes au sol génèrent au PCC une alarme « logique de canton » (ALDC). Ce point sera approfondi au paragraphe 3.6.
18h33'33"	+10"	La rame 39 génère une alarme « évacuation » (EVAC) après l'actionnement par ses voyageurs d'une ou de plusieurs poignées d'évacuation.
18h33'35"	+12"	Des passagers de la rame 39 tentent de joindre le PCC par la phonie. L'opérateur en communication avec une autre rame ne peut leur répondre.
18h33'35"	+12"	L'information « présence tension » disparaît au PCC après la coupure de l'alimentation de traction (cette coupure est automatique lors de l'actionnement d'une poignée d'évacuation).
18h33'37"	+14"	La rame 18 génère une alarme « évacuation » (EVAC) après l'actionnement par ses voyageurs d'une ou de plusieurs poignées d'évacuation.
18h33'41"	+18"	Des passagers de la rame 18 tentent de joindre le PCC par la phonie. L'opérateur en communication avec une autre rame ne peut leur répondre.

Fig. 8 : Principaux événements en lien avec l'accident et enregistrés par les automatismes

La fenêtre enregistrée lorsque la rame 18 a déclenché un freinage d'urgence à 18h33'12", est reproduit à la figure suivante.

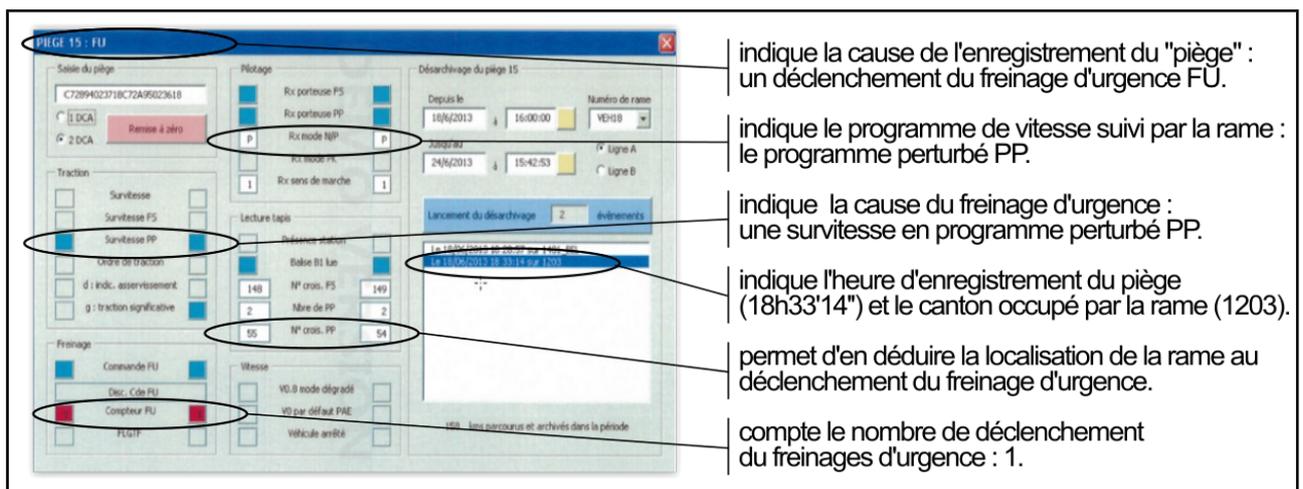


Fig. 9 : Données enregistrées par les automatismes lors du freinage d'urgence de la rame 18

Cette fenêtre permet de préciser les éléments suivants :

- la rame suivait le programme perturbé « PP ». Les automatismes avaient bien détecté que le canton de la station « Bagatelle » était occupé, et elle était donc dans une phase de freinage normal de service (FNS) en vue de s'arrêter au point d'arrêt « PP » avant la fin du canton ;
- le freinage d'urgence s'est déclenché alors que la face avant de la rame était entre les points métriques 3036 et 3040. Elle était donc entièrement en tunnel, sur la pente à 7 %, en alignement droit. L'arrière de la rame 39 était de ce fait entre 168 et 172 mètres devant elle ;

14 Les automatismes datent les événements à l'heure de la réception de l'information au PCC et non à l'heure d'émission. Il peut y avoir une différence allant jusqu'à 4,7 secondes entre le moment où elle est émise et celui où elle est reçue.

15 Les détecteurs d'obstacle sur la voie sont des capteurs situés au niveau des faces avant et arrière des rames et se déclenchent lorsque la rame percute (ou est percutee par) un élément.

- le freinage d'urgence s'est déclenché parce que la rame était en survitesse, c'est-à-dire qu'elle venait de dépasser de plus de 10 % la vitesse imposée par le programme perturbé à cet endroit (49 km/h). Sa vitesse était donc au minimum de 54 km/h.

Par ailleurs, sur cette photo, le compteur du nombre de freinages d'urgence déclenchés s'est correctement incrémenté à la valeur 1. Cependant, ce compteur a été constaté à la valeur 2 après le choc, suggérant qu'il ait pu y avoir une interruption et une réactivation du freinage durant la glissade de la rame. Ce point sera détaillé au paragraphe 3.6.

3.3 - L'examen des équipements et de leur maintenance

3.3.1 - L'examen des rames et de leurs pneumatiques

Les huit pneumatiques porteurs de la rame 18 ont été expertisés par leur fournisseur Michelin, en septembre 2013 et en mars 2014. Ils comportent tous une même zone de 14 à 22 cm de long et de 15 cm de large sur laquelle la gomme a été abrasée, arrachée et s'est cloquée. Une partie de cette gomme s'est agglomérée en extrémité de cette zone et les marques du striage de la piste de roulement sont visibles sur certains pneumatiques.

Ces dommages témoignent de fortes températures en surface et de contraintes longitudinales excessives. Ils sont, sans conteste, dus à un glissement des pneumatiques sur les pistes de roulement avec des roues bloquées.



Fig. 10 : Dégâts occasionnés sur le pneumatique avant droit de la rame 18

Ces pneumatiques sont du modèle 345/85R16 XP2, correspondant au modèle prévu à l'origine de la ligne, ils sont gonflés à l'azote, à la pression nominale théorique de 11 bars. Ils ont été fabriqués entre 2008 et 2010. Ils ont roulé entre 70 548 et 219 048 km, et aucun n'avait atteint ses critères de réforme, ni en termes d'usure ou de défaut, ni au regard du kilométrage parcouru, la limite étant de 250 000 km.

La rame 18, et en particulier ses dispositifs de freinage, a été examinée, et aucun dysfonctionnement ni défaut autres que ceux imputables au tamponnement n'ont été décelés. Elle avait parcouru 1 576 860 km et sa dernière révision a eu lieu le 3 juin 2013, au cours de laquelle ses plaquettes et disques de frein ont été vérifiés : aucun n'avait atteint ses cotes de changement.

La rame 39, tamponnée, du modèle VAL 208 AG, avait parcouru 789 399 km au moment de l'accident. Sa dernière opération de maintenance préventive a été réalisée le 2 mai 2013.

3.3.2 - *L'examen des pistes de roulement*

Les pistes de roulement de la ligne A sont d'origine. Entre les stations « Mirail-Université » et « Bagatelle », elles avaient donc 20 ans au moment de l'accident, et n'avaient été ni re-striées, ni re-grenaillées. À la station « Bagatelle », elles avaient été re-grenaillées en 2012.

Le profil

Leur profil montre deux creux de part et d'autre de l'âme, d'une profondeur moyenne de 0,3 mm, allant jusqu'à 0,6 mm pour la portion de piste située en milieu de tunnel, la valeur maximale admise à la fabrication étant de 0,8 mm.

La rugosité

Pour spécifier la rugosité d'une surface, on utilise fréquemment l'indice Ra, exprimé en μm : c'est la moyenne arithmétique des écarts (en valeur absolue) entre la ligne moyenne de la surface et ses aspérités et cavités. Plus la valeur du Ra est élevée, plus la surface est rugueuse¹⁶.

Pour la surface de roulement des pistes, le constructeur a spécifié à la fabrication un Ra compris entre 12,5 μm et 25 μm . Ces valeurs ne semblent cependant pas avoir été vérifiées lors de la mise en service. Les indices mesurés après l'accident sont les suivants :

- un Ra de 6,4 μm au point haut du viaduc (PM 2740), dans une zone où ni le programme normal ni le programme perturbé n'impose le freinage ;
- un Ra de 3,2 μm à l'endroit du freinage d'urgence (PM 3036), dans une zone où seul le programme perturbé impose un freinage, ainsi qu'à une centaine de mètres plus loin (PM 3137) où les deux programmes normal et perturbé imposent un freinage¹⁷ ;
- un Ra compris entre 3,2 et 6,4 μm en entrée de station (PM 3201), dans une zone où la rame est en freinage à basse vitesse ;
- un Ra compris entre 12,5 et 25 μm toujours en entrée de station (PM 3203), mais dans la zone re-grenaillée en 2012.

Le passage répété des rames sur les pistes de roulement les a progressivement polies de manière non uniforme, notamment dans les zones de forts freinages.

Le striage

Sur toute la zone examinée par les enquêteurs, entre le point haut du viaduc et la station « Bagatelle », les pistes de roulement présentent en de nombreux endroits des défauts de striage qui remontent à la fabrication : plusieurs stries ne débouchent pas, des portions de piste présentent des bandes non striées, la profondeur des stries est fréquemment inférieure 1 millimètre, seuil minimal spécifié à la fabrication. Ces défauts sont illustrés à la figure ci-après.

16 À titre d'illustration, un usinage ordinaire procure un Ra de l'ordre de 3,2 μm , un usinage fin de l'ordre de 0,8 μm et un polissage de l'ordre de 0,2 μm .

17 Lorsque l'on fait glisser son pied sur la piste de roulement sèche, des chaussures avec des semelles élastomères ordinaires accrochent sur zone re-grenaillée possédant un Ra entre 12,5 et 25 μm , et glissent sur la zone avec un Ra de 3,2 μm .

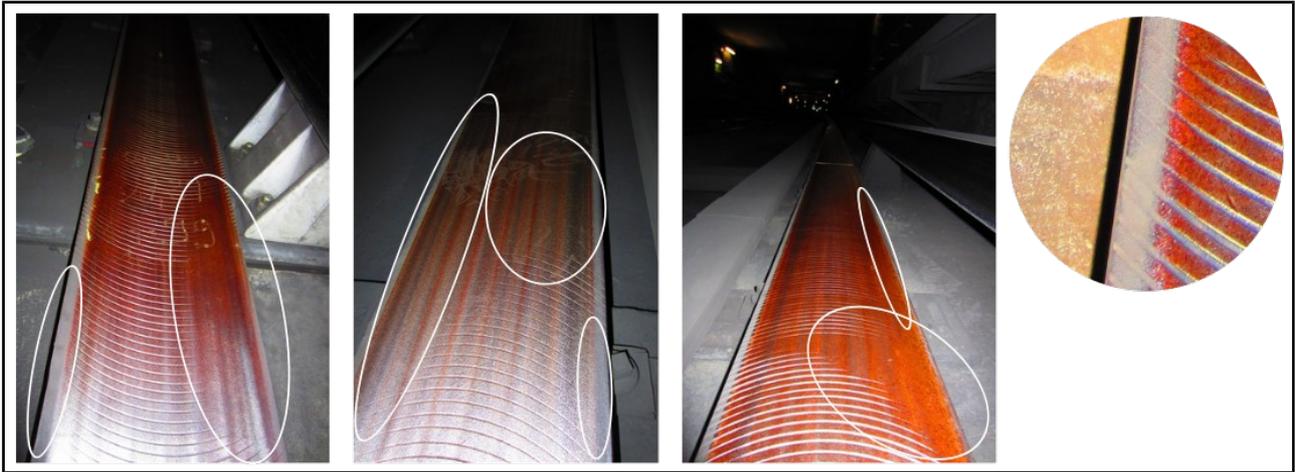


Fig. 11 : Défaits des pistes de roulement et colmatage des stries dans l'interstation « Mirail-Université » - « Bagatelle »

Ces défauts ne sont pas propres à cette portion. Un relevé réalisé par l'exploitant après l'accident montre que, sur les sections de voie aériennes et en pente mises en service en 1993, la profondeur moyenne des stries est de 0,62 mm au centre de la piste de roulement et de 0,35 mm en extrémité, et seuls 67 % de ces stries débouchent aux extrémités¹⁸.

Par ailleurs, la largeur de la surface de contact des pneumatiques (21,5 cm) étant inférieure à celle des pistes de roulement (25 cm), de la poussière, provenant vraisemblablement des plaquettes de freins et du caoutchouc des pneumatiques, s'est amalgamée sur les parties non roulées et a créé ainsi au fil du temps deux bandes de part et d'autre, formant un léger relief et obstruant l'extrémité des stries.

La maintenance et la surveillance

Le constructeur préconise un contrôle visuel mensuel des voies afin « de vérifier l'état des pistes, des butées de fixation, des soudures, des joints éclissés et l'ouverture des joints de peigne d'une part, l'usure et le colmatage éventuels des stries d'autre part ». Cependant, l'évolution mois par mois de l'usure des pistes est délicate à détecter au cours de telles visites, de même qu'un colmatage autre qu'accidentel (ce dernier résultant par exemple de travaux ou de suintement sur les voies). Les comptes rendus de visite examinés par les enquêteurs n'en font pas état sur la portion concernée par l'accident¹⁹.

Le constructeur demande également à l'exploitant d'effectuer annuellement²⁰, aux mêmes endroits, des essais de freinage sur pistes de roulement mouillées : dès lors que la moyenne des décélérations mesurées demeure supérieure à 1,8 m/s², l'adhérence des pistes de l'ensemble de la ligne est considérée comme satisfaisante, et l'usure comme non préoccupante. Sur la ligne A du métro de Toulouse, l'arrivée à la station « Basso-Cambo » a été retenue comme zone témoin pour les pistes datant de 1993, et l'arrivée à la station « Argoulet » pour celles du prolongement de 2003. Le bilan de ces essais sur les 13 années précédant l'accident montre des résultats satisfaisants sur l'une et l'autre de ces deux zones, avec des décélérations moyennes comprises entre 2,2 et 2,6 m/s² sur l'une et l'autre.

18 Ce relevé a été effectué sur les pentes aériennes des viaducs. Sur le prolongement mis en service en 2003, la profondeur moyenne des stries est de 1,07 mm au centre et de 0,68 mm aux extrémités, et 97 % de ces stries sont débouchantes.

19 Bien que non détecté au cours de ces visites, un colmatage des stries a cependant été observé au PM 3046 (soit à une dizaine de mètres du lieu du FU), sur une longueur d'environ un mètre sur un à deux centimètres de la piste extérieure, dû à des résidus de produits d'injection. Par ailleurs, la périodicité de ces visites était bimensuelle de 1993 à 2004.

20 Les recommandations du constructeur concernant la périodicité ont évolué de la sorte : annuelle de 1993 à 2006, bisannuelle de 2006 à 2012, puis de nouveau annuelle à partir de décembre 2012.

3.3.3 - L'examen du tunnel

Le tunnel-cadre entre la trémie et la station « Bagatelle » mesure 223 m de long et a été construit entre 1989 et 1991.

Il avait été inspecté le 3 avril 2013 et son état général a été qualifié de « normal »²⁰.

Par ailleurs, lors de cet orage, aucune alarme au PCC n'a indiqué un niveau trop haut dans les stations de relevage évacuant l'eau infiltrée dans les tunnels.

3.3.4 - L'examen des automatismes

Les deux cantons 1203, sur lequel le freinage d'urgence de la rame 18 s'est déclenché, et 1303, correspondant à la station « Bagatelle », sont gérés par le pilotage automatique de ligne (PAL) n° 3. Les derniers contrôles préventifs de cet équipement ne montrent pas d'anomalie. Il en est de même pour les pilotages automatiques embarqués (PAE) des rames 18 et 39.

3.3.5 - L'examen des consignes d'exploitation et de leur application

Les roues de la rame 39 se sont enrayées peu avant son arrivée à la station « Bagatelle ». L'opérateur doit alors appliquer la procédure « RAMPATIN » qui prévoit, en cas de pluie, d'acquiescer l'alarme, de commander une baisse de 10 % de la vitesse des rames lorsqu'elles approchent des stations encadrantes (dite « vitesse affine »), de vérifier l'absence d'alarme des équipements d'évacuation de l'eau de pluie, et d'envoyer un agent inspecter les pistes de roulement.

Durant la minute quarante-cinq séparant l'alarme « patinage-enrayage » du tamponnement, l'opérateur n'a pas commandé cette « vitesse affine », sans qu'il soit possible de dire s'il s'agit d'un retard dû à sa charge de travail importante ou d'un oubli du fait de la banalisation de telles alarmes par temps de pluie. Cependant, même si l'opérateur avait passé cette commande immédiatement après avoir consulté l'alarme, la rame 18 n'aurait pas pu l'intégrer dans son programme de vitesse avant la survenue de l'accident, car elle était alors déjà partie de la station « Mirail-Université ».

Par ailleurs, la rame 39 a effectué un arrêt décalé de l'ordre d'un mètre à son arrivée à la station « Bagatelle », et n'a commandé l'ouverture ni de ses portes, ni de celles de la station. Dans un tel cas, l'opérateur doit appliquer la consigne « STATRATE », qui lui prescrit de diffuser aux voyageurs un message par l'interphonie, puis de commander à la rame un ordre de redémarrage. Cet ordre de démarrage a été donné 1 minute 36 plus tard. Ce point sera examiné plus en détail au paragraphe 3.6.

Enfin, l'actionnement des poignées d'évacuation par les voyageurs des rames 18 et 39 a entraîné la coupure de l'alimentation électrique de traction de l'ensemble de la ligne. Les agents du PCC ont créé un service provisoire à la station « Arènes » à 18h39, soit moins de sept minutes après le tamponnement, afin que la section de ligne comprise entre cette station et le terminus « Balma-Gramont » puisse continuer à être exploitée. Ils ont organisé l'évacuation des cinq rames arrêtées en interstation sur le reste de la ligne. L'application des procédures correspondantes n'appelle pas de remarque.

3.4 - Conclusions sur les causes directes du tamponnement

La rame 18 a tamponné la rame 39 parce qu'elle a glissé, toutes roues bloquées, au cours de son freinage. Cette glissade est la conséquence d'un défaut d'adhérence des pneumatiques sur les pistes de roulement, qui a commencé dès le freinage normal de service (FNS) engagé préalablement au freinage d'urgence.

Cette glissade s'est produite en tunnel, les pistes n'étaient donc pas directement exposées à la pluie, qui était par ailleurs modérée à ce moment, et l'eau ruisselant sur celles-ci avait par ailleurs été en partie évacuée par le passage de la rame 39 la précédant.

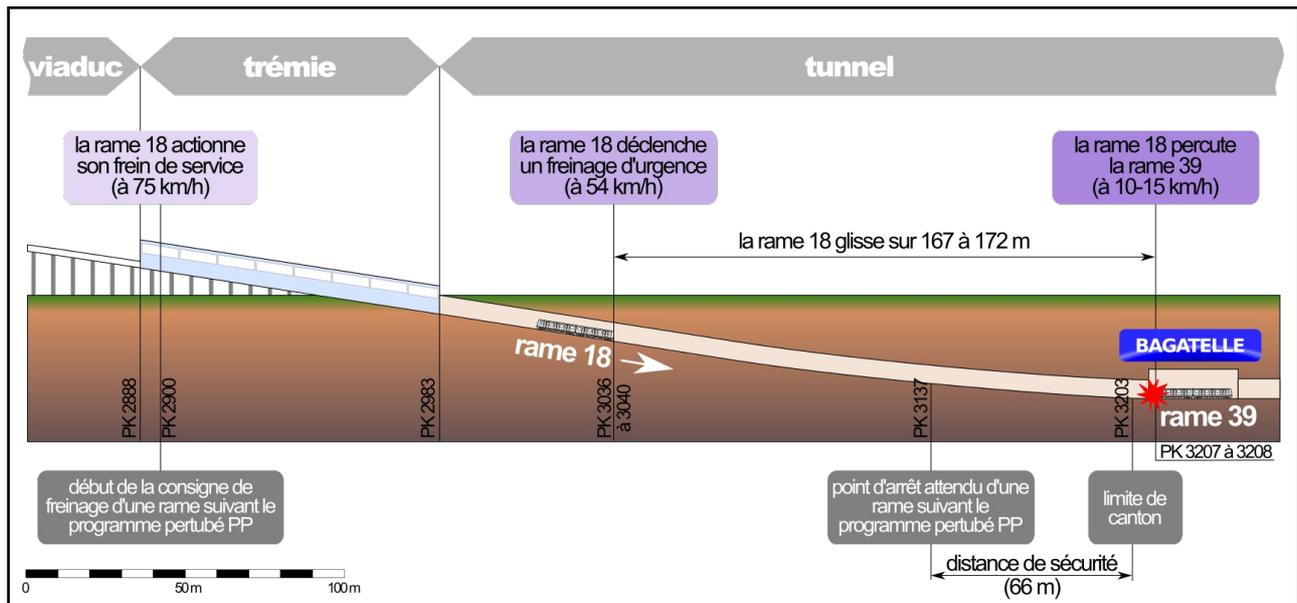


Fig 12 : Le comportement de la rame 18

Le schéma ci-après synthétise ces éléments.

Des investigations ont ainsi été menées sur les causes et les conséquences de cette adhérence insuffisante, et sont présentées au paragraphe 3.5 ci-après. Elles s'appuient notamment sur des essais réalisés par l'exploitant assisté du constructeur.

Par ailleurs, les enregistrements du PCC font apparaître certaines anomalies ou incohérences, dont les investigations complémentaires sont présentées au paragraphe 3.6.

3.5 - Les investigations menées sur l'adhérence

3.5.1 - L'examen des démonstrations de sécurité initiales

La première ligne de métro de technologie VAL, à Lille, a été réalisée en 1983 avec des pistes de roulement en béton. Les pistes de roulement métalliques ont été introduites pour la première fois sur la ligne 2 du métro de Lille en 1989.

Le choix s'est porté sur des pistes grenillées présentant une rugosité Ra minimale de 12,5 µm, dont les parties aériennes et en début de tunnels sont striées tous les 8 mm, en arcs de cercle orientés dans le sens de déplacement des rames. Ce choix a, depuis, été reconduit sans évolution sur tous les projets VAL français suivants.

Les études d'adhérence des pneumatiques sur les pistes métalliques avaient été menées à l'époque essentiellement sur la base d'essais sur des portions planes. Elles avaient abouti aux conclusions suivantes :

- de telles pistes de roulement assurent une décélération des rames en freinage d'urgence supérieure au seuil de $1,8 \text{ m/s}^2$ retenu pour dimensionner les distances de sécurités²¹ ;
- cette décélération minimale de $1,8 \text{ m/s}^2$ est garantie en toute circonstance, y compris par temps de pluie et roues bloquées²² .

Il avait également été estimé que l'état d'usure des pistes de roulement ne serait pas problématique avant 15 à 20 ans. Pour le corroborer et introduire à terme des critères de durée de vie et/ou de maintenance adaptés, le constructeur avait prescrit un test annuel de freinage d'une rame sur des pistes sèches et mouillées, dont les résultats devaient lui être remontés. Ses modalités de réalisation étaient cependant insuffisamment détaillées pour que cet objectif puisse être réellement atteint. Les résultats ne sont d'ailleurs plus systématiquement communiqués par tous les exploitants au constructeur.

S'agissant des pneumatiques, les exigences initiales du constructeur portaient essentiellement sur leurs dimensions, la tenue à la charge et la durée de vie, dans l'objectif de les faire rouler sur les pistes en béton de la première ligne du métro VAL de Lille. Sur la base des technologies des pneumatiques destinés aux poids-lourds, le fournisseur a développé un modèle répondant à ces exigences et lui a fait subir les tests de qualification routiers de l'époque. De fait, leur comportement sur des pistes métalliques, tant en termes d'adhérence que de capacité à évacuer l'eau, n'était pas précisément connu ; il avait été estimé par extrapolation à partir du comportement que ces pneumatiques avaient sur un revêtement routier lisse.

Par ailleurs, l'opportunité de doter les rames de dispositifs d'anti-blocage des roues (ABS) avait été écartée à l'époque considérant « *qu'en l'état de la technique, il paraît difficile d'assurer une telle fonction de sécurité* ».

3.5.2 - Le recensement des autres cas de glissade et d'adhérence insuffisante

Quatre autres cas de glissade d'une rame de VAL ont été recensés :

- à Lille, le 2 juin 1999 à 8h43, alors qu'il pleut, la rame 053 (VAL 206) parcourt une partie aérienne, en pente à 7 % en appliquant le « programme perturbé » car le canton devant elle est occupé. Alors qu'elle est en freinage normal de service, ses automatismes déclenchent un freinage d'urgence, ses roues se bloquent, elle glisse, pénètre sur le canton occupé, et s'arrête à 18 m de la rame devant elle. L'exploitant a pu reproduire une telle glissade, correspondant à une décélération de $0,7 \text{ m/s}^2$, révélatrice d'une adhérence insuffisante des pistes de roulement²³. Il a alors pris la décision de les contre-strier sur cette portion en pente ;
- à Roissy, le 20 février 2010, alors que de la pluie et de la neige fondue tombent, un opérateur déclenche un freinage d'urgence au cours d'une formation. La rame est alors sur une partie aérienne en pente à 7 %, ses roues se bloquent et elle glisse sur 168 à 184 m. Sa vitesse était alors de 18 m/s (65 km/h), et sa décélération était donc de l'ordre de 1 m/s^2 . L'exploitant a pu reproduire ce phénomène au cours de différents

21 Les essais réalisés sur des portions planes avaient également montré qu'une orientation des stries dans le sens contraire de déplacement des rames assurait une adhérence légèrement supérieure, toutefois dans les marges d'incertitude des outils de mesure de l'époque. Cependant, l'effet de l'orientation stries des pistes de roulement en forte pente sur l'évacuation de l'eau n'avait pas été examiné.

22 En particulier, il avait été estimé qu'un blocage des roues ne diminuait l'adhérence que de 10 à 15 %.

23 Avec le même effort de freinage, et dans des conditions d'adhérence identiques, cette rame aurait eu une décélération de $1,4 \text{ m/s}^2$ sur une section plane, sensiblement inférieure à la décélération minimale théorique de $1,8 \text{ m/s}^2$ retenue à la conception pour dimensionner les distances de sécurité.

essais, et a pris la décision de re-grenailler ses pistes de roulement sur les sections en pente forte afin d'en améliorer l'adhérence ;

- à Toulouse, le 3 novembre 2011 à 17h27, alors qu'il pleut fortement, la rame 11 (VAL 206) franchit la partie aérienne succédant à la station « Jolimont » et s'engage dans le tunnel présentant une pente de 7 %. Ses automatismes déclenchent un freinage d'urgence, ses roues se bloquent et elle glisse sur une distance qui n'a pas pu être déterminée. Le canton suivant n'a, semble-t-il, pas été engagé. L'exploitant en a été averti par des passagers l'informant des bruits anormaux produits par les plats aux pneumatiques ;
- à Toulouse, dans la nuit du 17 au 18 mars 2012 à 3h59, alors qu'il pleut fortement, un agent du PCC commande un arrêt d'urgence de toutes les rames dans le cadre d'une formation. La rame 26 (VAL 206) vient de franchir la partie aérienne succédant à la station « Jolimont » et s'engage dans le tunnel présentant une pente de 7 %. Ses roues se bloquent et elle glisse sur une longueur d'environ 190 m. Elle était alors à une vitesse de 19,5 m/s (70 km/h) et sa décélération était donc de l'ordre de 1 m/s². L'exploitant a été alerté le lendemain par des voyageurs l'informant des bruits produits par les plats aux pneumatiques.

Ces quatre événements présentent de fortes similitudes : ils se sont produits après un freinage d'urgence sur des portions en forte pente et sur des pistes de roulement mouillées, soit directement par les intempéries lorsqu'elles sont aériennes, soit indirectement par l'eau ruisselant dessus ou apportées par les rames lorsqu'elles sont en entrée de tunnel. En outre, dans au moins trois des cas, ces pistes présentaient un striage qui n'étaient pas conformes aux exigences initiales de fabrication et leur rugosité accusait un Ra inférieur à 12,5 µm, soit de fabrication, soit par usure.

Par ailleurs, à Rennes, l'exploitant a été confronté à un nombre élevé d'alarmes patinage-enrayage par temps de pluie, jusqu'à 50 par heure, qui l'a amené à contre-strier ses pistes de roulement en partie aérienne et en début de tunnel. Sur Toulouse, 341 alarmes ont également été relevées en avril 2013, conduisant l'exploitant à re-grenailler les zones sensibles.

3.5.3 - Les investigations portant sur l'évacuation de l'eau présente sur les pistes de roulement

Les essais de reconstitution de l'accident mené par l'exploitant avec l'appui du constructeur ont été réalisés sur les zones présentant une forte pente. Ces zones ont été mouillées grâce à un dispositif aspergeant de l'eau sur un linéaire de 60 mètres, positionné sous la trémie et réglé à un débit reproduisant la quantité de pluie tombée lors de l'orage du 18 juin 2013.

Écoulement de l'eau sur les pistes dont les arcs de cercle des stries sont orientés dans le sens de la pente

Le tout début de l'aspersion, avant que ne s'établisse un écoulement de l'eau en régime stabilisé, permet d'apprécier la manière dont l'eau s'écoule sur la piste de roulement. Comme le montre la photo ci-après, les stries dont les arcs de cercle sont orientés dans le sens de la pente ramènent l'eau vers l'axe de la piste. Cette eau ne s'évacue par les côtés que par débordement, lorsque l'épaisseur du film créé est suffisamment importante. Outre l'orientation des stries, la légère incurvation du profil de la piste de part et d'autre de son âme participe possiblement à ce phénomène. Par ailleurs, le vide laissé entre deux pistes bout à bout, formant un « joint d'éclisse », n'empêche pas totalement l'eau de s'écouler sur le rail suivant.

En régime d'écoulement stabilisé, quelques minutes après l'activation du dispositif d'aspersion, le film d'eau présente une épaisseur non négligeable de 2 à 3 mm répartie sur toute la largeur de la piste. À titre de comparaison, les essais européens de qualification des pneumatiques routiers sont réalisés sur un film d'eau de 1 mm d'épaisseur.

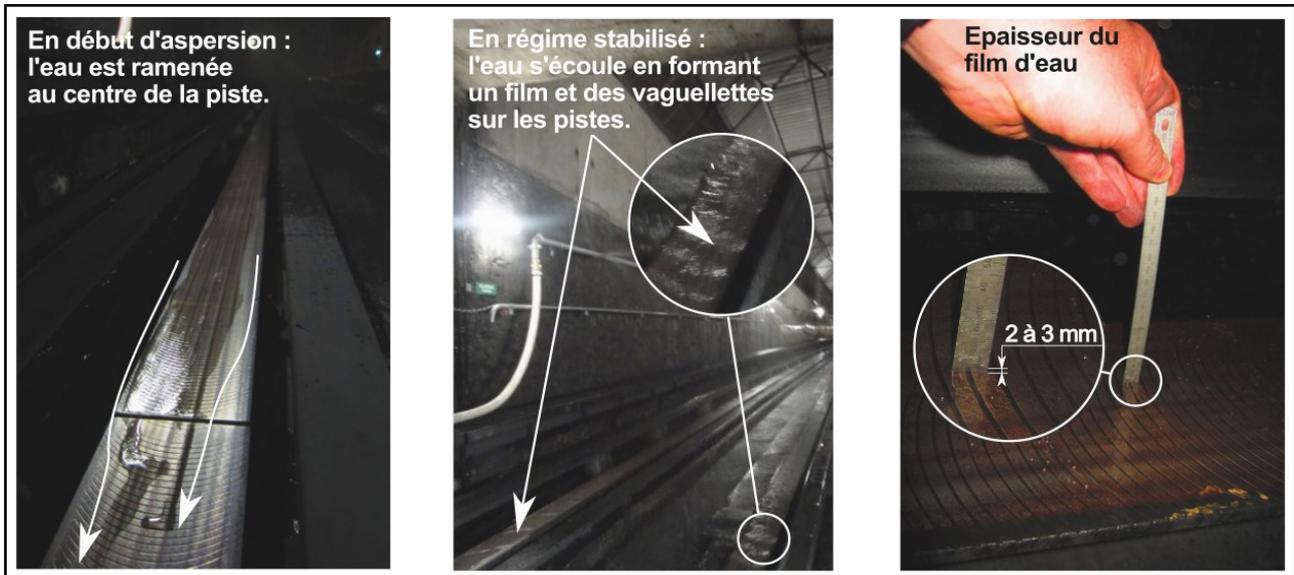


Fig. 13 : Écoulement de l'eau sur des pistes dont les arcs de cercle sont orientés dans le sens de la pente

Écoulement de l'eau avec des pistes contre-striées

La même aspersion a été réalisée avec le même débit, au même endroit, après avoir contre-strié les pistes de roulement de sorte à orienter leurs arcs de cercle vers l'amont. La photo ci-après montre que l'eau est rapidement évacuée sur les deux côtés et non plus dirigée vers l'axe de la piste. En régime stabilisé, le film d'eau ne recouvre plus la totalité de la largeur de la piste.



Fig. 14 : Écoulement de l'eau sur des pistes contre-striées

3.5.4 - Les essais de reproduction du blocage des roues et de la glissade de la rame

Les essais de reproduction des événements survenus le 18 juin 2013 ont été réalisés dans la zone de l'accident, à la vitesse maximale autorisée, avec les deux types de matériel roulant VAL 206 et VAL 208 et dans différentes configurations. Le tableau ci-après en présente la synthèse.

Configuration de l'essai	Nombre d'essais	Principaux faits relevés
La rame suit le programme perturbé « PP ».	5	- des enrayages des roues se sont produits sur le VAL 206, - un FU par survitesse s'est déclenché sur un VAL 206, - des blocages de toutes ou de certaines roues se sont produits, sur le VAL 206, - un VAL 206 a dépassé (de 4 m) le point d'arrêt attendu, sans engager le canton suivant.
La rame suit le programme perturbé « PP » et un opérateur déclenche artificiellement un freinage d'urgence par survitesse dans le tunnel, au même endroit que celui de l'accident (reproduction artificielle de l'accident du 18 juin 2013).	4	- des enrayages des roues se sont produits sur le VAL 206, - un blocage de toutes les roues s'est systématiquement produit au cours des essais avec le VAL 206, - une rame VAL 206 a dépassé (de 10 m) le point d'arrêt attendu, sans engager le canton suivant.
La rame suit le programme normal « PN » et un opérateur déclenche un freinage d'urgence par actionnement du bouton « coup-de-poing » alors que la rame est dans la zone d'aspersion (conditions d'adhérences les plus défavorables).	3	- des enrayages des roues se sont systématiquement produits sur le VAL 206 et sur le VAL 208, - le blocage de toutes les roues s'est systématiquement produit sur le VAL 206, le blocage d'un essieu s'est produit sur le VAL 208, - les rames VAL 206 sont parties en glissade, et le canton suivant a été engagé, la rame VAL 208 s'est arrêtée en 150 m sans sortir de son canton.

Fig 15 : Synthèse des essais de freinage de rames VAL 206 et VAL 208 sur des pistes mouillées en pente

L'enrayage de plusieurs roues, le déclenchement du freinage d'urgence par survitesse, le blocage de toutes les roues et la glissade d'une rame sur une longue distance sont autant d'événements qui ont pu être reproduits individuellement au cours de ces essais. Toutefois, l'enchaînement successif de ces quatre phénomènes les uns à la suite des autres au cours d'un même essai, tel que cela s'est déroulé lors de l'accident du 18 juin 2013, n'a pu l'être.

Il a ainsi été constaté que :

- la décélération mesurée lors du blocage des roues, alors que la rame glisse sur les pistes de roulement, a varié entre 0,1 m/s² (soit une décélération équivalente de 0,8 m/s² sur une section plane) et 1,3 m/s² (soit une décélération équivalente de 2 m/s² sur une section plane, supérieure au minimum de 1,8 m/s² retenu dans les études de sécurité). Cette grande disparité, dans des conditions d'essais identiques, suggère que tous les phénomènes susceptibles d'influer sur l'adhérence des métros VAL sont encore mal appréhendés. En tout état de cause, l'hypothèse selon laquelle un blocage des roues n'entraîne qu'une diminution de 10 à 15 % de l'adhérence est inexacte ;
- les premières roues à se bloquer sont celles de l'essieu arrière des voitures composant la rame, et les dernières roues à se bloquer sont celles à l'avant de la rame²⁴. Cela pourrait remettre en cause les conclusions de certaines démonstrations de sécurité du VAL, qui retiennent comme hypothèse que l'assèchement progressif des pistes de roulement au fur et à mesure du passage des roues d'une même rame empêche les derniers essieux de se bloquer et permet de conserver une adhérence suffisante pour freiner l'ensemble de la rame.

²⁴ Un phénomène de transfert de charge de l'essieu arrière vers l'essieu avant durant le freinage ou des réglages légèrement différents au niveau de chaque dispositif de freinage en sont possiblement la cause.

Ces essais montrent également une moins grande sensibilité des rames VAL 208 aux phénomènes de perte d'adhérence et de blocage des roues que les rames VAL 206²⁵.

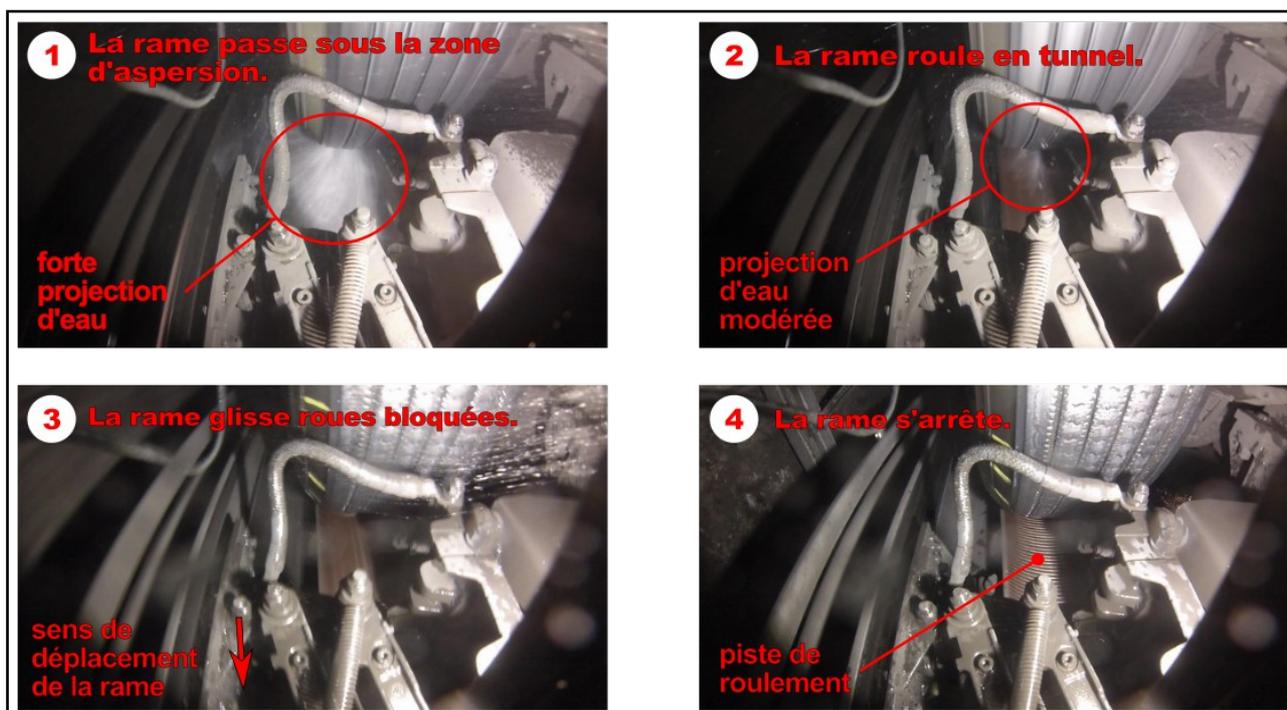


Fig. 16 : Extraits d'une vidéo filmant l'avant d'un pneumatique d'une rame VAL 206 lors d'un essai de reconstitution la nuit du 4 au 5 novembre 2013

Par ailleurs, deux comportements non attendus ont été constatés grâce notamment aux caméras mises en place sous le matériel roulant et filmant les roues :

- lors de deux essais au cours desquels un freinage d'urgence par survitesse a été déclenché, toutes les roues se sont temporairement bloquées. Les automatismes ont alors inhibé cet ordre de freinage d'urgence, la rame est repassée en freinage normal de service et les roues se sont remises à tourner. Dans l'un des essais, les automatismes ont de nouveau commandé un freinage d'urgence qui a rebloqué les roues. Un tel phénomène s'est produit au cours de l'accident du 18 juin 2013, et est à l'origine de l'incréméntation du compteur de FU à la valeur de 2.
- lors d'un essai d'une rame VAL 206 suivant le programme perturbé « PP » sans déclenchement automatique ni volontaire du freinage d'urgence, une de ses roues s'est d'abord bloquée, puis s'est mise à tourner en sens inverse du sens de la marche²⁶.

Ces essais ont été reconduits, après le regrenailage et le contre-striage des pistes de roulement dans la zone de l'accident. Il ne s'y est produit aucun enrayage ou blocage de roues, ni, *a fortiori*, de glissade des rames VAL 206 et VAL 208. En particulier, les essais visant à reproduire les conditions d'adhérence les plus défavorables (vitesse maximale en programme normal et déclenchement d'un freinage d'urgence dans la zone d'aspersion) ont conduit à des décélérations de 2,2 à 2,4 m/s², supérieures au seuil minimal de 1,8 m/s² pris en compte dans les études de sécurité²⁷.

25 La présence d'un moteur par roue et l'absence de différentiel contribuent vraisemblablement à cette moindre sensibilité des rames VAL 208.

26 Ce phénomène est dû au différentiel présent sur l'essieu. Il faut cependant que plusieurs conditions très particulières soient réunies : l'adhérence doit être sensiblement dégradée sur une seule des deux pistes de roulement et la rame doit effectuer un freinage de service faisant intervenir le freinage électrique et le freinage mécanique dans des proportions telles que le couple résistif engendré par le freinage électrique sur l'arbre moteur soit supérieur au couple résistif créé par les plaquettes de frein sur l'essieu.

27 L'exploitant a également réalisé des essais similaires avant et après regrenailage et contre-striage des pistes de roulement dans

3.6 - Les investigations menées sur les automatismes

3.6.1 - L'interruption temporaire du freinage durant la glissade de la rame 18

Le compteur calculant le nombre de déclenchement du freinage d'urgence s'est incrémenté de deux unités entre le déclenchement de ce dernier par survitesse et l'arrêt de la rame. Ce phénomène a pu être reproduit au cours des essais, et les relevés et les vidéos filmant les roues montrent qu'il ne s'agit aucunement d'un artefact, mais bien d'une interruption temporaire du freinage pendant environ 0,5 secondes.

La logique de commande de la rame permet d'expliquer ce phénomène : lorsque les deux essieux de la voiture sur lesquelles la vitesse est mesurée sont simultanément bloqués, les automatismes concluent, à tort, que la rame est à l'arrêt en inter-station, et lancent alors un ordre de redémarrage. Les freins sont relâchés, les roues se remettent à tourner, et la rame repasse en freinage normal de service. Elle re-déclenche un freinage d'urgence qui bloque à nouveau les roues, si la survitesse est toujours présente.

Lors d'un des essais menés, le déblocage des roues par ce phénomène a permis à la rame de retrouver son adhérence et de stopper au point d'arrêt normal du programme perturbé. Il est difficile d'apprécier si, le 18 juin 2013, cette interruption temporaire du freinage a eu une influence, favorable ou défavorable, sur la distance d'arrêt de la rame. Le constructeur développe actuellement un correctif visant à l'empêcher de se produire.

3.6.2 - L'absence de l'alarme « station ratée » lors de l'arrêt décalé de la rame 39 à la station « Bagatelle »

Lorsque la rame 39 s'est arrêtée après son point d'arrêt normal à la station « Bagatelle », les automatismes ont correctement détecté ce décalage, et n'ont pas autorisé l'ouverture des portes des quais ni celles de la rame. Ils se sont mis en attente d'un ordre de redémarrage d'un opérateur, et ont transmis l'état de la rame au PCC sous forme de fenêtre « station ratée » à 18h31'47", mais sans remonter explicitement l'alarme. L'opérateur a ordonné le redémarrage de la rame 1 minute 36 plus tard, sensiblement au moment du choc.

Ce dysfonctionnement, qui n'apparaît pas systématiquement, a été malencontreusement introduit lors d'une évolution du logiciel de gestion des arrêts en station. Il a été corrigé en novembre 2014 sur l'ensemble des stations de métro de Toulouse.

Il est difficile d'apprécier dans quelle mesure l'opérateur au PCC, par ailleurs fortement occupé par la gestion d'autres événements, aurait donné à la rame 39 l'ordre de redémarrage quelques secondes plus tôt, lui évitant alors d'être percutée, si l'alarme l'informant de la station ratée lui avait été correctement remontée.

les autres zones à forte pente et en partie aérienne de la ligne A : au niveau des viaducs entre les stations « Basso-Cambo » et « Bellefontaine » et les stations « Jolimont » et « Roseraie » (l'un de ces essais a par ailleurs été effectué en charge). Les résultats sont similaires.

3.6.3 - L'absence d'alarme lors de l'engagement de la rame 18 sur le canton occupé par la rame 39

Au cours de sa glissade, la rame 18 a empiété de 4 à 5 mètres le canton de la station « Bagatelle » occupé par la rame 39 avant de percuter cette dernière. Pour autant, les enregistrements du PCC ne font remonter aucune alarme, ni information relative à ce dépassement.

L'examen montre qu'il aurait fallu que la rame 18 empiète de 24 mètres le canton occupé de la station « Bagatelle » pour qu'une alarme « logique de canton » (ALDC) se déclenche²⁸.

Une telle alarme n'aurait cependant eu aucun effet, ni sur le déroulement de l'accident du 18 juin 2013, ni sur la gestion par l'exploitant après sa survenue. Toutefois, en l'absence de tamponnement, par exemple si la rame 18 s'était arrêté quelques centimètres avant la rame 39, ou si cette dernière avait eu son ordre de démarrage quelques secondes plus tôt, seule l'abrasion des pneumatiques lors du blocage des roues aurait laissé une trace de cet événement majeur contraire à la sécurité et aux hypothèses de dimensionnement.

Le constructeur réfléchit actuellement à développer des alarmes signalant des problèmes d'adhérence rencontrés par les rames, afin de permettre aux exploitants d'investiguer dès les premiers défauts, avant que la situation ne conduise à des engagements de canton. Parmi les pistes suivies, il examine notamment la possibilité d'avertir le PCC lorsqu'un blocage d'essieu survient sur une rame en déplacement²⁹.

3.6.4 - La transmission différée des alarmes provenant des rames

Les enregistrements des automatismes décrits au paragraphe 3.2.4 présentent quelques bizarreries temporelles : l'alarme « logique de canton » (ALDC) qui apparaît à 18h33'31" est consécutive à l'actionnement d'une poignée d'évacuation par un voyageur de la rame 18 ; or cet actionnement est enregistré 2 secondes après. De même, 11 secondes séparent le déclenchement du freinage d'urgence et l'instant supposé du choc, alors qu'une telle durée est incompatible avec la vitesse initiale de la rame (54 km/h) et sa distance d'arrêt (environ 170 m).

Ces anomalies s'expliquent toutefois par le protocole de transmission des informations entre les rames et le PCC : toutes les 2 secondes, les automatismes passent successivement en revue chaque rame en circulation et remontent au PCC leur état technique et leurs alarmes. Si la totalité des informations liées à une alarme ne peut être remontée au cours d'un cycle, la suite est transmise au cycle suivant, et elles sont alors datées à leur réception complète. Le temps de latence entre l'événement réel survenant sur une rame et sa disposition au PCC peut ainsi atteindre jusqu'à 4,7 secondes.

Les alarmes provenant des équipements de sécurité en ligne telles que l'alarme « ALDC », sont, pour leur part, quasi-immédiatement transmises au PCC.

Ce phénomène n'a cependant pas eu de conséquence sur le déroulement de l'accident du 18 juin 2013.

28 L'alarme « ALDC » se déclenche lorsque la balise « EAC » d'une rame passe sur la boucle « DP » d'un canton occupé. Dans le cas présent, la limite de canton est localisé au PM 3203, le changement de boucles « DP » est située au PM 3212, et la balise « EAC » est positionnée à 15 m de la face avant de la rame 38. Il aurait donc fallu que la rame dépasse la limite de canton de $3212-3203-15=24$ mètres.

29 En outre, le constructeur réfléchit actuellement à dédoubler l'alarme « enrayage-patinage » actuelle, afin que les agents du PCC puissent distinguer les phénomènes d'enrayage des phénomènes de patinage lorsqu'ils surviennent sur une rame.

3.7 - Les suites données à l'accident

À la suite de cet accident, l'exploitant Tisséo a lancé, en coordination avec le constructeur Siemens, un plan d'actions présenté en annexe 2. En particulier :

- il a mis en place, immédiatement après l'accident, une consigne temporaire d'exploitation demandant aux opérateurs de faire fonctionner le métro automatique selon le « mode précaution » lors des orages de pluie ou de grêle. Dans un tel mode, une rame ne démarre d'une station que si la station suivante est libre, ce qui évite qu'un événement tel que celui survenu le 18 juin 2013 se reproduise, mais réduit fortement la fréquence des rames et la capacité de la ligne ;
- il a re-grenailé les pistes de roulement sur les 200 derniers mètres de chaque canton situé à l'air libre ou en entrée de tunnel. En outre, il a contre-strié les pistes de roulement en forte pente situées à l'air libre et en entrée de tunnel sur la section de la ligne A mise en service en 1993³⁰. Ces actions, achevées en juin 2014, lui ont permis, après examen du STRMTG et accord du préfet de Haute-Garonne, de ne plus appliquer le « mode précaution » lors des orages de pluie³¹. S'agissant des orages de grêles, il a prévu de limiter préventivement la vitesse maximale des rames à 10 m/s (36 km/h) lorsqu'ils surviennent, et d'activer le « mode précaution » dès la première alarme « patinage-enrayage » ;
- il a modifié sa procédure définissant les actions à mener lors d'une alarme « patinage-enrayage » en février 2014, pour y introduire notamment l'exploitation en « mode précaution » de la ligne lorsque deux patinages-enrayages surviennent au même endroit ;
- il suit mensuellement le nombre et la localisation des alarmes patinage-enrayage survenant durant l'exploitation afin de mieux cerner les zones où l'adhérence des pistes de roulement est susceptible d'avoir diminué ;
- il a signé en novembre 2014, avec Siemens et l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR), un protocole de recherche sur les phénomènes influant sur l'adhérence des métros VAL.

S'agissant des mesures à prendre sur les autres réseaux de métro VAL, le constructeur Siemens :

- a diffusé, dès juin 2013, une circulaire recommandant temporairement aux exploitants de lignes de métro VAL possédant une portion aérienne, d'appliquer le « mode précaution » en cas d'alerte météorologique signalant un risque de pluie orageuse, d'orage et de grêle ;
- a édité en avril 2014 une note technique « *de contrôle d'état d'usure et de propreté des pistes VAL* », redéfinissant les vérifications périodiques à réaliser sur les pistes de roulement : un contrôle visuel de propreté est à effectuer tous les un à deux mois selon les zones, et un contrôle visant à apprécier leur usure est à mener tous les six mois ;
- a rédigé en avril 2014 une note technique « *critères pour la réalisation des essais d'adhérence pneumatique / piste de roulement* ». Celle-ci précise notamment les lieux où doivent être réalisés les tests annuels de freinage des rames et les critères de décélération à respecter.

30 Les portions de voie ayant fait l'objet d'un contre-striage sont : la totalité de la voie 2 comprise entre le terminus « Basso-Cambo » et la station « Bellefontaine », l'arrivée à la station « Mirail-Université » en voie 1, l'arrivée à station « Bagatelle » en voie 1 (lieu de l'accident) et la sortie de la station « Jolimont » en voie 1.

Sur le prolongement de la ligne A, mis en service en 2003, les portions de voie présentant une forte pente et situées à l'air libre ou en entrée de tunnel sont l'arrivée à la station « Roseraie » en voie 2 et l'arrivée à la station « Argoulets » en voie 1 ; elles n'ont pas fait l'objet d'un contre-striage.

31 Il a par ailleurs achevé, en novembre 2014, de re-grenailier le reste des pistes de roulement aériennes.

Le STRMTG, qui a notamment en charge le contrôle de la sécurité des transports guidés pour le compte des préfets de département :

- s'est assuré que les exploitants des réseaux de métro VAL se sont dotés des consignes nécessaires pour appliquer préventivement le « mode précaution » en cas d'orages violents ;
- a soumis à son examen préalable, les mesures de chaque exploitant pour restaurer une adhérence satisfaisante des pistes de roulement de leur réseau, leur permettant ainsi de ne plus appliquer préventivement le « mode précaution » lors d'orages violents. À ce jour, seul le réseau de Toulouse a levé ce « mode précaution » dans les conditions mentionnées ci-avant ;
- s'assure, au travers des réunions périodiques « inter-VAL » qu'il pilote et qui regroupent les exploitants des lignes françaises de métros VAL³² et Siemens, de l'avancement du plan d'actions mené par l'exploitant Tisséo et par Siemens, et de la diffusion des enseignements tirés ;
- s'est assuré auprès des exploitants de métros automatiques autres que le VAL qu'un événement similaire à celui du 18 juin 2013 ne pouvait s'y produire.

32 L'exploitant de la ligne VAL de Turin s'est également joint à ces réunions.

4 - Déroulement de l'accident et des secours

4.1 - Le contexte

Le 18 juin 2013, à 18h27, un violent orage éclate, qui débute par 35 secondes de grêle et dure 5 à 6 minutes.

Au même instant, la **rame 39** quitte le terminus « Basso-Cambo » et parcourt la première partie aérienne de la ligne, longue de 382 mètres. La **rame 18** la suit 57 secondes plus tard, alors que la grêle a laissé place à une forte pluie. Elles ont l'une et l'autre une minute de retard sur leur horaire théorique, et leur consigne de vitesse maximale est en conséquence portée automatiquement à 21 m/s (75 km/h) aux endroits où cela est possible.

Dès cette partie du parcours, la **rame 18** connaît des problèmes d'adhérence de ses pneumatiques sur les pistes de roulement : à l'approche de la station « Bellefontaine », elle génère au PCC une alarme « patinage-enrayage » et déclenche un freinage d'urgence. Malgré cela, elle s'arrête après son point d'arrêt normal en station. Elle n'effectue donc pas son échange voyageurs et repart après qu'un agent au PCC a commandé un ordre de redémarrage.

4.2 - Le déroulement du tamponnement

A 18h30'29", la **rame 39** part de la station « Mirail-Université », alors que la pluie est à son intensité maximale. Elle s'engage sur la deuxième partie aérienne de son parcours, longue de 258 mètres, franchit le viaduc et entame la descente vers la station « Bagatelle ». À son passage, elle évacue l'important film d'eau qui s'écoule sous forme de vaguelettes sur les pistes de roulement, et qui ne réapparaîtra plus par la suite.

A 18h31'38", alors qu'elle approche de la station « Bagatelle », elle connaît à son tour des problèmes d'adhérence : constatant une décélération insuffisante, ses automatismes génèrent une alarme « patinage-enrayage » au PCC et déclenchent un freinage d'urgence. Elle s'arrête alors 10 mètres avant son point d'arrêt normal en station.

Une seconde plus tard, elle repart à très faible vitesse, mais s'arrête cette fois-ci un mètre après son point d'arrêt normal. Elle n'ouvre pas ses portes et se met en conséquence en attente d'un ordre de redémarrage de l'opérateur du PCC.

A 18h32'15", la **rame 18** part de la station « Mirail-Université ». Elle franchit le viaduc alors que la pluie est devenue faible. Le canton de la station « Bagatelle » étant occupé, elle suit le programme de vitesse perturbé « PP » qui active un freinage normal de service en vue de la faire s'arrêter 70 mètres avant la station.

A 18h33'12", elle connaît à nouveau des problèmes d'adhérence qui diminuent l'efficacité de son freinage de service, et ses automatismes déclenchent un freinage d'urgence. Elle est alors entièrement dans le tunnel, à environ 170 mètres de l'arrière de la **rame 39**, à une vitesse de 54 km/h au lieu des 49 km/h attendus. Toutes ses roues se bloquent et elle part en glissade.

A 18h33'23", la **rame 18**, alors à une vitesse de 10 à 15 km/h, percute la **rame 39** encore à l'arrêt. Sous le choc, les deux rames avancent d'environ un mètre.

La **rame 18** a donc glissé sur environ 170 mètres. Elle a ainsi dépassé de 70 mètres son point d'arrêt programmé lorsque le canton suivant est occupé. Sa décélération moyenne au cours du freinage d'urgence sur cette portion en pente de 7 % a été de l'ordre de 0,6 m/s², équivalent à une décélération de 1,3 m/s² sur une section plane, alors que les études de sécurité demandent une décélération minimale de 1,8 m/s².

4.3 - Le déroulement de l'alerte et de l'évacuation

Dix à quinze secondes après le choc, les voyageurs des deux rames activent plusieurs poignées d'évacuation. Celles-ci génèrent une alarme au PCC, coupent l'alimentation de traction de la ligne et, après une temporisation de 10 secondes, déverrouillent les portes. Ces voyageurs ainsi que d'autres présents sur le quai tentent également de joindre le PCC par les boutons d'interphonie, sans succès car l'agent en poste est en communication avec une autre rame.

Les voyageurs de la rame 18, qui est en tunnel, cheminent le long du trottoir d'évacuation pour rejoindre la station. Ceux de la rame 39 accèdent directement aux quais après en avoir ouvert les portes palières.

Au final, les quelque 31 voyageurs de la rame 18, les 88 de la rame 39 et les 11 présents sur le quai auront été évacués moins de six minutes après le choc, canalisés par un agent d'exploitation arrivé entre-temps sur les lieux. Les pompiers, arrivés sur place, ont alors recensé trois blessés légers, deux qu'ils ont laissé repartir après les avoir examinés et un qu'ils ont acheminé à l'hôpital pour des examens complémentaires.

Un terminus provisoire a été créé à 18h39 à la station « Arènes » afin de permettre l'exploitation de la section comprise entre cette station et le terminus « Balma-Gramont », et les cinq rames arrêtées en inter-station sur le reste de la ligne ont été évacuées.

5 - Analyse des causes et facteurs associés, orientations préventives

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

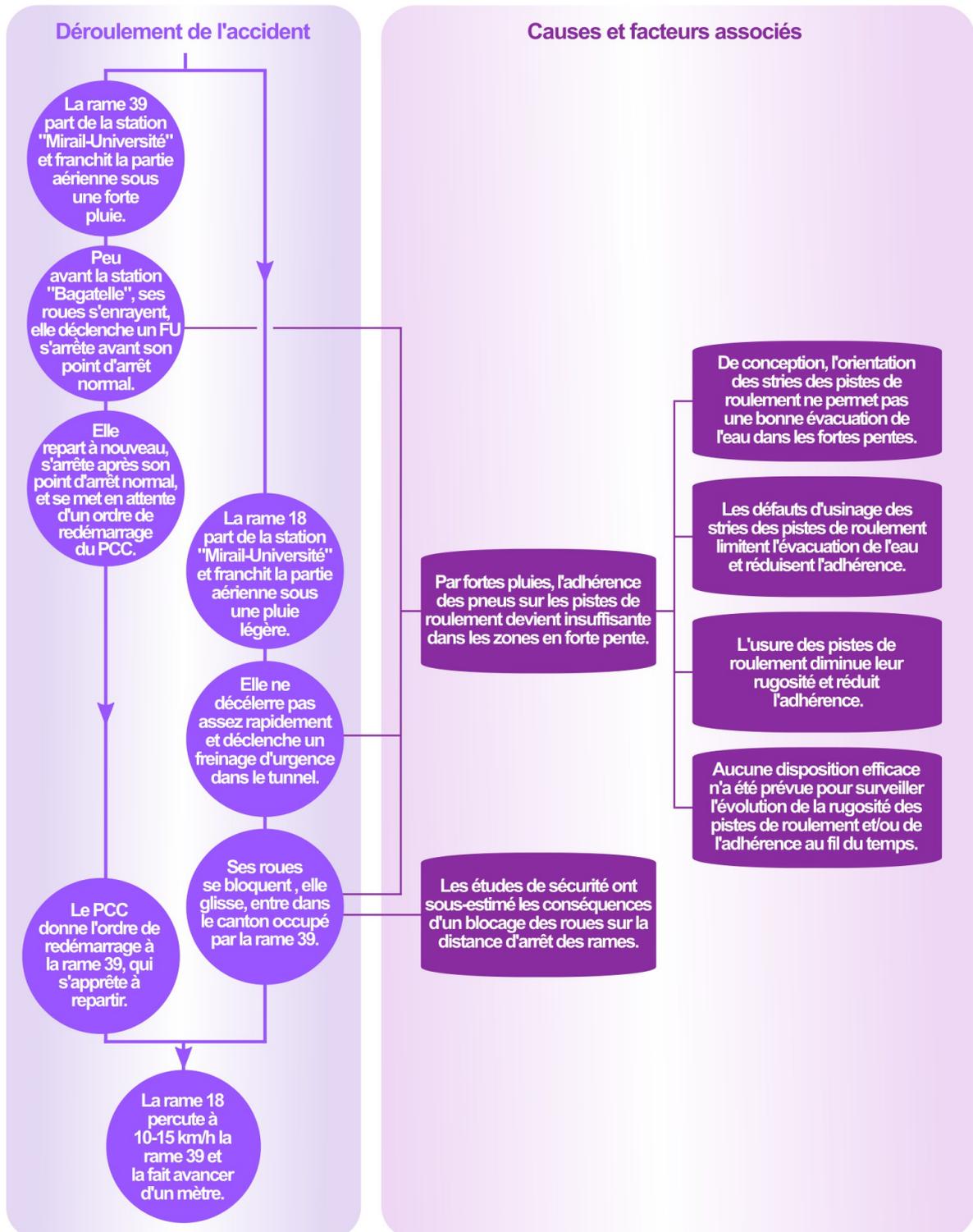


Fig. 17 : Schéma du déroulement de l'accident, des causes et des facteurs associés

Cette analyse conduit le BEA-TT à rechercher des orientations préventives dans les domaines suivants :

- l'évacuation de l'eau présente sur les pistes de roulement ;
- la restauration et le maintien dans le temps de l'adhérence sur les pistes de roulement.

5.1 - L'évacuation de l'eau sur les pistes de roulement

Les automatismes de la rame 18 ont déclenché un freinage d'urgence parce que la rame ne ralentissait pas suffisamment rapidement à cause d'une adhérence insuffisante. Ce freinage s'est produit en tunnel, 150 m après que la rame s'est engagée sous la trémie couverte protégée de la pluie.

Ce défaut d'adhérence à cet endroit n'a donc pas été occasionné par la pluie tombant sur les pistes de roulement. Il l'a été par l'eau s'écoulant le long des pistes ainsi que celle apportée par les rames précédentes et la rame elle-même.

Il est donc important que cet apport d'eau puisse s'évacuer le plus rapidement possible hors des pistes de roulement. Or, les essais menés par l'exploitant et le constructeur ont montré que lorsque celles-ci possèdent un striage constitué d'arcs de cercle orientés dans le sens de la pente, l'eau est ramenée vers l'axe de la piste et ne s'évacue que par débordement lorsque le film devient suffisamment épais. Ce phénomène est accentué par le profil de la surface de roulement, qui présente un creux pouvant atteindre 0,8 mm de part et d'autre de l'âme de la piste. Par ailleurs, les vides de 2 cm laissés entre deux pistes bout à bout (les joints d'éclisse) n'empêchent que partiellement l'eau de s'écouler sur la piste suivante.

À l'inverse, lors des essais réalisés dans des conditions similaires, après que les pistes ont été contre-striées avec des arcs de cercle orientés dans le sens inverse de la pente, l'eau est rapidement dirigée vers les bords des pistes et s'évacue plus facilement.

Outre la zone de l'accident, l'exploitant de Toulouse a ainsi procédé au contre-striage d'autres portions de ses pistes de roulement présentant une forte pente à l'air libre ou en entrée de tunnel, en se limitant cependant aux pistes les plus anciennes. La situation est également hétérogène sur les autres réseaux.

Au vu de cet élément, le BEA-TT émet la recommandation suivante :

Recommandation R1 (STRMTG) :

Demander aux exploitants des métros automatiques VAL qui possèdent des portions de voie en forte pente, situées à l'air libre ou en entrée de tunnel, de contre-strier leurs pistes de roulement en orientant les arcs de cercle des stries dans le sens inverse de la pente, afin d'améliorer l'évacuation de l'eau.

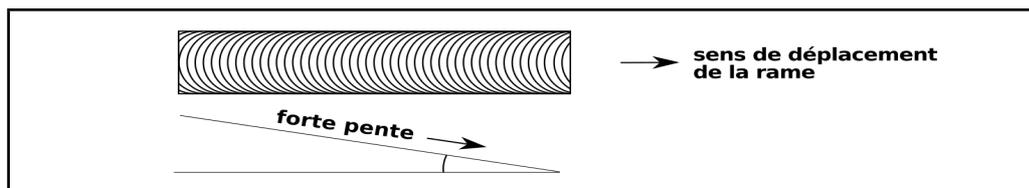


Fig. 18 : Orientation des arcs de cercle du contre-striage cité à la recommandation R1

Par ailleurs, la poussière, provenant notamment de la gomme des pneumatiques et des poussières des plaquettes de freins, s'amalgame progressivement en bordure de la surface de roulement des pistes, obstrue les stries et crée un léger et dur renflement qui entrave l'évacuation de l'eau. Le constructeur et l'exploitant ont certes prévu une procédure mensuelle de vérification de la voie, incluant le contrôle du colmatage des stries. Toutefois, le court laps de temps entre deux visites, la vérification uniquement visuelle et l'absence de critère quantitatif déclenchant une action corrective font qu'une telle consigne est clairement adaptée à la détection d'un dépôt accidentel de résidus, mais inappropriée à la surveillance d'un encrassement naturel lent et progressif. En outre, les outils tels que les nettoyeurs à eau sous pression utilisés à ce jour s'avèrent peu efficaces pour nettoyer les résidus colmatant les stries.

Recommandation R2 (STRMTG)

S'assurer que les exploitants des métros automatiques VAL disposent d'une procédure efficace de surveillance de l'état d'encrassement des pistes de roulement et d'outils efficaces de nettoyage lorsque les critères, notamment de colmatage des stries, sont atteints.

5.2 - La restauration et le suivi dans le temps de l'adhérence sur les pistes de roulement

5.2.1 - La restauration de l'état de surface des pistes de roulement

Les investigations ont montré que c'est un défaut d'adhérence des pneumatiques sur les pistes de roulement qui est à l'origine de la décélération insuffisante de la rame 18 lors de son freinage normal de service, du blocage de ses roues après le freinage d'urgence et de la glissade qui s'en est suivie. C'est également ce défaut d'adhérence qui a provoqué l'enrayage de la rame 39 arrivant à la station « Bagatelle ».

L'adhérence diminue notablement lorsque la surface de roulement est mouillée. Pour autant, l'épisode orageux précédant l'événement était certes important, mais n'était pas exceptionnel, et son taux de retour a été estimé par Météo-France entre deux et trois ans.

L'adhérence dépend notamment de la surface de roulement, et plus particulièrement de sa macro et de sa micro-rugosité. En l'occurrence, l'une et l'autre était dégradées : d'une part, les stries étaient insuffisamment profondes et n'étaient pas toujours présentes sur toute la largeur des pistes, d'autre part, le passage répété des rames avait poli le grenailage initial et sensiblement diminué la rugosité de la surface de roulement, en particulier dans les zones de freinage par définition plus sollicitées.

L'exploitant de Toulouse a contre-strié les pistes de roulement en forte pente, situées à l'air libre ou en entrée de tunnel, en se limitant cependant aux pistes les plus anciennes, et re-grenailé toutes celles à l'air libre ou en entrée de tunnel.

Recommandation R3 (STRMTG) :

Demander aux exploitants des métros automatiques VAL de vérifier et, si nécessaire, de restaurer l'état de surface des pistes de roulement de leur réseau.

5.2.2 - *Le suivi de l'adhérence dans le temps*

En mode de fonctionnement nominal, la protection des métros automatiques VAL contre les collisions par rattrapage de deux rames repose sur l'hypothèse d'une adhérence suffisante des pneumatiques sur les pistes de roulement. Il apparaît donc essentiel de surveiller son évolution dans le temps.

Or, les opérations de surveillance de ces pistes de roulement sont :

- les contrôles mensuels visuels de la plate-forme et de la voie qui, comme mentionné au paragraphe précédent, ne permettent ni un suivi satisfaisant de l'usure des pistes, ni, *a fortiori*, une caractérisation de leur adhérence ;
- les tests annuels de freinage d'urgence d'une rame vide sur des pistes mouillées, réalisés sur une ou deux zones témoins. Ces zones ne sont cependant pas nécessairement les plus critiques, et un résultat favorable ne peut en conséquence pas être généralisé à l'ensemble de la ligne. En outre, ils sont conduits selon une méthode peu normée, s'agissant notamment des conditions météorologiques, de la propreté de la piste, des quantités d'eau déversées, du choix de la rame, de l'usure de ses pneumatiques ou de ses plaquettes de frein. Ainsi, les résultats favorables de ces tests, recueillis depuis la mise en service de la ligne A de Toulouse, présentent une dispersion qui ne permet aucune corrélation quant à l'évolution au cours du temps de l'adhérence des pistes de ces zones témoins. Enfin, ces tests mesurent la décélération de la rame, et plusieurs facteurs non maîtrisés peuvent influencer sur la caractérisation indirecte de l'adhérence.

Il existe cependant des méthodes et des outils qui permettent de déterminer l'adhérence d'une chaussée routière ou d'une piste aéronautique. En particulier, des engins ont été conçus pour mesurer, en roulant, leur coefficient de frottement transversal ou leur rugosité. De telles méthodes et engins méritent d'être adaptés aux pistes de roulement des métros automatiques VAL.

Recommandation R4 (Siemens) :

Développer, en lien avec les exploitants des réseaux de métro automatique VAL et le STRMTG, un moyen efficace de mesurer l'adhérence des pistes de roulement. Élaborer les consignes opérationnelles correspondantes permettant de déclencher des actions correctives lorsque ces pistes de roulement ne garantissent plus une adhérence suffisante, y compris dans des conditions météorologiques défavorables.

Cette recommandation R4 a naturellement vocation à être étendue à tout futur concepteur ou exploitant de métro automatique léger.

Par ailleurs, à la mise en service du premier tronçon de la ligne A du métro de Toulouse comme de son prolongement, les spécifications de fabrication concernant la profondeur des stries et leur caractère débouchant n'ont été ni respectées, ni vérifiées. La rugosité semble *a priori* avoir été respectée, mais n'a cependant pas été vérifiée.

Le BEA-TT invite donc le constructeur Siemens et les maîtres d'ouvrage des futures lignes de métros automatiques VAL et de leurs prochains prolongements à contrôler le bon respect des exigences de fabrication des pistes de roulement et à introduire une mesure de leur adhérence permettant de constituer un « point zéro ».

5.2.3 - La limitation du blocage des roues

Dans les études de sécurité initiales, le constructeur a considéré qu'un blocage des roues des rames en phase de freinage ne faisait perdre que 10 à 15 % d'adhérence, et qu'en conséquence, même dans de telles circonstances, leurs distances de freinage resteraient toujours inférieures aux distances de sécurité retenues pour qu'elles n'engagent pas le canton devant elles s'il est occupé. Le constructeur n'avait donc pas jugé utile de doter ses rames d'un dispositif d'anti-blocage des roues, considérant qu'ils n'étaient, à l'époque, pas suffisamment fiables.

L'accident du 18 juin 2013 d'une part et ses essais de reconstitution d'autre part montrent cependant que cette adhérence peut parfois très notablement diminuer, bien au-delà de ces pourcentages lors du blocage des roues des rames, et la décélération en forte pente devenir inférieure à 0,1 m/s².

À l'inverse, sur l'un des essais au cours duquel les automatismes ont fortuitement interrompu l'effort de freinage, les roues se sont débloquées, l'adhérence a été retrouvée et la rame s'est arrêtée sur une distance conforme aux exigences de sécurité.

Les dispositifs empêchant le blocage des roues au cours d'un freinage sont désormais devenus la norme pour les engins ferroviaires à roues métalliques circulant sur des rails (dispositif anti-enrayage) et ont été rendus obligatoires pour les véhicules routiers (système ABS).

En conséquence, le BEA-TT invite les constructeurs de métros automatiques légers à doter les prochains modèles de rames sur pneumatiques qu'ils développeront de tels dispositifs d'anti-blocage des roues.

Par ailleurs, les études de sécurité considéraient par hypothèse que si le premier essieu de la rame était certes susceptible de se bloquer, ce risque diminuait sensiblement pour les suivants jusqu'à être inexistant pour le dernier, dans la mesure où leur passage successif sur la surface de roulement évacue progressivement l'eau et assèche les pistes. Or, l'ordre de blocage des roues constaté au cours des essais de reconstitution contredit cette hypothèse.

En outre les décélérations des rames, relevées lors du blocage de leurs roues à l'occasion des essais de reconstitution, sont très disparates malgré des conditions d'essais maîtrisées.

Ces remises en cause des hypothèses initiales et cette dispersion des résultats laisse supposer que les facteurs régissant l'adhérence des pneumatiques des rames de métro automatique VAL sur leurs pistes métalliques ne sont pas tous appréhendés à leur juste mesure. À ce titre, l'exploitant Tisséo, le constructeur Siemens et l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR) coordonnent des recherches universitaires sur ce thème.

Le BEA-TT ne verrait que des avantages à ce que de telles actions soient poursuivies et développées, et invite les autres concepteurs et exploitants de métros automatiques à s'y associer ou à en mener de similaires, en lien avec le STRMTG.

5.2.4 - L'adhérence des pneumatiques

L'adhérence dépend aussi des pneumatiques. Lors de l'accident du 18 juin 2013, les critères d'usure et de dépose n'étaient cependant atteints ni sur la rame 18, ni sur la rame 39. Dans la mesure où l'adhérence a été restaurée, après le contre-striage et le regrenaillage opérés par l'exploitant, une évolution des pneumatiques au seul motif de cet accident ne se justifie pas. Pour autant, le fournisseur Michelin teste depuis 2012 sur ce réseau un nouveau modèle de pneumatiques.

À cette occasion, le BEA-TT ne peut qu'inciter l'entreprise Michelin à accroître l'adhérence des prochaines séries de pneumatiques destinées aux rames de métro automatique VAL qu'elle pourrait être amenée à commercialiser.

6 - Conclusions et recommandations

6.1 - Les causes de l'accident

La cause directe du tamponnement est une adhérence insuffisante des pneumatiques des rames sur les pistes de roulement métalliques mouillées. Trois facteurs ont contribué à cet accident :

- la mauvaise évacuation de l'eau présente sur les pistes de roulement, le striage de celles-ci présentant une orientation non favorable et des défauts d'usinage ;
- le polissage des pistes de roulement par le passage répété des rames, réduisant leur rugosité ;
- la sous-estimation des conséquences d'un blocage des roues sur la distance d'arrêt des rames lors des études initiales de sécurité.

6.2 - Les recommandations

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

Recommandation R1 (STRMTG) :

Demander aux exploitants des métros automatiques VAL qui possèdent des portions de voie en forte pente, situées à l'air libre ou en entrée de tunnel, de contre-strier leurs pistes de roulement en orientant les arcs de cercle des stries dans le sens inverse de la pente, afin d'améliorer l'évacuation de l'eau.

Recommandation R2 (STRMTG)

S'assurer que les exploitants des métros automatiques VAL disposent d'une procédure efficace de surveillance de l'état d'encrassement des pistes de roulement et d'outils efficaces de nettoyage lorsque les critères, notamment de colmatage des stries, sont atteints.

Recommandation R3 (STRMTG) :

Demander aux exploitants des métros automatiques VAL de vérifier et, si nécessaire, de restaurer l'adhérence des pistes de roulement de leur réseau.

Recommandation R4 (Siemens) :

Développer, en lien avec les exploitants des réseaux de métro automatique VAL et le STRMTG, un moyen efficace de mesurer l'adhérence des pistes de roulement. Élaborer les consignes opérationnelles correspondantes permettant de déclencher des actions correctives lorsque ces pistes de roulement ne garantissent plus une adhérence suffisante, y compris dans des conditions météorologiques défavorables.

En outre, sans formuler de recommandation formelle, le BEA-TT :

- invite le constructeur Siemens et les maîtres d'ouvrage des futures lignes de métro automatiques VAL ou de leurs prochains prolongements à contrôler le bon respect des exigences de fabrication des pistes de roulement et à introduire une mesure de leur adhérence permettant de constituer un « point zéro » ;*
- invite les constructeurs de métros légers à doter les prochains modèles de rames sur pneumatiques qu'ils développeront de dispositifs d'anti-blocage des roues ;*
- ne voit que des avantages à poursuivre et développer les actions actuelles de recherche traitant de l'adhérence des pneumatiques des rames de métro automatique VAL sur leurs pistes de roulement métalliques, et invite les autres concepteurs et exploitants de métros automatiques à s'y associer ou à en mener des similaires, en lien avec le STRMTG ;*
- incite l'entreprise Michelin à accroître l'adhérence des prochaines séries de pneumatiques destinées aux rames de métro automatique VAL qu'elle pourrait être amenée à commercialiser.*

ANNEXES

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête

Annexe 2 : Plan d'actions mis en œuvre conjointement par l'exploitant Tisséo et le constructeur Siemens à l'issue de l'accident

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête



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

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

La Défense, le 20 juin 2013

Le Directeur

DECISION

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

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

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

Vu les circonstances de la collision entre deux rames de la ligne A du métro de l'agglomération de Toulouse (Haute-Garonne), survenue le 18 juin 2013 ;

décide

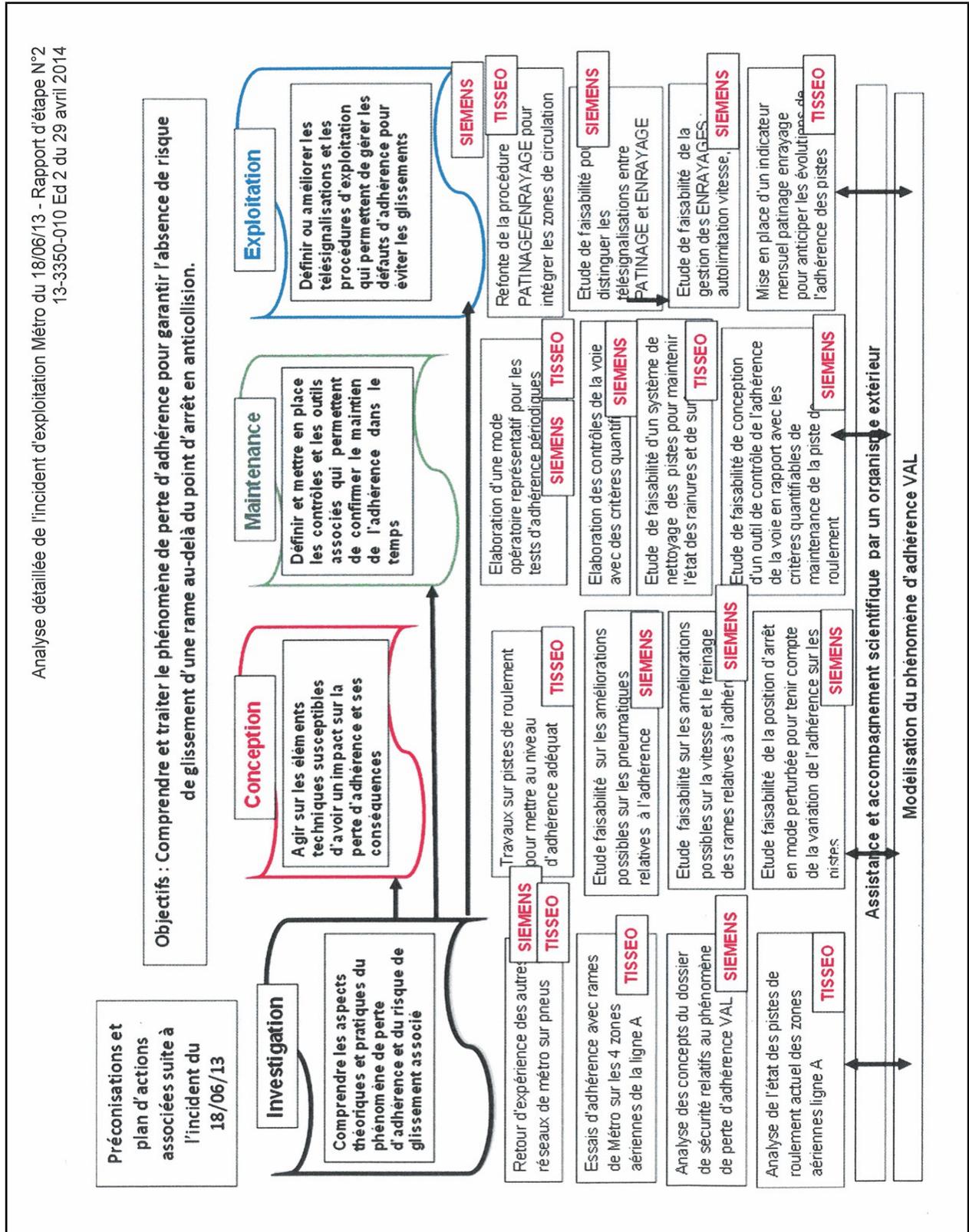
Article 1 : Une enquête technique est ouverte en application du titre II du livre VI de la 1^{re} partie du code des transports sur la collision par rattrapage entre deux rames de métro survenue le 18 juin 2013 à Toulouse (31), au droit de la station « Bagatelle » de la ligne A.

Le directeur du BEA-TT

Claude AZAM

Annexe 2 : Plan d'actions mis en œuvre conjointement par l'exploitant Tisséo et le constructeur Siemens à l'issue de l'accident

(Extrait synthétique du plan d'actions figurant dans le rapport d'incident établi par l'exploitant Tisséo dans sa version 2 d'avril 2014)





Bureau d'Enquêtes sur les Accidents de Transport Terrestre



Tour Pascal B

92055 La Défense cedex

Téléphone : 01 40 81 21 83

Télécopie : 01 40 81 21 50

bea-tt@developpement-durable.gouv.fr

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

