

**RAPPORT
D'ENQUÊTE TECHNIQUE**
**sur la collision par rattrapage
de deux rames de tramway
survenue le 2 décembre 2019
à Montpellier (34)**

Avril 2022

Avertissement

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

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

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

Glossaire

- **CEMH** : Centre d'Exploitation et de Maintenance des Hirondelles (dépôt Ligne 1)
- **ETF** : Équipement de Traction - Freinage
- **FMS** : Freinage Maximal de Service
- **FS** : Freinage de Sécurité
- **FU** : Freinage d'Urgence
- **PCC** : Poste de Commande Centralisé, situé au CEMH
- **RSE** : Règlement de Sécurité de l'Exploitation
- **SAE** : Système d'Aide à l'Exploitation
- **STRMTG** : Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés
- **TaM Montpellier 3M** : Transports de l'agglomération de Montpellier, Montpellier Méditerranée Métropole

Bordereau documentaire

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

Titre du document : Rapport d'enquête technique sur la collision par rattrapage de deux rames de tramway survenue le 2 décembre 2019 à Montpellier (34)

N° ISRN : EQ-BEAT—22-4—FR

Affaire n° BEATT-2019-14

Proposition de mots-clés : tramway, rattrapage, freinage, adhérence

Synthèse

Le lundi 2 décembre 2019 en début d'après-midi, une panne d'un tramway sur la ligne 1 du réseau de Montpellier provoque l'accumulation en ligne ou en station de plusieurs tramways dans la zone du Château d'Ô. Dans ce contexte, le tramway n° 2012 s'arrête en ligne, une centaine de mètres avant la station Hôpital Lapeyronie, où un autre tramway est déjà à quai.

Quatre minutes plus tard, le tramway n° 2028 qui le suit quitte la station Universités des Sciences et des Lettres en direction de cette station Hôpital Lapeyronie. Le long du Centre Hospitalier Universitaire Lapeyronie, le conducteur du tramway n° 2028 aperçoit le tramway n° 2012 devant lui. Il freine, applique les patins magnétiques, puis deux secondes plus tard enclenche un freinage d'urgence via son manipulateur. Le tramway ralentit mais pas suffisamment. Au début du freinage, le conducteur du tramway est en excès de vitesse par rapport aux limitations imposées mais lorsqu'il commande le freinage d'urgence, la distance devant lui est suffisante pour que dans une situation normale, il puisse s'arrêter avant l'arrière du tramway n° 2012. Le tramway n° 2028 heurte pourtant le tramway n° 2012 à une vitesse estimée, suite aux investigations menées, entre 15 et 20 km/h.

La collision a fait 41 blessés légers parmi les passagers des deux tramways, estimés à 200 personnes. Des dégâts matériels sont constatés sur les deux tramways.

Les performances de freinage du tramway n° 2028 obtenues avec un phénomène d'enrayage ont été inférieures à celles qui étaient attendues, causant ainsi la collision.

La complexité de l'interaction véhicule-voie a exigé une analyse systémique pour rechercher les causes du rattrapage. Les investigations ont identifié plusieurs facteurs contributifs :

- le comportement de conduite du conducteur du tramway n° 2028, sollicitant fortement le matériel roulant, alors que les conditions d'exploitation étaient défavorables ;
- l'adhérence réduite en présence d'un rail non nettoyé récemment et probablement graissé ;
- un sablage probablement défaillant sur une partie des bogies moteurs d'extrémités du tramway.

Ces facteurs se sont cumulés sans que l'on puisse, au vu de la complexité du cas, déterminer avec exactitude la contribution de chacun.

Néanmoins, pour pouvoir expliquer l'enrayage profond constaté lors de l'accident, des facteurs additionnels sont nécessaires. Deux hypothèses complémentaires sont donc émises :

- un agglomérat graisseux serait tombé d'un tramway dans la zone de freinage,
- la correction du freinage par l'anti-enrayeur n'aurait éventuellement pas été adaptée alors que l'état d'adhérence du rail aurait dû lui permettre de rester dans sa limite de fonctionnement.

L'enquête n'a pas permis d'exclure ou de valider l'une ou l'autre hypothèse, ni de valider un cumul de ces deux hypothèses.

Les orientations préventives visant à éviter le renouvellement d'un tel événement sont ainsi à rechercher dans les domaines suivants :

- le comportement de conduite du conducteur ;
- l'état de propreté de la voie, et sa maintenance ;
- le comportement au freinage et la maintenance du matériel roulant.

Le BEA-TT émet 7 recommandations et 3 invitations, relatives à la formation et au suivi des conducteurs de tramways ; à l'amélioration de la traçabilité des actions de maintenance, qu'il s'agisse de celle de la voie ou de celle des rames ; et à la fonction anti-enrayage pour les futurs matériels roulants tramway.

SOMMAIRE

SYNTHÈSE.....	1
1 - CONSTATS IMMÉDIATS ET ENGAGEMENT DE L'ENQUÊTE.....	5
1.1 - Les circonstances de l'événement.....	5
1.2 - Le bilan humain et matériel.....	5
1.3 - Les mesures prises après l'évènement.....	6
1.4 - L'engagement et l'organisation de l'enquête.....	6
2 - CONTEXTE DE L'ACCIDENT.....	7
2.1 - Le réseau de tramway de Montpellier.....	7
2.2 - L'exploitation de la ligne 1.....	8
2.2.1 - La conduite des tramways.....	8
2.2.2 - La régulation du trafic des tramways.....	8
2.3 - La voie.....	9
2.4 - Le Citadis 401 de Montpellier.....	10
2.4.1 - Le descriptif général du matériel roulant.....	10
2.4.2 - Le freinage et ses moyens d'application.....	11
2.5 - L'organisation générale de la maintenance.....	12
2.6 - Le retour d'expérience sur l'accidentologie.....	13
2.6.1 - L'accidentologie dans la zone de la collision.....	13
2.6.2 - L'accidentologie par rattrapage en France.....	14
2.6.3 - La météo de la semaine précédant l'accident.....	14
3 - COMPTE RENDU DES INVESTIGATIONS EFFECTUÉES.....	15
3.1 - L'emplacement des différents tramways au moment de l'accident.....	15
3.2 - Résumés des déclarations.....	16
3.2.1 - Le conducteur du tramway tamponneur.....	16
3.2.2 - Le conducteur du tramway percuté.....	17
3.2.3 - Le régulateur au poste de commande centralisé.....	17
3.2.4 - L'agent de maîtrise exploitation polyvalent, premier agent de maîtrise sur les lieux.....	18
3.2.5 - Le responsable de groupe de conducteurs.....	19
3.3 - Les données du poste de commande centralisé.....	20
3.4 - La retranscription des vidéoprotectons frontales des tramways impliqués.....	21
3.4.1 - Vidéo frontale de la cabine avant du tramway tamponneur.....	21
3.4.2 - Vidéo frontale de la cabine arrière du tramway tamponné.....	22
3.5 - La retranscription des vidéoprotectons intérieures.....	23
3.6 - Les constats sur les tramways accidentés.....	25
3.6.1 - Les dommages matériels.....	25
3.6.2 - Les données de l'enregistreur de paramètres du tramway tamponneur.....	26

3.6.3 - Le comportement du tramway n° 2028.....	27
3.6.4 - Les données de l'enregistreur de paramètres du tramway percuté.....	31
3.7 - Les données du terrain.....	32
3.8 - Les constats immédiats sur la voie.....	33
3.8.1 - Visibilité devant le tramway tamponneur.....	33
3.8.2 - État visuel du rail.....	34
3.9 - Conclusion sur les constats immédiats.....	35
3.10 - Les investigations sur le comportement de conduite du conducteur.....	36
3.10.1 - Le comportement du conducteur du tramway tamponneur.....	36
3.10.2 - Informations des régulateurs du PCC aux conducteurs et comportement de conduite des conducteurs. .	39
3.11 - Les investigations sur la voie dans la zone de la collision.....	41
3.11.1 - Le comportement des rames sur la zone de la collision et sur le reste de la ligne 1, le 2 décembre 2019.	41
3.11.2 - Quelques définitions préalables concernant l'adhérence rail / roue.....	42
3.11.3 - Les facteurs potentiels de dégradation de l'adhérence.....	43
3.11.4 - La maintenance de la voie.....	48
3.12 - Les investigations sur le matériel roulant.....	51
3.12.1 - Analyse des constats immédiats et des enregistrements du tramway n° 2028.....	51
3.12.2 - Maintenance du matériel roulant.....	53
3.12.3 - Analyse des risques et modes de défaillance possibles.....	55
3.12.4 - Investigations complémentaires.....	58
3.13 - Les scénarios possibles de l'accident.....	68
4 - DÉROULEMENT DE L'ACCIDENT.....	70
5 - ANALYSE DES CAUSES ET FACTEURS ASSOCIÉS, ORIENTATIONS PRÉVENTIVES.....	71
5.1 - Arbre des causes.....	71
5.2 - Les causes de l'événement.....	71
5.3 - Le comportement de conduite du conducteur.....	72
5.4 - L'état de propreté de la voie, et sa maintenance.....	73
5.5 - Le comportement au freinage et la maintenance du matériel roulant.....	74
6 - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	76
6.1 - Conclusions.....	76
6.2 - Recommandations.....	77
ANNEXES.....	79
Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête.....	80
Annexe 2 : Enregistrements de l'outil du PCC : localisation des tramways sur la ligne 1.....	81
Annexe 3 : Retranscription des appels entre le PCC et les conducteurs le 2 décembre 2019 à partir de 14 h 47.....	83
Annexe 4 : Données brutes de l'enregistreur de paramètres du tramway n° 2028.....	84

1 - Constats immédiats et engagement de l'enquête

1.1 - Les circonstances de l'événement

Le lundi 2 décembre 2019 en début d'après-midi, l'exploitation de la ligne 1 du réseau de Montpellier est perturbée. Un accident matériel s'est produit entre un tramway et une voiture à 13 h 44 à proximité de la station Universités des Sciences et des Lettres. Puis s'est ajouté un incident technique à 14 h 36 sur un autre tramway, en panne au niveau de la station Château d'Ô. Plusieurs tramways de la ligne 1 s'accumulent sur la voie entre les stations Hôpital Lapeyronie et Château d'Ô. Un de ces tramways est arrêté à la station Hôpital Lapeyronie sur la voie 2. Derrière lui, à 15 h 06, le tramway n° 2012 s'arrête en ligne à une centaine de mètres avant cette station.

Le tramway n° 2028 part de la station Universités en direction de la station Hôpital Lapeyronie. Au niveau du Centre Hospitalier Universitaire Lapeyronie, à 15 h 10, il percute le tramway n° 2012 par l'arrière. Les deux tramways accidentés transportent chacun une centaine de voyageurs à leur bord. Au moment de l'accident, il ne pleut pas.



Figure 1 - Localisation de la collision et des tramways impliqués (source : Google maps modifié)

1.2 - Le bilan humain et matériel

La collision a fait 41 blessés légers parmi les quelque 200 passagers des deux tramways. Aucun blessé grave n'a été porté à notre connaissance.

Des dégâts matériels sont constatés sur les deux tramways. Les cabines entrées en collision sont endommagées et la structure du châssis des deux tramways a subi des déformations importantes. Toutefois, les deux tramways n'ont pas déraillé et ils rentreront au dépôt par leurs propres moyens, à faible vitesse.

Les infrastructures (ligne aérienne de contact, rail) n'ont pas été endommagées.

Figure 2 - Situation peu après la collision (photo TaM)





Figure 3 - Tramway tamponneur n° 2028 peu après la collision (photo TaM)

1.3 - Les mesures prises après l'évènement

À la suite de l'accident, le trafic est interrompu entre la station Universités des Sciences et des Lettres et la station Occitanie. Les tramways effectuent leur retournement au niveau de la communication située entre les stations Universités et Saint-Éloi.

Les tramways accidentés rentrent au dépôt à partir de 19 h 10. Les infrastructures (rail, ligne arienne) ont été contrôlées par l'exploitant et aucune anomalie n'est constatée. À 19 h 20, l'exploitation complète de la ligne 1 reprend.

Suite à l'accident, des actions immédiates sont prises par l'exploitant dont notamment :

- les tramways n° 2028 et n° 2012 sont immobilisés au centre de maintenance pour investigations approfondies ;
- les habilitations des deux conducteurs sont temporairement suspendues à titre préventif.

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

Au vu des circonstances et du contexte de l'accident, le directeur du bureau d'enquêtes sur les accidents de transport terrestre (BEA-TT) a ouvert le 3 décembre 2019 une enquête technique en application des articles L. 1621-1 à L. 1622-2 et des articles R. 1621-1 à 1621-26 du Code des transports relatifs, notamment, aux enquêtes techniques après accident ou incident de transport terrestre.

Les enquêteurs techniques du BEA-TT se sont rendus sur place. Ils ont rencontré les représentants de l'exploitant du réseau de tramway de Montpellier, ainsi que les agents opérationnels en service le jour de l'accident. Ils ont rencontré les représentants du constructeur du tramway ainsi que ceux du fournisseur de l'enregistreur de paramètres. Ils ont enfin rencontré les agents du service de l'État en charge du contrôle de l'exploitation. Ils ont eu accès au dossier d'enquête de flagrance menée par le commissariat de police central de Montpellier. Ils ont eu communication de l'ensemble des pièces et documents nécessaires à l'enquête technique.

2 - Contexte de l'accident

2.1 - Le réseau de tramway de Montpellier

Le réseau de tramway de Montpellier est composé de 4 lignes. La ligne 1, sur laquelle s'est produit l'accident, a été mise en exploitation le 30 juin 2002. Elle a fait l'objet d'un premier prolongement en septembre 2009 à l'Est, vers le terminus Odysseum. En avril 2012, la ligne est prolongée à l'extrémité Ouest pour être connectée à la ligne 3 au nouveau terminus Mosson.

Au total, la ligne 1 mesure 15,7 kilomètres et compte 30 stations. La fréquence d'exploitation est de 3 minutes en heure de pointe et de 5 à 6 minutes en heure creuse. Avec une fréquentation de 126 000 voyageurs par jour, la ligne 1 est la plus fréquentée du réseau de Montpellier (données 2018).



Figure 4 - Plan des lignes de tramway de Montpellier et localisation de la collision (source : TaM)

L'autorité organisatrice de la mobilité, dans le cadre des dispositions de la loi n° 82-1153 d'orientation des transports intérieurs, est Montpellier Méditerranée Métropole. Celle-ci a confié à la société d'économie mixte des Transports de l'agglomération de Montpellier (TaM), à partir du 1^{er} juillet 2018 et par délégation de service public, la gestion des services de transport public de voyageurs, bus et tramways. Le contrat se poursuit jusqu'en 2024.

TaM est responsable de l'exploitation de l'ensemble des lignes de tramway, de la maintenance du matériel roulant ainsi que de la maintenance des équipements et des infrastructures.

2.2 - L'exploitation de la ligne 1

Les règles garantissant la sécurité de l'exploitation des lignes de tramway du réseau de Montpellier sont inscrites dans le règlement de sécurité de l'exploitation (RSE). Le RSE décrit les procédures appliquées pour la réalisation du service de transport public de voyageurs (conduite, régulation, sécurité...) ainsi que pour la maintenance du matériel roulant et des infrastructures.

2.2.1 - La conduite des tramways

Pour conduire un tramway, des prérequis s'appliquent à tout conducteur de TaM tels que des aptitudes médicales et psychologiques ainsi que la possession du permis D. À l'issue d'une formation interne et de la réussite d'un examen, une habilitation spécifique à la conduite des tramways sur la ligne 1 est délivrée par TaM.

Les règles et les principes de base sont la conduite « à vue » en respectant les signalisations ferroviaire et routière, et les consignes spécifiques au tramway. Des indications de vitesse sont rappelées sur le parcours, placées en hauteur sur les supports de la ligne aérienne.

La conduite intègre les principes de conduite anticipative (ou défensive), le respect des consignes de sécurité et de l'exploitation, la connaissance des procédures en cas d'avarie du matériel. La mission du conducteur est d'assurer le transport de ses clients en toute sécurité.

Figure 5 - Indication de limitation de vitesse à 50 km/h, sur la ligne 1, route de Ganges (photo BEA-TT)



2.2.2 - La régulation du trafic des tramways

La gestion des circulations en ligne des tramways (et des bus intra-muros) est assurée par le Poste de Commande Centralisé (PCC). Le PCC a pour mission de superviser l'ensemble des événements des lignes. Les circulations des tramways sont reportées sur un moniteur de supervision. Le régulateur au PCC est chargé de la supervision et de la régulation horaire de la ligne de tramway, ainsi que de la mobilisation des moyens d'intervention sur accident ou incident d'exploitation.

Tout incident d'exploitation et chaque cas de non-respect des consignes fait l'objet d'une fiche de constat par les régulateurs, puis est enregistré dans l'application informatisée dite « main courante ». Il s'agit d'un tableau regroupant tous les événements notables de la journée : accident bien sûr mais également pannes de rames, retards d'exploitation, freinages d'urgence pour éviter une collision, incivilités...

L'habilitation à la conduite du tramway est un préalable à la nomination au poste de régulateur. Une fois le parcours de formation interne achevé, et après validation des acquis, les agents sont habilités à la fonction de régulation.

2.3 - La voie

Électrifiée en courant continu de 750 volts, d'un écartement de 1 435 mm, la ligne 1 s'insère dans un environnement urbain. Le rail est de type rail à gorge.

La zone de l'accident, entre les stations Universités et Hôpital Lapeyronie, est en site propre et enherbée. Elle est longée d'un côté par un trottoir piétonnier arboré et de l'autre par un axe routier de deux voies dans chaque sens. Il n'y a pas d'ouvrage d'art ou d'appareil de voie dans cette zone. À cet endroit, la pente est d'environ 0,2 %.



Figure 6 - Plateforme tramway 200 mètres en amont de la zone de la collision (photo TaM)

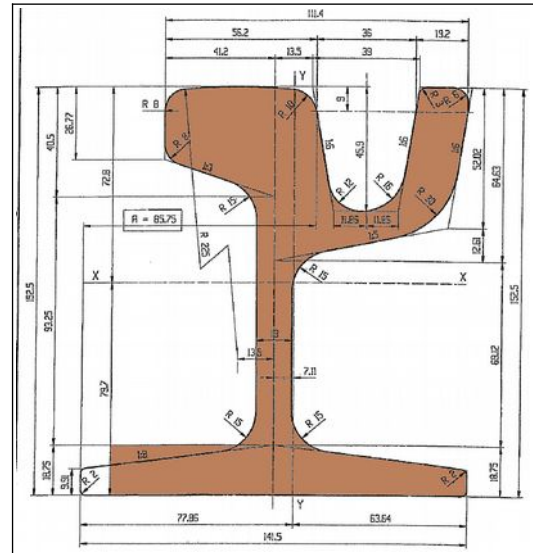


Figure 7 - Schéma de rail à gorge (source : TaM)



Figure 8 - Plateforme tramway 50 mètres en amont de la zone de la collision (photo BEA-TT)

2.4 - Le Citadis 401 de Montpellier

Les matériels roulants circulant sur le réseau montpelliérain sont tous des Citadis du constructeur Alstom. Il existe des séries différentes, présentant des spécificités selon leur année de conception et de fabrication.

2.4.1 - Le descriptif général du matériel roulant

Le matériel de la ligne 1 est un Citadis de type 401 et date de 2000. Le châssis est en acier, la caisse en aluminium. Les tramways ont été allongés en 2003 pour atteindre 40,969 mètres de long. Leur masse à vide est de 51 995 kg. Le rallongement a consisté en un ajout d'une nacelle motorisée et d'une caisse en milieu de rame. Une rame est dès lors constituée de 3 bogies moteurs et d'un bogie porteur. Elle a ainsi subi au cours de son existence des modifications : la description faite correspond à son état le jour de l'accident.

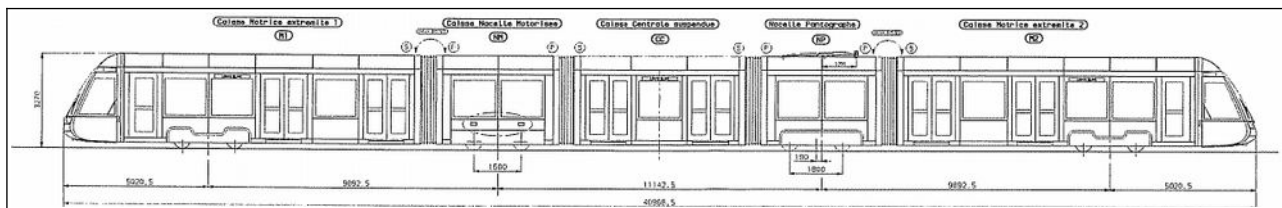


Figure 9 - Diagramme tramway Citadis 401 de Montpellier (M1 : motrice 1, M2 : motrice 2, NM : nacelle motrice, CC : caisse centrale, NP : nacelle pantographe) (source : TaM)

Pour avancer et freiner, le tramway Citadis 401 de Montpellier possède trois équipements de traction - freinage (ETF) indépendants, un au sein de chacun des trois bogies moteurs. Chaque ETF possède sa propre électronique de commande et de contrôle.

Le conducteur a à sa disposition, en cabine de conduite, un manipulateur traction-freinage qui donne les consignes d'effort (traction, neutre, freinage) aux ETF ainsi qu'un commutateur de conduite et divers boutons-poussoirs.

Une interface homme-machine lui transmet des informations de la rame et un système d'aide à l'exploitation lui transmet des informations sur les conditions d'exploitation (la rame se trouvant devant, la rame qui suit et les objectifs d'horaires à certaines stations).



Figure 10 - Pupitre de conduite du tramway n° 2028, de type Citadis 401 Montpellier (photo BEA-TT)



Figure 11 - Console à gauche du conducteur, cabine de conduite du n° 2028 (photo BEA-TT)

2.4.2 - Le freinage et ses moyens d'application

Le tramway Citadis 401 peut être freiné par un frein électrodynamique, un frein mécanique et/ou des patins magnétiques.

Le frein électrodynamique

Le frein électrodynamique est principalement du type à récupération d'énergie. Un frein rhéostatique lui est adjoint (la répartition de dissipation d'énergie entre les deux étant réalisée automatiquement et continûment par l'équipement de traction - freinage). Ce frein agit sur les essieux moteurs.

Le frein mécanique

Le freinage mécanique est réalisé par un système de freins à friction à commande hydraulique. Ce système associe deux types de freins :

- sur les bogies moteurs, des freins de type indirect (assurés par un ressort délivrant un effort croissant lorsque la pression hydraulique de commande décroît) ;
- sur le bogie porteur, des freins de type direct (délivrant un effort croissant lorsque la pression hydraulique croît).

Le frein électromagnétique

Le freinage électromagnétique est appliqué au niveau de chaque bogie par des patins magnétiques venant s'appliquer sur les rails. Cet effort est indépendant de l'adhérence. L'alimentation s'effectue, bogie par bogie, depuis une source autonome de la rame (batteries). La commande du freinage électromagnétique est soit :

- manuelle par action sur le bouton-poussoir (situé sur le pupitre) de la cabine en service. Le relèvement s'effectue au relâchement du bouton-poussoir.
- automatique en cas de freinage d'urgence ou de sécurité lorsque la vitesse est non nulle. Le relèvement des patins s'effectue à vitesse nulle.

Ces trois freins sont utilisés pour gérer le freinage de service ou le freinage d'urgence ou encore le freinage de sécurité présentés plus loin. L'effort de freinage d'un véhicule ferroviaire peut donc être appliqué sur le rail :

- soit indirectement par le freinage des essieux freinés et par l'intermédiaire du contact entre la roue et le rail. L'anti-enrayeur peut leur être associé ;
- soit directement par des patins électromagnétiques s'appliquant sur le rail.

L'anti-enrayage

L'enrayage désigne la situation où la roue est en glissement c'est-à-dire lorsque la vitesse de la roue est inférieure à celle du tramway. L'anti-enrayage est un dispositif permettant une « régulation » de la phase de freinage. C'est l'équivalent de l'ABS – ou système anti-blocage des roues – d'un véhicule routier. En cas de blocage supposé d'une ou plusieurs roues de la rame, l'anti-enrayage va commander des corrections à apporter à l'effort de freinage de son bogie correspondant.

Le sablage

La fonction sablage a pour but de maintenir ou de rétablir le coefficient d'adhérence des roues sur le rail de façon à limiter les risques de patinage et d'enrayage. Seuls les bogies moteurs sont équipés de dispositifs de sablage.

Le sablage s'effectue à l'avant de tous les bogies moteurs en fonction du sens de marche, soit :

- manuellement, sur tous les bogies moteurs du véhicule, sur demande du conducteur par appui sur le bouton-poussoir « sablage » de la cabine ;
- automatiquement, sur tous les bogies moteurs du véhicule, en cas de freinage d'urgence ou de sécurité ;
- automatiquement et localement en cas d'enrayage en freinage de service (seuls les bogies moteurs qui enrayent sablent).

Il existe trois types de freinage.

Le freinage de service

Il est commandé par le positionnement du manipulateur dans la plage de freinage. Il est assuré par le frein électrodynamique en conjugaison avec le frein mécanique. L'équipement d'anti-enrayage et la correction des efforts de freinage en fonction de la charge du véhicule sont actifs dans cette phase.

Le freinage d'urgence

Il est commandé par le manipulateur tiré au maximum de la plage de freinage. Le freinage d'urgence est assuré par le frein électrodynamique en conjugaison avec le frein mécanique, et avec l'aide du frein électromagnétique. Il est prioritaire sur le freinage de service. Quel que soit son mode de déclenchement, le freinage d'urgence ne peut être interrompu avant l'arrêt complet de la rame (freinage d'urgence irréversible). L'arrêt du freinage d'urgence s'effectue lors de la disparition de la commande de ce freinage et à vitesse nulle. L'équipement d'anti-enrayage et la correction des efforts de freinage en fonction de la charge du véhicule sont actifs dans cette phase. Le freinage correspond au freinage d'urgence 3 au sens de la norme EN 13452-1¹. Dans des conditions normales, sa décélération doit être au minimum de 2,8 m/s²².

Le freinage de sécurité

Il est commandé par un bouton-poussoir à accrochage situé sur le pupitre de façon visible et accessible. Il est assuré par le frein à friction et le frein électromagnétique. Le frein électrodynamique est systématiquement inhibé. L'équipement d'anti-enrayage et la correction des efforts de freinage en fonction de la charge du véhicule sont également inhibés. Il doit être utilisé en dernier recours, en cas de dysfonctionnement du freinage normal ou d'urgence. Sa décélération minimale doit être de 1 m/s². Le frein de sécurité est auto-maintenu jusqu'à l'arrêt complet de la rame.

2.5 - L'organisation générale de la maintenance

Que ce soit pour l'infrastructure ou pour le matériel roulant, la maintenance se compose d'une maintenance préventive et d'une maintenance corrective. Au sein de l'exploitant TaM, la Direction Technique définit et effectue le suivi de la maintenance propre à chaque type de matériel roulant, et gère l'ensemble des installations fixes. Les services techniques sont chargés de réaliser les opérations de maintenance visant à garantir dans

1 Norme européenne NF EN 13452-1 de décembre 2003 « Applications Ferroviaires - Freinage - Systèmes de freinage des transports publics urbains et suburbains - Partie 1 : exigences de performances ». Elle spécifie les exigences minimales et maximales pour les systèmes de freinage et leurs performances.

2 La décélération 2,8 m/s² est la valeur attendue par la norme : lors des tests annuels sur le tramway n° 2028, la performance a été respectée.

le temps le maintien du niveau de sécurité du système tramway. Les politiques de maintenance sont définies en fonction des recommandations des industriels et constructeurs au regard des spécificités techniques des équipements.

L'ensemble des opérations de maintenance, préventives ou correctives, font l'objet d'un enregistrement garantissant la traçabilité de chacune des interventions via un outil de gestion de maintenance assistée par ordinateur.

2.6 - Le retour d'expérience sur l'accidentologie

2.6.1 - L'accidentologie dans la zone de la collision

Entre les stations Universités et Hôpital Lapeyronie, on relève plusieurs sections de voie :

- en partant de la station Universités, ayant franchi le carrefour avec la rue Triolet, la ligne 1 parcourt une section courante ;
- puis elle traverse la route de Ganges ;
- elle parcourt de nouveau une section courante ;
- elle franchit l'intersection avec l'accès à la clinique de la Colombière ;
- puis elle se poursuit par une longue section courante où a eu lieu le rattrapage ;
- elle traverse enfin une intersection avec l'accès au Centre Hospitalier Universitaire de Lapeyronie avant d'arriver à la station Hôpital Lapeyronie.



Figure 12 - Sections entre les stations Universités et Hôpital Lapeyronie, avec leurs vitesses correspondantes (source : Google maps modifiée)

Dans le sens de circulation et dans la section courante concernée par le rattrapage, six événements ont eu lieu depuis 2003 : pour quatre, il s'agit d'une collision avec un

piéton inattentif le long des voies et pour les deux autres événements, il s'agit d'une chute de passager dans la rame suite à un freinage.

De plus, les freinages d'urgence sont signalés par les conducteurs et enregistrés par l'exploitant. Depuis 2017, 20 freinages d'urgence ont été déclarés par les conducteurs de tramways dans cette interstation Universités / Hôpital Lapeyronie. Ces freinages concernent principalement des anticipations de collisions avec des véhicules routiers ou des piétons – dans les carrefours traversés ou en station. La zone exacte de l'application des freinages d'urgence n'est pas mentionnée.

L'historique des événements survenus dans la section courante concernée par le rattrapage n'apporte donc pas d'éclairage particulier sur le rattrapage du 2 décembre 2019.

2.6.2 - L'accidentologie par rattrapage en France

D'après les données transmises par le Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés (STRMTG) issues de la base de données sur les événements de l'ensemble des réseaux français de tramway, des rattrapages ont eu lieu dans des conditions similaires (en exploitation, en ligne, avec conducteur conscient).

Neuf rattrapages ont eu lieu en France depuis 2004 : sept concernent une rame venue percuter par l'arrière une autre rame, les deux autres collisions ont impliqué un véhicule rail-route de nettoyage et une rame de tramway.

D'autres rattrapages ont eu lieu à très faibles vitesses (<10 km/h), la majorité d'entre eux est due à une mauvaise estimation de la vitesse et de la distance par le conducteur du tramway tamponneur.

Pour plus de détail, une liste est dressée dans le précédent rapport du BEA-TT portant sur un événement de ce type³. Aucun des rattrapages ayant eu lieu en France n'est similaire à l'événement du 2 décembre 2019 à Montpellier : il n'est pas possible d'en tirer un retour d'expérience utile pour la compréhension de cet événement.

2.6.3 - La météo de la semaine précédant l'accident

Le 2 décembre 2019 à Montpellier, il n'y a pas eu de pluie. Le ciel était presque dégagé avec quelques nuages.

Chaque journée de la semaine précédente a connu des précipitations nulles ou inférieures à 1 mm.

³ Rapport d'enquête technique BEA-TT n° 2019-01 sur la collision par rattrapage entre deux tramways survenue le 11 février 2019 à Issy-les-Moulineaux.

3 - Compte rendu des investigations effectuées

3.1 - L'emplacement des différents tramways au moment de l'accident

L'emplacement des tramways sur la ligne est suivi et enregistré sur un outil informatique au PCC. Le rafraîchissement se fait par à-coups. Ce suivi cartographique est enregistré. Il a été possible de visualiser les quelques minutes qui précèdent la collision. Les tramways n° 2028 et 2012 peuvent être identifiés et suivis sur la ligne. Cet outil informatique ne donne pas d'indication sur les distances exactes entre les tramways, ainsi le régulateur n'aura pas connaissance de la collision par cet outil. L'ensemble des vues est disponible à l'annexe 2.

Le 2 décembre 2019, peu après 15 h, de nombreux tramways sont présents dans la zone située sur la voie V2 entre Château d'Ô et Universités des Sciences et des Lettres :

- le tramway n° 2030 est en panne au rond-point du Château d'Ô ;
- le tramway n° 2011 apporte assistance au tramway n° 2030, via un poussage ;
- le tramway n° 2092 est arrêté en ligne juste après le n° 2011 ;
- le tramway n° 2015 est arrêté en ligne entre le rond-point du Château d'Ô et la station Hôpital Lapeyronie ;
- le tramway n° 2002 est arrêté en station Hôpital Lapeyronie ;
- le tramway n° 2012 est arrêté en ligne peu avant la station Hôpital Lapeyronie ;
- le tramway n° 2028 part de la station Universités des Sciences et des Lettres, et se dirige vers la station Hôpital Lapeyronie.

Sur la voie opposée V1 :

- le tramway n° 2090 croise les tramways n° 2012 puis 2028 ;
- le tramway n° 2016 circule entre Château d'Ô et Occitanie.



Figure 13 - Extrait de la cartographie dynamique du PCC, quelques minutes avant la collision, avec identification des tramways et leur sens de circulation (source : TaM, modifiée)

3.2 - Résumés des déclarations

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

3.2.1 - *Le conducteur du tramway tamponneur*

Entré chez TaM en 2003 comme conducteur de bus, il est habilité sur les lignes de tramway 1 et 3 en 2016 puis peu après, sur la ligne 4.

Le jour de la collision, il commence son service à 13 h et prend la relève à la station Saint-Paul. Il indique qu'avant de sortir du tramway, la conductrice revient lui préciser que la rame « glisse ». Il poursuit le parcours jusqu'au terminus Odysseum. Au retour, vers la station Moularès, il entend un appel général du PCC sur la ligne 1, informant d'un tramway en panne à Château d'Ô. En arrivant à la station Stade Philippiès, il entend un second appel général du PCC concernant la panne à Château d'Ô. Il n'y a pas de consigne spécifique émise. Devant lui, il reste trois stations avant la zone de cet incident et il estime qu'il est encore loin, il attend d'autres appels du PCC. Il déclare ne pas avoir été prévenu du tramway n° 2012 arrêté en ligne.

Il effectue l'arrêt à la station Universités, le tronçon suivant est à 30 km/h et les traversées des carrefours suivants sont limitées à 40 km/h. Après la courbe et à partir du feu routier de la Colombière, il accélère pour atteindre la vitesse limite de 50 km/h. Il explique cette accélération par le fait que ça patine à cette période, il souhaite donc prendre assez d'élan. Il pense être en dessous de la limitation à 50 km/h.

Il voit le tramway [n° 2012] devant lui, arrêté avant le carrefour de Lapeyronie. Il commence à donner plusieurs impulsions manuelles sur le bouton-poussoir des patins magnétiques. Le tramway ne réagit pas alors il enclenche le freinage d'urgence en tirant le manipulateur à fond. Il entend le gong mais rien ne se passe, voire il estime que le tramway accélère. Il voit le tramway devant lui se rapprocher très vite. Il remet le manipulateur sur le neutre et il se rappelle avoir tiré une seconde fois le freinage d'urgence. Puis il panique, il se lève et se tient au siège. Il n'a pas le temps de passer un message aux voyageurs afin qu'ils se préparent au choc. Son tramway heurte celui arrêté. Après le choc, il se rassoit, il n'arrive pas à marcher.

Il fait un appel d'urgence au PCC, il a des difficultés à parler. Il est rejoint par un conducteur en civil présent par hasard aux abords de la voie, qui le rassure. Il se retourne pour voir les voyageurs. Il rappelle le PCC car il y a des blessés. Il faut les pompiers. Le conducteur en civil fait le tour dans le tramway. Le conducteur du tramway tamponné vient le voir dans sa loge.

Son téléphone est dans sa pochette, derrière lui sur le strapontin. Il appelle notamment son responsable chef de groupe. À l'arrivée de la police, son téléphone est réquisitionné. Il effectue également les tests d'alcool et de stupéfiants. Le responsable de groupe arrive sur place.

Il a déjà tiré des freinages d'urgence, en formation notamment : il connaît le ressenti et indique n'avoir eu aucune sensation de freinage avant la collision.

Il estime que les patins magnétiques permettent de mieux freiner quand ça glisse, et notamment permettent de respecter l'arrêt en station au droit du quai. Il donne des petits coups, il trouve que ça réagit mieux que tenir le bouton des patins appuyé.

Concernant le Système d'Aide à l'Exploitation visible sur son pupitre, il sait qu'il y a des informations sur la présence des tramways devant et derrière lui mais ce jour-là, il ne l'a pas utilisé.

Pour information, une réquisition judiciaire a été établie sur le portable du conducteur du tramway n° 2028 sur la période allant de 14h45:00 à 15h45:00 le 2 décembre 2019. La réponse de l'opérateur téléphonique indique qu'aucun appel ni SMS n'a été passé entre 14h45:00 et 15h12:52. Il s'agit de l'heure de l'appel du conducteur vers le PCC via son téléphone portable. Ces données confirment le non-usage en conduite du téléphone par le conducteur.

3.2.2 - Le conducteur du tramway percuté

Entré chez TaM en tant que conducteur de bus, il a effectué 10 ans comme contrôleur au service des fraudes puis il a obtenu les habilitations à la conduite sur les quatre lignes de tramway en 2000.

Le 2 décembre 2019, il conduit sur la ligne 1. À la gare Saint-Roch, il entend un appel général du PCC qui informe les conducteurs d'un remorquage-poussage à la station Occitanie et demandant la plus grande prudence. Il continue à rouler, il se dirige vers la station Hôpital Lapeyronie à 40 km/h. Il a la visibilité, il avance avec prudence puis il voit une rame stationnée à la station Lapeyronie. Il s'arrête bien avant le carrefour pour ne pas déclencher les boucles de détection qui donneraient le feu au rouge pour les véhicules routiers. Il s'arrête doucement en freinage normal, sans encombre. Dès son arrêt, il met les warnings et il fait un message d'information à ses voyageurs. Il attend pendant 5 minutes. Puis il est percuté à l'arrière.

Il ouvre la porte de sa loge et il voit beaucoup de blessés dans sa rame. Il sort et dès qu'il voit le choc avec le tramway derrière, il appelle le PCC. Il voit le conducteur du tramway tamponneur, toujours assis à son siège, abasourdi. Le conducteur lui dit : *« j'ai freiné, j'ai glissé, j'ai été surpris, je m'excuse, j'ai rien pu faire d'autre »*.

Il s'occupe des voyageurs pendant une dizaine de minutes en attendant les pompiers. Arrivée sur les lieux, la police prend son téléphone qui lui est rendu 45 minutes après.

3.2.3 - Le régulateur au poste de commande centralisé

Entré chez TaM fin 2009 en tant que conducteur de bus, il a passé l'habilitation tramway un an plus tard sur les quatre lignes. En 2012, il devient contrôleur en alternant avec la conduite. En 2015, il devient agent de maîtrise exploitation polyvalent (MEP). Ses fonctions consistent à effectuer des missions de terrain en voiture d'intervention, de la régulation des lignes de tramway ou de bus au PCC, ou encore de l'information au Poste de Commande Information.

À sa prise de service le 2 décembre 2019 à 12 h 30, ils sont quatre régulateurs et un superviseur dans la salle du PCC. Une heure plus tard, il y a un accident entre un tramway [n° 2011] et une voiture sur la ligne 1 dans le secteur Lapeyronie. La rame accidentée se dirige vers le dépôt à côté de la station Saint-Paul. Devant elle, une rame est en panne [tramway n° 2030] au milieu du carrefour à Château d'Ô. Le conducteur l'a averti de la panne ainsi que du fait que les véhicules routiers empruntent la pelouse. Il demande au conducteur de cette rame [n° 2030] d'appliquer les premières procédures. Le régulateur émet un message général sur la présence d'une rame en panne à Château d'Ô. Il envoie un véhicule d'intervention et il prévient le service maintenance. Le conducteur informe que la rame [n° 2030] ne peut pas repartir par ses propres moyens. Le régulateur décide de faire faire un remorquage-poussage par la rame accidentée [n° 2011]. Le régulateur effectue de nouveau un appel général pour informer du

remorquage-poussage : il informe les conducteurs de la ligne 1 de ce qu'il se passe, leur demande de patienter sur le secteur Occitanie et appelle à la prudence sur ce secteur. Cela prend du temps, vu que le poussage s'avère difficile à réaliser.

Cinq à six minutes plus tard, un conducteur essoufflé l'appelle. Le régulateur ne comprend pas bien ce que le conducteur [du tramway n° 2028] dit hormis qu'il y a eu un accident. Le conducteur d'une autre rame, celle percutée [n° 2012], appelle également le PCC. Comprenant la nature de la collision, le régulateur demande au véhicule d'intervention, situé à proximité, d'aller voir. L'agent d'intervention arrivé sur place confirme l'accident. Le régulateur appelle les pompiers.

Le régulateur bloque alors les tramways aux stations Saint-Éloi d'un côté et Occitanie de l'autre pour mettre en place les retournements. Le PCC déclenche les interventions des équipes du matériel roulant et de l'infrastructure. Il y a de multiples appels. Le conducteur est pris en charge par l'agent en véhicule d'intervention, les blessés par les services de secours. Ensuite, l'équipe au PCC ne gère plus l'accident en lui-même mais effectue la gestion de la ligne, la protection de la zone accidentée, les retournements et la gestion du réseau en mode dégradé.

3.2.4 - *L'agent de maîtrise exploitation polyvalent, premier agent de maîtrise sur les lieux*

Embauché comme conducteur de bus par TaM, il a été habilité à conduire sur les lignes de tramway 3 puis 1 et peu après sur les lignes 2 et 4. Depuis 2017, il est agent de maîtrise exploitation polyvalent (MEP).

Le 2 décembre 2019, il prend son service à midi. À bord du véhicule d'intervention n° 1, il se rend sur le secteur de Château d'Ô car une rame était en panne en plein milieu du carrefour sans que le conducteur ne réussisse à la faire repartir. N'y arrivant pas non plus, l'agent demande au conducteur de préparer le remorquage-poussage et ils commencent les manipulations d'attelage. Le second véhicule d'intervention arrive, ainsi que la police pour gérer la circulation automobile.

L'agent MEP entend l'appel du conducteur du tramway n° 2028 vers le PCC via son talkie-walkie allumé en permanence. Sans bien entendre ce que dit le conducteur, il comprend que c'est grave. Le PCC l'envoie alors sur le lieu de l'accident, son collègue du second véhicule d'intervention prenant en charge la gestion du poussage.

À l'arrivée sur le lieu de la collision, il voit beaucoup de voyageurs en dehors des rames ainsi que le conducteur de la rame percutée. Il y a des blessés. L'agent s'assure que les secours ont été appelés. Les blessures concernent des maux de tête, des cervicales et surtout des chocs émotionnels. Il fait remonter les gens dans les rames ou les invite à passer du côté du trottoir. Il voit le conducteur du tramway tamponneur qui est dans sa loge et qui est sous le choc. Il lui dit d'attendre dans sa loge. Il commence à relever le nom des victimes et la nature de blessures. Il ne constate pas d'urgence vitale. Les premiers secours arrivent et il leur indique ce qu'il sait. Son collègue du second véhicule d'intervention arrive également : ils se répartissent le relevé des noms des blessés. Quand il finit, il voit arriver le responsable d'exploitation du Centre d'Exploitation et de Maintenance des Hirondelles. Le PCC l'envoie alors vers l'aiguillage de retournement à Saint-Éloi où il gère les manœuvres des tramways pour exploiter la ligne en service partiel.

3.2.5 - *Le responsable de groupe de conducteurs*

Il est conducteur de bus depuis 1992. Embauché en 1998 par TaM, il devient conducteur de tramway en 2000 puis contrôleur en 2003. En 2008, il devient responsable du contrôle des titres de transports. Depuis fin 2012, il est responsable de groupe de conducteurs. Il a en charge 48 conducteurs, dont le conducteur du tramway tamponneur n° 2028. Il réalise avec ses conducteurs leurs entretiens professionnels et leurs bilans de perspective et au quotidien, son rôle est d'organiser leur prise de poste, d'effectuer leur suivi en ligne, de s'assurer qu'ils ne rencontrent pas de difficulté.

Le 2 décembre 2019 après-midi, il se trouve au Centre d'Exploitation et de Maintenance des Hirondelles (CEMH). Le responsable d'exploitation du CEMH est informé qu'un rattrapage a eu lieu et lui demande de l'accompagner. À ce moment-là, le responsable de groupe est appelé sur son téléphone par le conducteur du tramway tamponneur, qui lui indique qu'il a eu un accident, que c'est très grave et lui demande de venir.

À son arrivée sur le lieu de l'accident, il constate l'ampleur de la collision. Les agents avec les véhicules d'intervention sont déjà présents. Le conducteur de la rame percutée est sorti. Le responsable de groupe va voir le conducteur du tramway tamponneur. Ce dernier est dans sa loge, debout, choqué et non blessé. Le conducteur n'a pas osé sortir pour voir les passagers, notamment car l'un d'entre eux est agressif envers lui.

Le responsable de groupe sort le conducteur de sa loge. Sa première question concerne le téléphone portable, car ce conducteur avait été sanctionné peu de temps auparavant pour cette raison : il lui répond que « *non, je ne touche plus au téléphone* ». À sa question sur ce qu'il s'est passé, le conducteur lui répond : « *j'ai tiré deux fois le freinage d'urgence, j'ai mis les patins, j'ai mis la clé KC [clé d'activation de la cabine]* ». Puis, pour l'isoler de l'agitation extérieure, il installe le conducteur dans un véhicule d'intervention.

Les pompiers interviennent dans les rames. La police installe un périmètre de sécurisation et prend les téléphones des deux conducteurs. Après les constats sur site de la police, les tests d'alcoolémie et de stupéfiants (qui ont été négatifs), le conducteur est emmené pour être entendu au poste de police.

Les équipes techniques vérifient si les rames peuvent repartir d'elles-mêmes. Le tramway tamponneur présente un problème technique : un câblot à l'avant a été sectionné lors de la collision, ce qui empêche tout démarrage. Un shunt est réalisé pour le remettre à rouler. Vers 20 h, accompagnés de deux véhicules d'intervention qui sécurisent les carrefours, les tramways sont rapatriés à vitesse faible au dépôt, d'eux-mêmes et sans encombre, avec un mécanicien à l'intérieur en plus d'un conducteur. Une fois au dépôt, les tramways sont alors immobilisés comme demandé par la police.

3.3 - Les données du poste de commande centralisé

Nous avons vu précédemment les enregistrements visuels de la localisation des rames sur un logiciel au PCC.

L'enregistrement des communications par le régulateur vers les conducteurs de la ligne 1, et réciproquement, sont possibles. Ces échanges vocaux entre le PCC et les conducteurs des tramways peuvent être un appel général du PCC à toutes les rames sur toute la ligne, un appel du PCC à une rame en particulier ou un appel du conducteur d'une rame au PCC. Les enregistrements ont pu être exploités dans le cadre de cette enquête. La retranscription complète des appels le 2 décembre 2019 à partir de 14 h 47 figure en annexe 3.

- L'appel général à 14h47:07 du PCC à tous les conducteurs sur la ligne 1 indique une perturbation sur V2 secteur Château d'Ô : « [...] *pour vous informer que nous avons une rame en panne sur V2 et en plein milieu du carrefour à Château d'Ô. [...] prudence sur le secteur Château d'Ô, nous avons une rame en panne [...]* ».
- L'appel général à 14h58:53 du PCC à tous les conducteurs sur la ligne 1 précise : « [...] *il faut patienter [...] les rames qui sont sur le secteur Occitanie-Château d'Ô, merci de patienter. [...]* »

L'appel du conducteur du tramway n° 2028 vers le PCC puis celui du régulateur vers le conducteur sont conformes aux témoignages.

3.4 - La retranscription des vidéoprotéctions frontales des tramways impliqués

3.4.1 - Vidéo frontale de la cabine avant du tramway tamponneur

Sur cette vidéo dont les images sont de qualité moyenne, on visualise la voie située devant le tramway tout au long de son parcours, en amont de la station Boutonnet jusqu'au lieu de la collision. Le tramway s'arrête à la station Universités, redémarre à faible vitesse et s'arrête à un feu quelques mètres plus loin. Quand ce dernier devient permissif, le tramway repart. Quelques centaines de mètres plus loin, il franchit le feu gérant l'intersection avec la route de Ganges et en sortant du carrefour, croise un tramway dans le sens inverse. Puis le tramway n° 2028 franchit le feu permissif du carrefour de La Colombière à 15h09:50 (horodatage de la vidéo du tramway n° 2028).



À 15h09:58, le tramway arrêté n° 2012 apparaît sur la vidéo.

Figure 14 - Caméra frontale avant (M2) du tramway n° 2028 à 15h09:58 (saisie écran BEA-TT)



Figure 15 - Visibilité réelle sur site au moment du début du freinage du tramway avec, pour comparaison, un tramway localisé à l'emplacement du tramway percuté (photo BEA-TT)



On parvient à distinguer les warnings allumés du n° 2012 une seconde avant le choc.

Le choc a lieu à 15h10:11.
Le tramway n° 2028 s'arrête immédiatement.

5 secondes plus tard, le tramway n° 2012, projeté par le choc, a fini d'avancer et ses warnings fonctionnent encore.

Figure 16 - Caméra frontale avant (M2) du tramway n° 2028 à 15h10:11 (saisie écran BEA-TT)

À 15h11:42, les premiers voyageurs sortent du tramway n° 2028 des deux côtés. À 15h11:48, le conducteur du n° 2012 est sorti et vient voir à l'arrière de son tramway. À 15h19:11, un véhicule d'intervention de TaM arrive sur place. À 15h24:38, le second véhicule d'intervention de TaM apparaît. À 15h27:03, les premiers véhicules d'intervention des pompiers apparaissent.

3.4.2 - Vidéo frontale de la cabine arrière du tramway tamponné

Il n'a pas été possible d'observer le parcours du tramway n° 2012 dans la zone précédant le lieu de l'accident, étant donné que l'enregistrement conservé commence à 15h09:27 alors que ce tramway est déjà arrêté. L'horodatage du n° 2012 est décalé de 4 secondes, par souci de cohérence avec l'enregistrement du tramway n° 2028.



À 15h09:56 le tramway n° 2028 apparaît sur la vidéo de la caméra frontale arrière.

Figure 17 - Caméra frontale arrière (M1) du tramway n° 2012 à 15h09:56 (saisie écran BEA-TT)



Le choc a lieu à 15h10:11.
Le tramway n° 2012 se déplace vers l'avant, sur quelques mètres.

Figure 18 - Caméra frontale arrière (M1) du tramway n° 2012 à 15h10:08
(saisie écran BEA-TT)



À 15h10:19, les tramways
sont tous deux arrêtés.

**Figure 19 - Caméra frontale arrière (M1) du tramway n° 2012
à 15h10:19** (saisie écran BEA-TT)

À 15h12:42, on aperçoit des voyageurs sortant par les portes du tramway n° 2012 et donnant sur l'entrevue.

3.5 - La retranscription des vidéoprotéctions intérieures

Six caméras sont installées à l'intérieur des tramways, en direction des différents espaces voyageurs. L'extérieur est partiellement visible à travers les baies vitrées des tramways.

➤ Vidéoprotéctions intérieures du tramway tamponneur

À 15h08:54, le tramway démarre de la station Universités des Sciences et des Lettres.

On observe un mouvement chez les voyageurs debout, d'avant en arrière dans le sens de circulation, 11 secondes avant le choc (15h10:00).

Puis il n'y a plus aucun mouvement ni de spécificité jusqu'au choc (15h10:11). Au moment du choc, de très nombreuses personnes se retrouvent au sol et/ou se sont cognées (au mobilier intérieur, entre elles). Le tramway s'immobilise immédiatement.

Les passagers commencent à évacuer à 15h12:26.

➤ **Vidéoprotections intérieures du tramway percuté**

À 15h09:21, le tramway n° 2012 est arrêté en ligne et les voyageurs patientent.

À 15h10:11 a lieu le choc.

À 15h11:04, les premiers passagers sortent.

Nous retenons que les voyageurs ont eu un mouvement d'avant en arrière dans le sens de circulation - mouvement caractéristique d'une légère décélération, 11 secondes avant le choc puis qu'il n'y a plus aucun mouvement ni de spécificité jusqu'au choc.

➤ **L'évacuation**

Après la collision et l'arrêt du tramway n° 2028, des poignées de portes ont été tirées par les voyageurs. Ces derniers ont ouvert manuellement les portes et ils ont évacué par eux-mêmes 2 minutes et 15 secondes après la collision. Cette évacuation s'est faite dans le calme, sur la voirie et sur la voie du tramway.

Les voyageurs du tramway n° 2012 ont évacué 53 secondes après le choc avec le n° 2028. De même, l'évacuation s'est faite dans le calme, sur la voirie.

3.6 - Les constats sur les tramways accidentés

3.6.1 - Les dommages matériels

Les cabines percutées ainsi que les châssis des deux tramways sont endommagés.



Figure 20 - Cabine du tramway tamponneur n° 2028 (photo BEA-TT)



Figure 21 - Déformation du châssis au niveau de la nacelle du tramway n° 2028 (photo BEA-TT)



Figure 22 - Cabine du tramway percuté n° 2012 (photo TaM)



Figure 23 - Déformation du châssis au niveau de la nacelle du tramway n° 2012 (photo BEA-TT)

Alstom a été mandaté par l'exploitant TaM afin de réaliser une expertise des deux tramways. Les bogies ne présentent pas de dommage significatif visible. Les structures quant à elles ont été impactées au niveau du châssis d'une nacelle sur chaque tramway et des cabines concernées par l'impact.

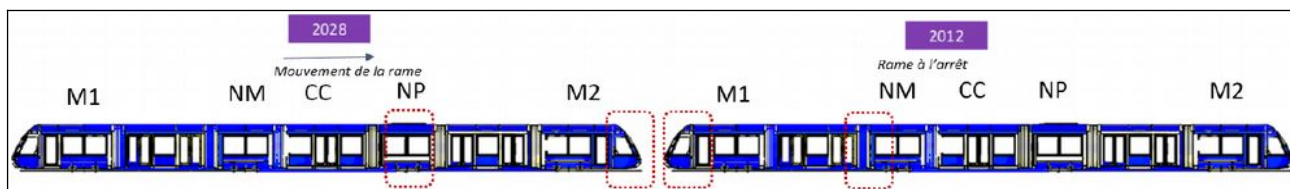


Figure 24 - Localisation des principaux dégâts matériels sur les tramways (encadrés rouges) (source : TaM)

Au vu des dégâts matériels sur les tramways, Alstom estime que la collision a eu lieu à une vitesse d'environ 25 km/h.

3.6.2 - Les données de l'enregistreur de paramètres du tramway tamponneur

L'enregistreur de paramètres du tramway mémorise tous les mètres de multiples données telles que la date et l'heure, la vitesse du tramway, la zone dans laquelle se trouve le manipulateur (traction/neutre/freinage), la commande du freinage d'urgence, la commande manuelle des patins magnétiques, le gong, etc. Les données brutes de l'enregistreur de paramètres du tramway n° 2028 sont présentées en annexe 4 du rapport.

Il existe un décalage de 13 secondes entre la vidéo du tramway n° 2028 et l'enregistreur de paramètres : les horaires de l'enregistreur de paramètres sont pris comme référence dans la suite du rapport.

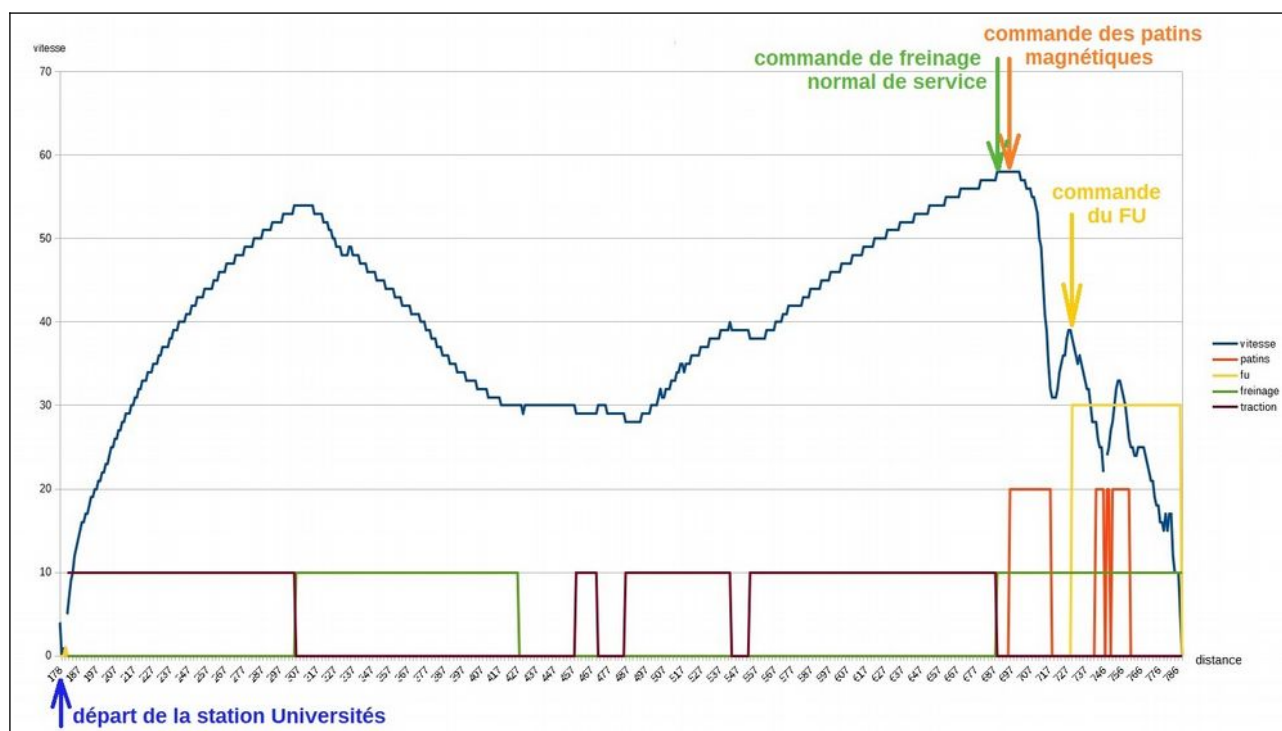


Figure 25 - Graphe des vitesses du tramway n° 2028 en fonction de la distance mesurée

Le parcours du tramway n° 2028 est le suivant :

- Il démarre de la station Universités (à 15 h 09) et accélère.
- Arrivé à 54 km/h, il freine, passe sur le neutre pour franchir l'intersection en curve de la route de Ganges, puis alterne entre accélérations et phases de neutre.
- Après le carrefour d'entrée / sortie de l'hôpital La Colombière, qu'il franchit à 40 km/h, le tramway n° 2028 accélère de nouveau pour atteindre 58 km/h.

- À ce moment-là, il est 15h10:14, le conducteur freine légèrement (en frein normal de service) puis applique les patins magnétiques au bouton-poussoir situé sur son pupitre.

Le mouvement des voyageurs observé sur les vidéos embarquées du tramway n° 2028 correspond au début du freinage normal de service et à l'application manuelle des patins dans l'enregistreur de paramètres.

- Via son manipulateur, il enclenche le freinage d'urgence à 38 km/h, selon l'enregistreur de paramètres, et ce, moins d'une seconde après la fin de sa commande manuelle des patins magnétiques. Le freinage d'urgence commande également l'application des patins.
- Une seconde et demie plus tard, le conducteur appuie de nouveau sur le bouton-poussoir des patins magnétiques. Cette commande ne change pas l'application

des patins magnétiques puisqu'elle est redondante avec celle passée précédemment par le freinage d'urgence (commande irréversible).

- 4 secondes après le freinage d'urgence, le conducteur désactive la cabine M2 via la clé d'activation (cf. figure 11), puis la réactive 1 seconde après pour la désactiver de nouveau, encore une seconde plus tard.
- Le choc a lieu à une vitesse non nulle et non identifiée dans l'enregistreur de paramètres. Toutefois, ce dernier présente un saut de valeurs entre 15 et 17 km/h, juste après la seconde désactivation de la cabine par le conducteur. De son côté, le Système Informatique Embarqué du tramway n° 2028 liste des défauts simultanés des mécanismes de verrouillage sur de nombreuses portes du tramway n° 2028 aux vitesses données par le tramway de 16 et 15 km/h.
- Entre le premier freinage normal et l'atteinte de la vitesse nulle, l'enregistreur de paramètres du tramway n° 2028 indique une distance de 99 mètres. Entre la commande du freinage d'urgence et la vitesse nulle indiquée par l'enregistreur de paramètres, une distance de 58 mètres est enregistrée.

La vitesse du tramway (telle que mesurée par ses capteurs), l'ensemble des actions effectuées par le conducteur et l'estimation du moment du choc sont récapitulées ci-dessous :

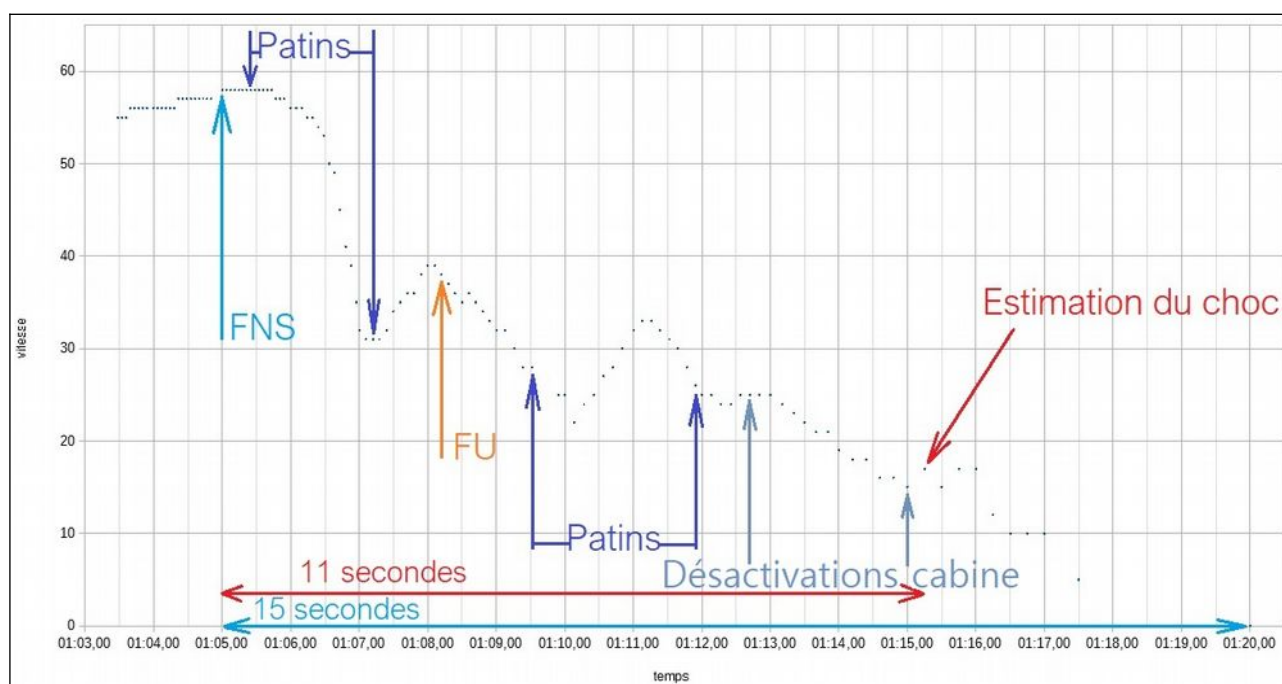


Figure 26 - Zoom sur la fin de courbe de la vitesse (enregistrée par le tachygraphe) en fonction du temps (avec t=0 au départ de la station Universités)

3.6.3 - Le comportement du tramway n° 2028

- **Distance de freinage enregistrée et distance de freinage réelle**

La transcription des données de l'enregistreur de paramètres sur la carte suivante permet d'identifier un écart entre l'emplacement exact de la collision et la distance mesurée par le tramway n° 2028 : la rame a parcouru 42 mètres de plus que ne le montre l'enregistrement.

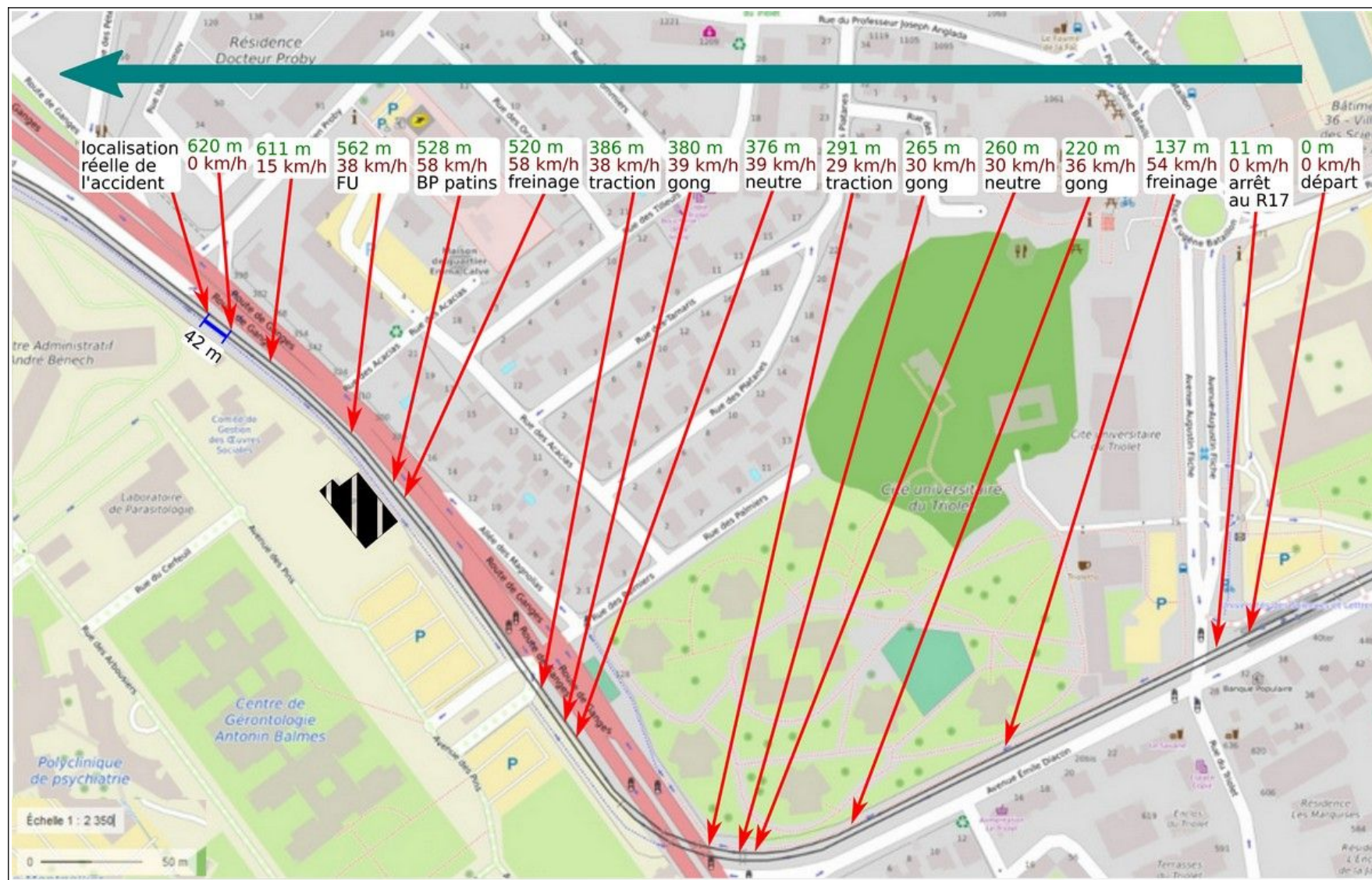


Figure 27 - Retranscription de l'enregistreur de paramètres du tramway n° 2028 depuis la station Universités jusqu'à la collision
(source : OpenStreetMap modifiée)

➤ **Phase de freinage normal de service et d'application des patins magnétiques**

L'enregistreur de paramètres indique que le freinage normal de service avec l'application quasi simultanée des patins magnétiques a lieu pendant 1,6 secondes et sur 22 mètres, en passant de $v_1=58$ km/h (16,11 m/s) à $v_2=32$ km/h (8,88 m/s). La décélération γ correspondante est : $\gamma=(v_1-v_2)/(t_1-t_2) = (16,11-8,88)/1,6 = 4,52$ m/s².

Le freinage maximum d'un tramway ne peut pas dépasser 3 m/s². La vitesse donnée par l'enregistreur n'est donc en toute hypothèse pas la vitesse réelle du tramway à ce moment-là. Elle lui est inférieure. Cette anomalie confirme qu'**un enrayage a eu lieu**.

➤ **Identification du début de l'enrayage et décélération jusqu'au choc**

Afin de déterminer à partir de quel moment l'enrayage s'installe, il s'agit d'identifier à quel moment la courbe présente une tangente qui est excessive. À 53 km/h, la mesure de la vitesse des roues chute brutalement et on peut donc supposer que l'enrayage a commencé à ce moment-là.

À partir du début de l'enrayage et jusqu'au choc, nous pouvons estimer la vitesse du tramway n° 2028 et donc également sa décélération.

Du début de l'enrayage jusqu'à la vitesse nulle, la décélération estimée est égale à : $\gamma = (v_1-v_2)/(t_1-t_2) = (53 \text{ km/h}-0)/13,54 = 1,08$ m/s².

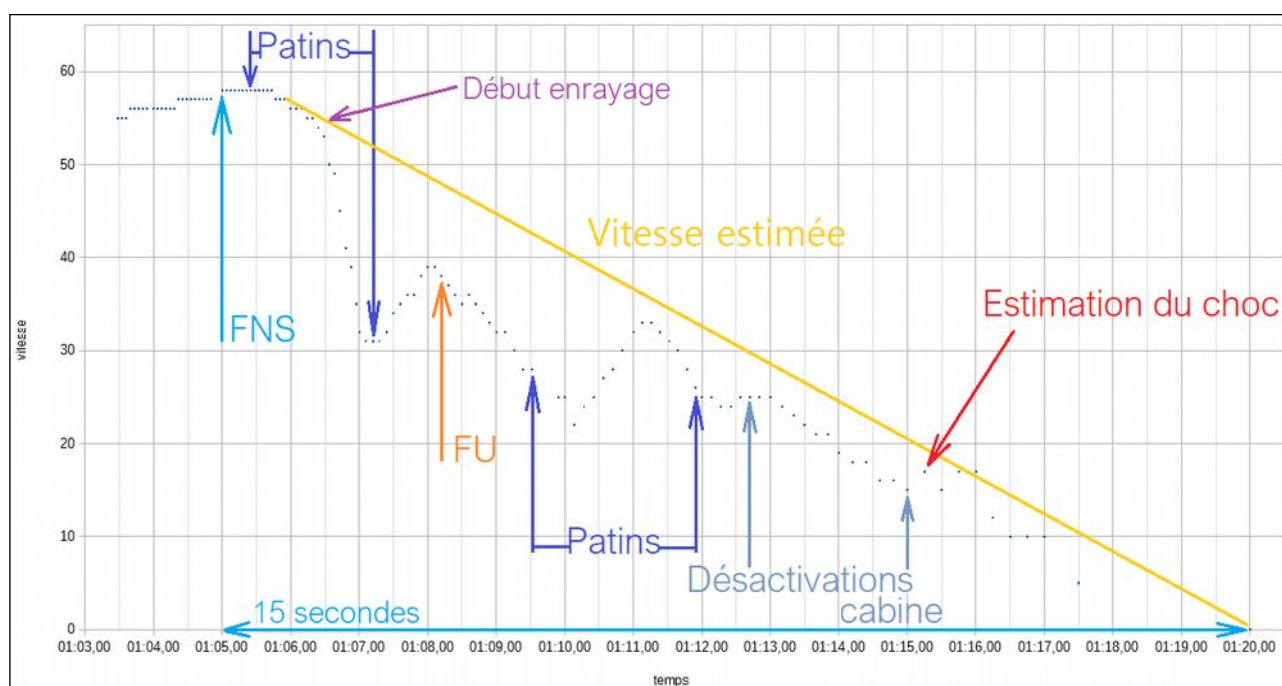


Figure 28 - Graphe vitesse (enregistrée par le tachygraphe) selon le temps, avec identification du début de l'enrayage et vitesse estimée

➤ **Estimation de la vitesse de choc**

Nous avons vu que l'enregistreur de paramètres indique un choc vers 16-17 km/h (vitesse donnée par les capteurs du tramway en enrayage). La vitesse peut être également évaluée grâce à la droite en jaune sur le graphe ci-dessus. Elle indique une vitesse de choc comprise entre 15 et 20 km/h.

➤ **Estimation de la vitesse lors de la commande du freinage d'urgence**

Le freinage d'urgence a eu lieu à une vitesse qui ne peut pas être donnée par l'enregistreur de paramètres car l'enrayage avait déjà commencé, mais qui est comprise entre 53 km/h (début de freinage) et 38 km/h (application du freinage d'urgence inscrit dans l'enregistreur). Toutefois, la droite de la vitesse estimée (jaune)

permet d'estimer une commande du freinage d'urgence au manipulateur à environ 48 km/h.

➤ **Estimation de la distance d'arrêt en freinage d'urgence**

L'application d'un freinage d'urgence à 48 km/h (13,33 m/s), sur rail sec, à 2,8 m/s² comme indiqué au §2.4.2, permet un arrêt du tramway au bout de :

$$d_{\text{visibilité}} = \frac{V_{\text{sécurité}}^2}{2a} + V_{\text{sécurité}} \cdot t_r \quad d = 13,33^2 / (2 \times 2,8) + 13,33 \times 0,85 = 43,1 \text{ mètres.}$$

avec $t_r = 0,85$ secondes (le temps de réaction machine est pris selon la norme NF EN 13452-1 relative aux systèmes de freinage des transports publics urbains et suburbains).

À 48 km/h, en freinage d'urgence, le tramway aurait donc dû s'arrêter au maximum en 43 mètres. Nous verrons au paragraphe suivant que la distance disponible était bien supérieure.

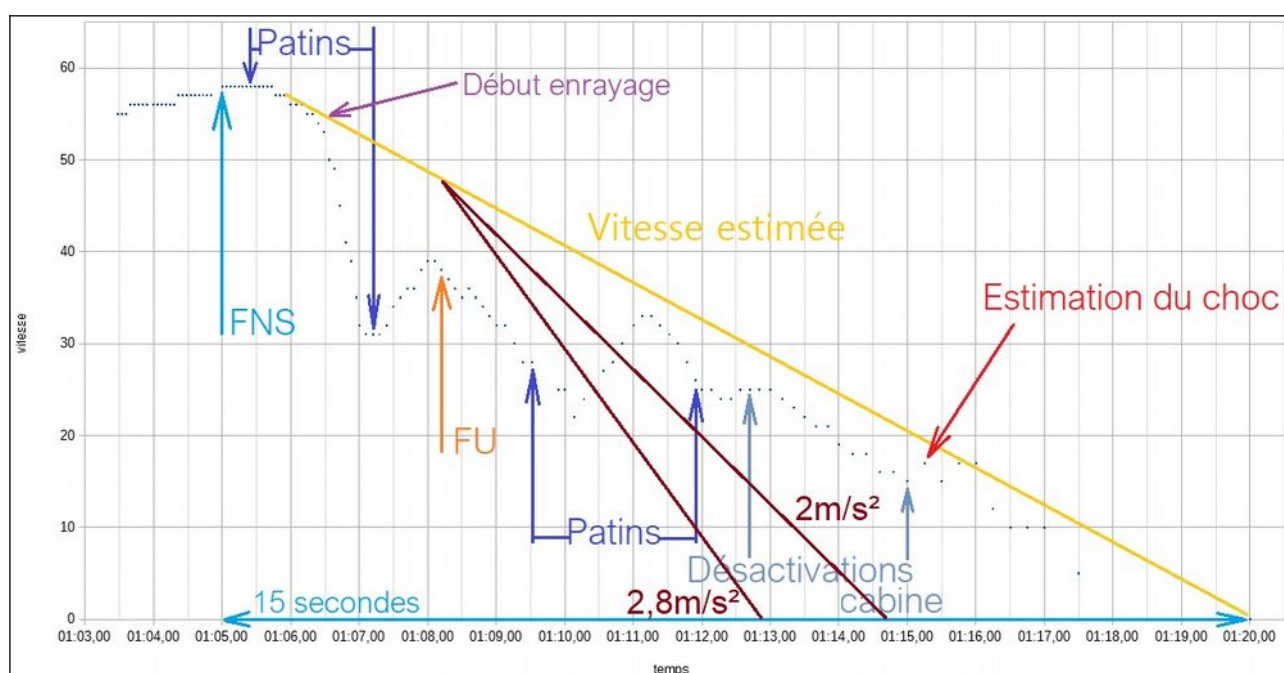


Figure 29 - Graphe vitesse (enregistrée par le tachygraphe) selon le temps, avec ajout des décélérations attendues en freinage d'urgence (2,8 m/s² en nominal ou 2 m/s² sur rail savonné) et leurs temps de freinage correspondants

➤ **D'autres données du tramway n° 2028 ont été collectées**, via des logiciels embarqués dans le tramway à savoir les relevés :

- des événements des équipements de traction,
- des événements du Système Informatique Embarqué,
- des événements de l'électronique de commande des freins du bogie porteur.

Ces relevés seront analysés ultérieurement.

En synthèse de ces premières observations, le tramway n° 2028 a freiné puis enrayé puis un freinage d'urgence a été commandé. La distance d'arrêt a été supérieure à la distance nominale. Nous croiserons ces données avec celles prises sur le terrain dans un paragraphe ultérieur. Une analyse approfondie du freinage sera menée dans la suite du rapport.

3.6.4 - Les données de l'enregistreur de paramètres du tramway percuté

Le tramway n° 2012 part de la station Universités à 15 h 05, soit 4 minutes avant le tramway n° 2028. Le comportement de conduite de son conducteur est prudent : il ne dépasse pas 40 km/h, maintient sa vitesse entre 30 et 40 km/h et freine de façon douce pour s'arrêter une centaine de mètres avant le carrefour de la station Lapeyronie.

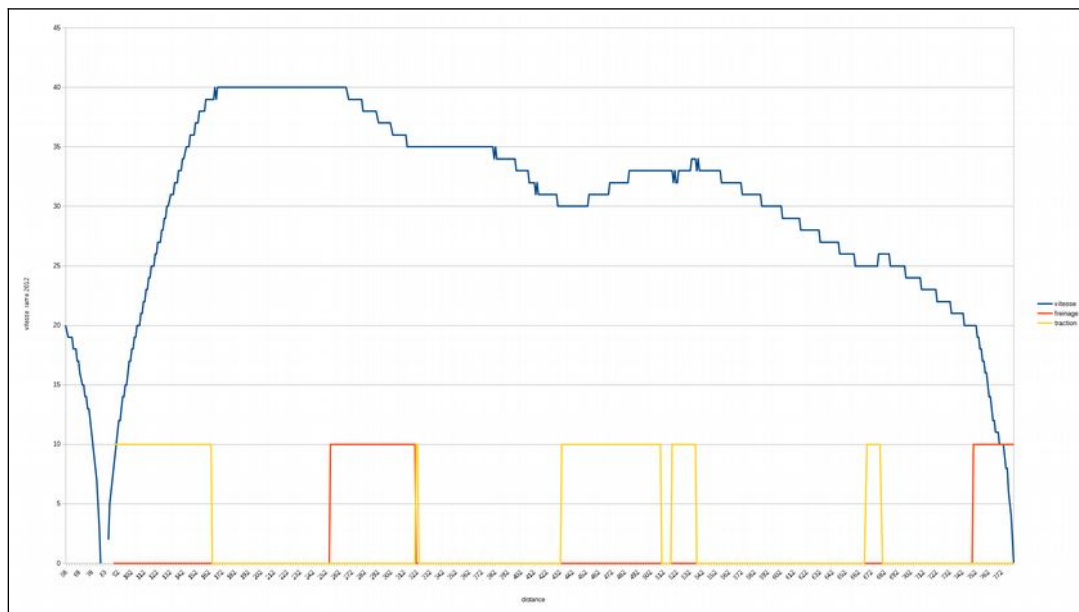


Figure 30 - Relevé des vitesses du tramway n° 2012 en fonction de la distance (en jaune les phases d'accélération de la rame, en rouge celles de freinage)

À la vitesse de 20 km/h (5,55 m/s), il freine sur 30 mètres et en 12 secondes jusqu'à arrêter son tramway. Sa décélération est égale à $\gamma = 0,46 \text{ m/s}^2$.

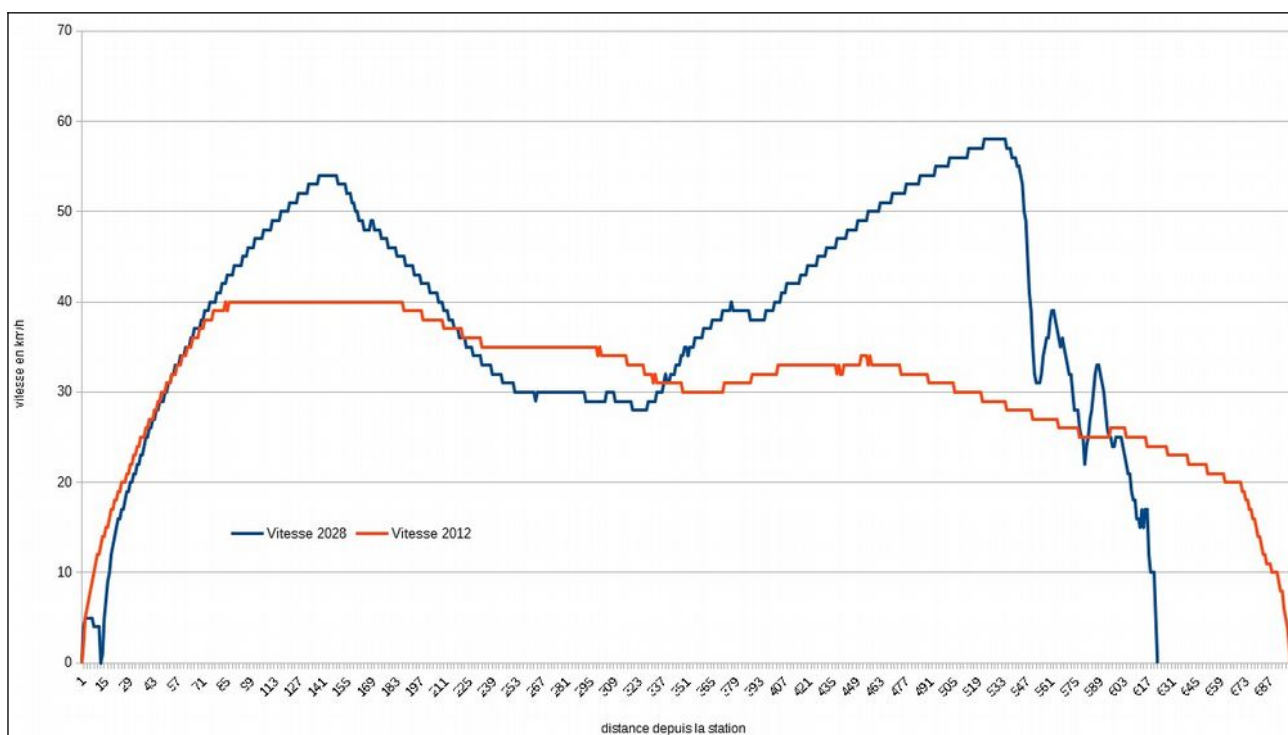


Figure 31 - Comparatif des distances parcourues/vitesses depuis la station Universités par les tramways n° 2012 et n° 2028 jusqu'à leurs arrêts respectifs

Lorsqu'on superpose les données de l'enregistreur du tramway n° 2028 et de celui du n° 2012, on obtient le graphe ci-dessus. On observe deux différences notables :

- Le comportement de conduite du conducteur du tramway n° 2028 est plus « dynamique » que celui du conducteur du tramway n° 2012, avec des vitesses plus élevées et des alternats entre accélérations fortes et freinages.
- Selon leurs enregistreurs de paramètres, les distances parcourues entre leur arrêt en station à Universités et leur arrêt final sont différentes (y compris en prenant bien en compte les 40 mètres du tramway n° 2012 qu'il a parcourus en plus). De plus, le tramway n° 2012 ne présente pas de courbe de vitesse caractéristique d'un enrayage, contrairement au tramway n° 2028.

3.7 - Les données du terrain

Étant donné que l'enregistreur de paramètres donne des distances parcourues grâce à ses capteurs de vitesse dont on a vu que ses données peuvent être incorrectes par rapport à la réalité en cas d'enrayage, nous allons revenir aux données invariables à savoir : les horodatages des enregistreurs de paramètres, les horodatages de la vidéoprotection embarquée et les distances sur site.

1. L'enregistreur de paramètres du tramway n° 2028 montre un freinage à 15h10:14, un freinage d'urgence à 15h10:17 (+ 3 secondes) et un arrêt à 15h10:29 (+ 15 secondes).
2. Le mouvement des passagers à 15h10:00 (horodatage vidéo du n° 2028) correspond au début du freinage normal de service, effectué par le conducteur et suivi quelques dixièmes de seconde plus tard par l'appui sur le bouton-poussoir des patins magnétiques. Les différentes caméras intérieures du tramway n° 2028 montrant une partie de la voirie publique extérieure confirment le visuel donné par la caméra frontale. Nous pouvons donc identifier le lieu où se trouve la cabine avant du tramway lorsque le freinage débute : au niveau du milieu du bâtiment de l'hôpital, dont l'un des murs est limitrophe du trottoir.

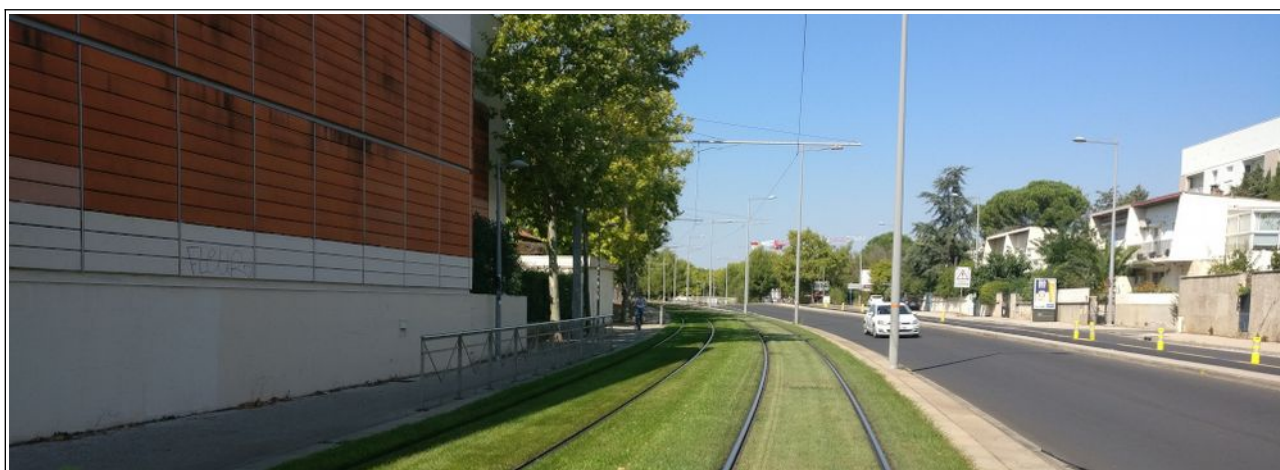


Figure 32 - Localisation du tramway n° 2028 au début de son freinage normal de service
(photo BEA-TT)

3. À 15h10:11 (horodatage vidéo du n° 2028) soit 11 secondes après le mouvement des passagers, le choc a lieu.

Sur site, le lieu exact du choc est identifiable grâce aux bris de verre. Il se situe en face du n° 398 de la route de Ganges.

Entre ces deux positions géographiques, nous mesurons une distance de **115 mètres**.



Figure 34 - Mesure de la distance de freinage au choc (source : geoportail)

En prenant une vitesse de début de freinage à 58 km/h et un choc à 15 km/h, en 11 secondes, la décélération globale est égale à :

$$\gamma = 43 \text{ km/h} / 11 \text{ sec} = 11,9 \text{ m/s} / 11 \text{ sec} = \mathbf{1,08 \text{ m/s}^2}.$$

Avec cette décélération, si le tramway n'avait pas été arrêté par le choc (ici pris à 15 km/h), il aurait freiné encore 3,9 secondes supplémentaires. Soit environ 16 mètres supplémentaires ce qui donnerait une distance de freinage totale de 131 mètres.



Figure 33 - Lieu de la collision, identifiable par les bris de verre tombés au sol (photo TaM)

3.8 - Les constats immédiats sur la voie

3.8.1 - Visibilité devant le tramway tamponneur

Un guide technique, publié par le STRMTG en 2017, sur la « Sécurité des zones de manœuvre de tramways » traite entre autres de la sécurisation des configurations des systèmes tramway avec perte de visibilité (en raison d'un masque ou d'une courbe) à distance de freinage. Il définit les règles de distance de freinage et de visibilité à respecter.

La collision a lieu dans une ligne légèrement courbe. La première visibilité qu'a pu avoir le conducteur du tramway n° 2028 sur l'arrière du tramway n° 2012 est illustrée par la vue aérienne ci-dessous et correspond à la vue donnée par la figure 14). La distance correspondante est de 133 mètres.



Figure 35 - Distance de visibilité (source : geoportail)

La vitesse maximale autorisée dans la zone dans le sens de circulation de l'accident est de 50 km/h, soit 13,88 m/s. Selon le guide sur la « Sécurité des zones de manœuvre de tramways », la distance de visibilité nécessaire est donnée pour un arrêt en freinage normal de service à 1,2 m/s² et un temps de réaction homme + machine de 1,5 s par la même formule que précédemment : $d_{\text{visibilité}} = 13,88^2 / (2 \times 1,2) + 13,88 \times 1,5 = 101,09$ mètres

À 58 km/h, cette distance vaut 132,31 mètres. Nous reviendrons plus loin sur le caractère excessif de la vitesse du conducteur.

Puisque toutefois la distance de visibilité sur site est de 133 mètres, il ne s'agit pas d'une zone avec perte de visibilité à distance de freinage. Le conducteur du tramway n° 2028 avait la visibilité sur le tramway n° 2012 pour s'arrêter en freinage normal de service, et donc a fortiori en freinage d'urgence.

3.8.2 - *État visuel du rail*

Un régulateur a indiqué qu'à cette période-là de l'année, il y a de nombreuses remontées des conducteurs au PCC via la radio concernant des feuilles collées au rail. Il n'est pas possible de quantifier ou de localiser les zones car les remontées des conducteurs concernant des « glissades » ne sont pas tracées dans la main courante.

Le témoignage de l'exploitant indique que, lors de leur visite à pied sur site juste après l'accident, ils n'ont pas constaté d'anomalie ou de saleté particulière sur la voie. Pas plus de précision ou de photo n'ont pu être apportées.

Sur les vidéos, par ailleurs de mauvaise qualité, nous ne constatons pas la présence de feuilles à proximité immédiate des rails. Il est possible d'en observer dans l'entre-voie.



Figure 36 - État de la voie devant le tramway n° 2028 – milieu du freinage
(vidéo frontale du tramway n° 2028)

3.9 - Conclusion sur les constats immédiats

Le 2 décembre 2019, le tramway n° 2028 circulant sur la ligne 1 du réseau montpelliérain rattrape le tramway n° 2012 arrêté en ligne devant lui. La collision a lieu dans une ligne légèrement courbe, sur un site propre au tramway, entre les stations Universités des Sciences et des Lettres et Hôpital Lapeyronie.

La collision a fait 41 blessés légers parmi les 200 passagers des deux tramways (environ 100 passagers présents dans chaque tramway au moment de l'accident). Des dégâts matériels importants sont constatés sur les deux tramways. Les cabines impactées sont endommagées et la structure du châssis des deux tramways a subi des déformations importantes. Toutefois, les deux tramways n'ont pas déraillé et ils rentreront au dépôt par leurs propres moyens, à faible vitesse.

Le conducteur du tramway était en excès de vitesse mais lorsqu'il a commandé un freinage d'urgence, la distance devant lui était suffisante pour que dans une situation normale, il puisse s'arrêter avant le tramway n° 2012. Les performances de freinage du tramway n° 2028 associées à un phénomène d'enrayage ont été inférieures à celles qui étaient attendues, causant ainsi la collision.

Ces constats nous amènent à concentrer nos investigations sur :

- le comportement de conduite du conducteur ;
- l'état de propreté de la voie, et sa maintenance ;
- le comportement au freinage et la maintenance du matériel roulant.

3.10 - Les investigations sur le comportement de conduite du conducteur

3.10.1 - Le comportement du conducteur du tramway tamponneur

Le 2 décembre 2019, avant la collision, le parcours du conducteur du tramway n° 2028 présente des particularités faisant question concernant les vitesses pratiquées et l'usage des patins magnétiques.

Le respect des limitations de vitesse

Sur les trois stations précédant la collision le 2 décembre 2019, le conducteur dépasse plusieurs fois les limitations autorisées :

1. À son premier passage de la journée devant le Centre Hospitalier Universitaire en direction de la station Hôpital Lapeyronie, le conducteur atteint 54 km/h soit 4 km/h au-dessus de la limitation (non représenté sur la figure ci-dessous).
2. À son second passage, un excès de vitesse de 8 km/h est observable entre les stations Boutonnet et Universités.
3. Venant de la station Saint-Éloi, à partir de la courbe et jusqu'à la station Universités, la limite de vitesse est de 30 km/h. Le conducteur maintient une vitesse en permanence au-dessus de la limitation, avec un maximum à 44 km/h.
4. Entre la station Universités et la courbe de Ganges, la limite de vitesse est de 40 km/h. Le conducteur atteint un maximum de 54 km/h soit 14 km/h au-dessus de la limitation.
5. Au second passage devant le Centre Hospitalier Universitaire et juste avant la collision, il atteint 58 km/h soit 8 km/h au-dessus de la limitation.

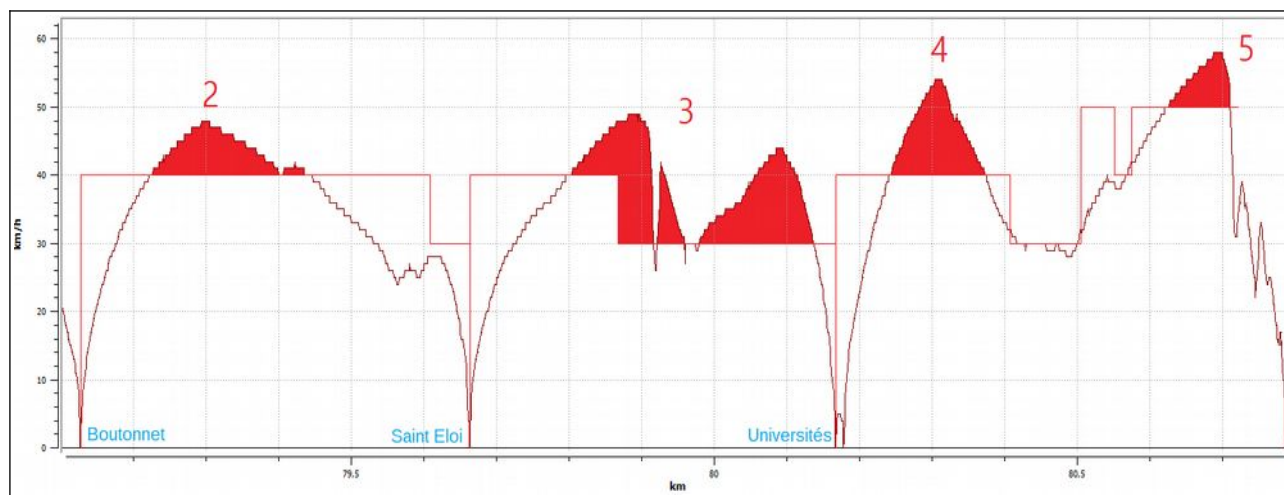


Figure 37 - Courbe de vitesse du tramway n° 2028 en fonction de la distance et identification des seuils limites de vitesse sur site (en rouge, les survitesses)

L'usage des patins magnétiques

L'enregistrement des paramètres indique des usages du bouton-poussoir des patins enclenchés par appui sur le bouton-poussoir localisé sur le pupitre :

- pour s'arrêter en station Universités (19 enregistrements d'un actionnement de ce bouton-poussoir lors de son arrêt en station, sur ce seul arrêt, depuis une vitesse de 41 km/h jusqu'à atteindre l'arrêt).

- en divers lieux, concomitamment à une action de freinage au manipulateur (9 fois au total depuis sa prise de service à 13 h 26, soit 1 h 34 min avant la collision).
- pendant le freinage normal de service, appliqué de façon continue juste avant l'enclenchement du freinage d'urgence précédant la collision.
- pendant le freinage d'urgence, le conducteur appuie 3 fois sur le bouton-poussoir.

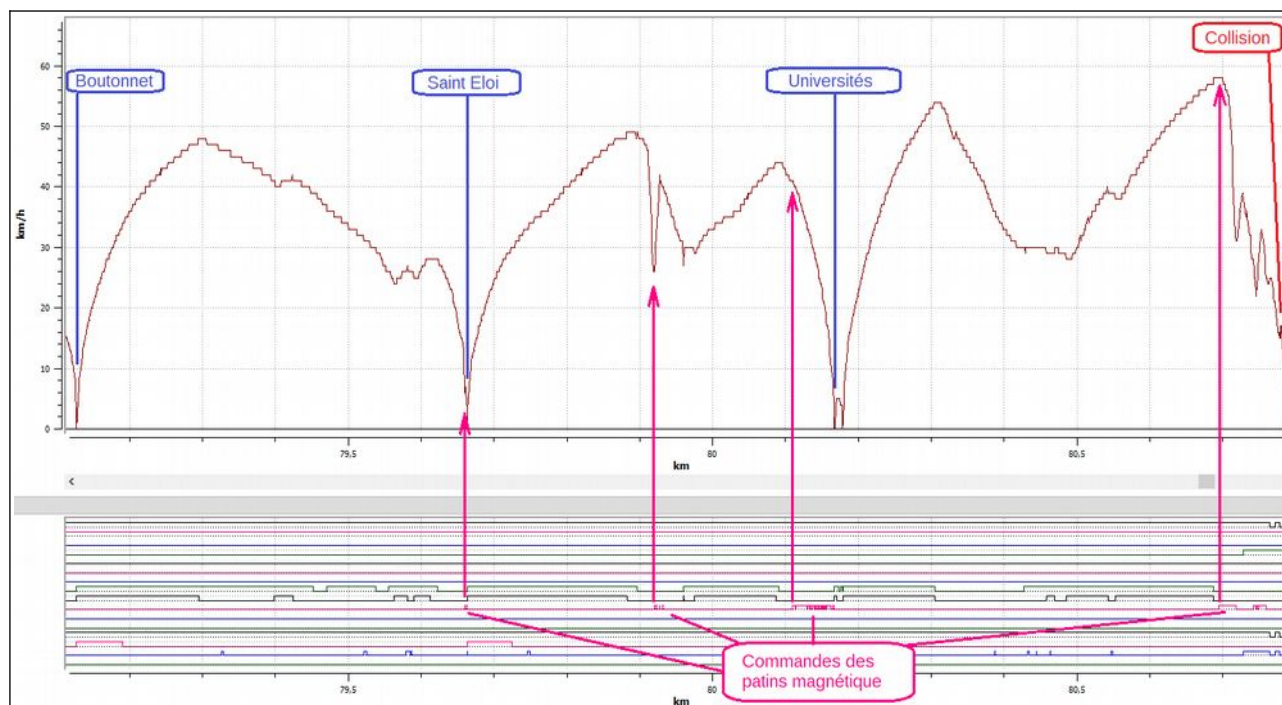


Figure 38 - Informations de l'enregistreur de paramètres de la rame 2028 sur les trois dernières stations avant la collision (source : Deuta, modifiée)

Le règlement de circulation des tramways de TaM indique dans son chapitre « Utilisation des systèmes de freinage » :

« B - Utilisation du frein électromagnétique (patins)

En cas de mauvaise adhérence, pour faciliter le démarrage en côte, il est autorisé d'utiliser ponctuellement la commande des patins.

Cette recommandation ne s'applique pas en phase de freinage, car l'usage des patins peut provoquer un arrêt brutal de la rame dangereux pour les passagers. »

On constate que le conducteur du tramway n° 2028 a utilisé ce bouton-poussoir des patins de très nombreuses fois au cours de sa conduite, en phase freinage, en net écart avec les consignes de conduite : il l'utilise pour freiner mais également il applique des impulsions et non un maintien continu.

Il est ici indispensable de rappeler que le frein électromagnétique commandé manuellement par le bouton-poussoir des patins ne doit en aucun cas se substituer au freinage normal de service. En effet, il crée un jerk⁴ important pour les voyageurs, il installe des réflexes inadéquats chez les conducteurs et retarde l'application du freinage d'urgence afin d'arrêter le tramway face à un obstacle (piéton, voiture).

4 Le jerk, ou à-coup, est le taux de variation d'une accélération ou décélération. Dans le système international d'unités, il s'exprime en m/s³.

Enfin, nous avons noté qu'à 14 h 16, à la demande du PCC, le conducteur du n° 2028 devait utiliser l'aiguillage implanté après la station Place de l'Europe afin de prendre la direction de la station Pompignane de la ligne 4. Cet « itinéraire VIA », classique, est demandé dans un but de régulation de la ligne. Or le conducteur se trompe et poursuit son parcours vers Comédie. Cette erreur d'itinéraire ne pose pas de souci sécuritaire et n'a pas de lien direct avec l'accident, mais pourrait être l'indice d'une certaine distraction ou précipitation du conducteur.

Absence de freinage de sécurité lors du rattrapage le 2 décembre 2019

Alors que son tramway se rapprochait dangereusement du n° 2012, le conducteur n'a pas actionné le bouton-poussoir du frein de sécurité situé sur son pupitre. Le règlement de circulation des tramways de TaM précise l'utilisation attendue du frein de sécurité (appelé également « de secours ») :

« La procédure par coup de poing déclenche les systèmes de freinage mécanique et électromagnétique (patins magnétiques), le frein de secours ne doit être utilisé :

- Qu'en cas de défaillance des autres systèmes de freinage.*
- Lorsque la rame est déjà arrêtée.*
- Dans toute situation d'arrêt d'urgence où le conducteur ne maîtrise pas le comportement de la rame. »*

Juste avant la collision, au lieu d'actionner la clé d'activation de la cabine M2, le conducteur aurait dû enclencher le frein de sécurité, puisqu'il ne maîtrisait plus le comportement de la rame.

Le conducteur a indiqué n'avoir jamais enclenché le freinage de sécurité au cours de sa carrière, excepté une fois lors de la démonstration de remorquage-poussage en formation.

Observations de conduite réalisées par son encadrement

Selon le règlement de circulation de TaM, « des relevés réguliers ou aléatoires des centrales tachymétriques sont effectués afin de contrôler le respect des limitations de vitesse ». Lors d'un de ces relevés, il est observé une survitesse le 10 septembre 2018 dans la zone de la station Pablo Picasso au cours de sa conduite sur la ligne 3 : pendant 10 secondes, le conducteur dépasse les 40 km/h jusqu'à atteindre 58 km/h. Un rappel des consignes lui est prodigué par son chef de groupe, le conducteur en prend note.

Le 20 février 2019, lors d'une observation de conduite régulièrement effectuée par les encadrants des conducteurs, le responsable de groupe indique dans sa fiche d'accompagnement que le conducteur a « *une conduite souple et sécuritaire mais en dessous de la vitesse commerciale. J'informe [le conducteur] que le PCC m'interpelle régulièrement pour me faire part de son retard important et permanent en ligne, ce qui leur pose problème. [Le conducteur] accepte ces remarques et m'indique qu'il allait faire des efforts pour y remédier* ».

En synthèse, le conducteur n'était pas identifié comme un conducteur à risque par l'exploitant. Le 2 décembre 2019, il dépasse les limitations de vitesse à plusieurs reprises dont notamment dans la zone de l'accident, et il fait un usage incorrect des patins magnétiques via le bouton-poussoir au pupitre.

Le fait qu'il soit à une vitesse supérieure de 8 km/h à celle autorisée a aggravé la situation en augmentant la distance de freinage nécessaire à son arrêt.

3.10.2 - Informations des régulateurs du PCC aux conducteurs et comportement de conduite des conducteurs

Nous allons étudier les informations données au cours de l'incident de panne du tramway n° 2030 (début 14 h 36) jusqu'à la collision entre les tramways n° 2028 et 2012. Pour rappel, le n° 2030 a nécessité un poussage pour être rapatrié au dépôt.

La gestion des circulations par les régulateurs

Dans le RSE, l'article 3.10. "Gestion des événements « importants »" indique :

« De manière générale, tout incident ou accident implique de la part du régulateur en poste au PCC les actions suivantes, sur réception de l'appel d'un conducteur ou d'une autre source signalant un incident ou un accident :

- Confirmation de la réception du message et transmission des consignes applicables, selon la nature de l'évènement.*
- Demande d'intervention des Secours, Pompiers, SAMU, Police, selon la nature et gravité de l'incident.*
- Appel aux deux rames convergentes V1 et V2, puis information à l'ensemble des véhicules par appel général.*
- [...] »*

Dans le cadre de l'incident concernant le tramway n° 2030, le régulateur a bien procédé à une information de l'ensemble des tramways sur la ligne, incluant donc le n° 2028. Le message est clair : on sait ce qu'il se passe et le régulateur demande d'abord de la « prudence sur le secteur Château d'Ô ». Il réitère ce message quelques minutes plus tard, en avertissant de ce qui se passe (nature, localisation et sens de l'incident) et par trois fois, il demande à l'ensemble des conducteurs de la ligne 1 de patienter. En 2019 et 2020, des sessions de formation à la communication ont été dispensées aux agents de terrain (techniciens et chefs d'équipe d'installations fixes ainsi que les agents de maîtrise) et aux régulateurs, avec un retour positif. Le régulateur avait bien suivi cette formation.

Le conducteur du tramway n° 2028 nous a indiqué qu'il s'attendait à – ou souhaitait – un appel radio du régulateur informant qu'il y avait devant lui une rame arrêtée en pleine voie. Il indique n'avoir jamais rattrapé une rame arrêtée en pleine voie sans information préalable du régulateur. Il n'est pas prévu – ni temporellement faisable – que le régulateur appelle un à un chaque tramway qui s'approchait de la zone où le n° 2030 était en panne. Ses deux appels généraux avaient bien pour but de prévenir rapidement l'ensemble des conducteurs.

Dans la majorité des cas d'incident ou de panne d'un matériel roulant débouchant sur un remorquage-poussage, les consignes PCC impliquent a maxima de procéder à une gestion en tronçon de la ligne ou à effectuer une déviation vers une autre ligne tramway, en laissant de la latitude. L'exploitant nous indique que le régulateur choisit s'il faut ralentir ou « geler » la ligne, en fonction de la situation rencontrée et de son expérience. Le régulateur témoigne que geler la ligne a un impact fort sur l'ensemble de la ligne et non pas uniquement sur la zone de la panne. Il a choisi de ne pas geler la ligne 1 afin de ne pas pénaliser les rames de l'autre côté de la ligne, ni celles sur le tronc commun en centre-ville. Même si son choix avait été différent, il est très probable que des bouchons de rames se seraient formés, conduisant à ce que des tramways puissent se trouver arrêtés en ligne, reproduisant les conditions initiales du rattrapage.

Le comportement de conduite

Dans le RSE, il est indiqué que : « *La conduite est assurée par un conducteur titulaire de l'habilitation à la conduite commerciale. Il doit respecter les consignes de limitation de vitesse indiquées par panneaux sur la ligne ou par consigne d'exploitation. La sécurité repose :*

- *sur le principe de la conduite à vue avec une démarche anticipative, sur l'ensemble du réseau ferré y compris les zones de terminus et de remisage,*
- *sur le respect de la signalisation routière et ferroviaire aux carrefours et sur les zones de manœuvre, sauf mode dégradé décrit dans les consignes d'exploitation, [...] »*

La conduite à vue est le principe premier de conduite sur toute ligne de tramway. Elle est ainsi définie dans le règlement de circulation des tramways de l'exploitant TaM : « *Le conducteur de tramway circule en marche à vue, c'est-à-dire qu'il adapte sa vitesse à l'environnement dans lequel il progresse. Lorsqu'il circule en ligne, le conducteur doit appliquer les mêmes règles de prévoyance et de défiance que celles en vigueur pour la conduite de tout véhicule de transport. Il doit être en mesure d'arrêter sa rame en toute circonstance.* »

Ce comportement n'a pas été observé chez le conducteur du tramway n° 2028 au moment du rattrapage : il n'a pas adapté la vitesse de sa rame en fonction des informations doublement données par le PCC (et a même dépassé largement les vitesses maximales), il n'a pas été défiant vis-à-vis de la situation vers laquelle il se dirigeait (bouchons de tramways).

Le conducteur du n° 2028 ne devait pas attendre d'indication orale dédiée. Il aurait dû, comme le conducteur du n° 2012, prendre en considération l'appel général, anticiper l'accumulation de tramways qui se formait devant lui et réduire sa vitesse, en appliquant le principe de conduite à vue prônant des règles de « prévoyance » et de « défiance » selon le règlement de circulation des tramways de TaM.

En conclusion, malgré les appels à la prudence par le PCC, le conducteur roulait au-delà de la limitation de vitesse alors qu'il aurait dû au contraire réduire sa vitesse. Aucun facteur organisationnel ou environnemental n'est identifié comme ayant pu favoriser cela.

3.11 - Les investigations sur la voie dans la zone de la collision

3.11.1 - Le comportement des rames sur la zone de la collision et sur le reste de la ligne 1, le 2 décembre 2019

Lors du freinage avant le rattrapage, le tramway n° 2028 a activé son anti-enrayeur : ce comportement était-il unique ou existait-il des précédents ? Nous avons pu étudier des données de trois enregistreurs de paramètres de tramways en circulation le 2 décembre 2019 : les n° 2028, 2012 et 2011. Tous sont des Citadis 401 et ils ont commencé à circuler vers 9 h 30.

Tout d'abord, le tramway n° 2028 a connu sur son parcours des enrayages avant l'accident de 15 h 10 : à 15 h 08 dans la courbe entre Saint-Eloi et Universités, à 14 h 33 de Millénaire à Place de France, à 14 h 24 de Moularès vers Port Marianne, à 13 h 53 sur l'interstation d'Hôpital vers Universités (même zone que la collision mais sens opposé) et à 12 h 56 de Boutonnet vers Saint-Éloi.

Par ailleurs, le tramway n° 2012, circulant quelques dizaines de minutes devant le n° 2028, a freiné dans la même zone que la collision. Son enregistreur de paramètres indique un freinage doux et sans enrayage, la décélération étant de 0,46 m/s² (cf. figure 30). Avec une conduite différente et une vitesse moins élevée, la voie et le matériel roulant n'ont pas été poussés dans leurs limites.

Nous avons étudié le comportement des trois tramways sur la zone de la collision à chaque passage avant la collision. En identifiant, dans les deux sens de circulation entre la courbe de la route de Ganges et la station Hôpital Lapeyronie, les freinages et le cas échéant, les enrayages des n° 2028, 2012 et 2011, nous obtenons la synthèse suivante :

- 18 freinages s'effectuent sans enrayage,
- 4 freinages connaissent un enrayage, en sus de celui ayant conduit au rattrapage.



Figure 39 - Localisation, horodatage et vitesse initiale des freinages avec ou sans enrayage dans la zone de la collision

(en rouge : l'enrayage a eu lieu lors d'un freinage, en vert : le freinage n'a pas présenté d'enrayage)

(source : Google maps modifiée)

Puis nous nous sommes intéressés à l'ensemble de la ligne 1 afin de vérifier si des enrayages avaient eu lieu en d'autres endroits le 2 décembre 2019.

Des enrayages ont commencé à partir de 12 h 30 sur la ligne 1 pour ces trois rames. Ils se sont intensifiés vers 13 h et une grande partie a eu lieu dans une large zone autour de l'interstation Universités – Hôpital. Les extrémités de la ligne sont également concernées. Les enrayages ont lieu à des vitesses comprises entre 19 et 54 km/h. Excepté celui de la collision, aucun enrayage n'a eu lieu au cours d'un freinage d'urgence. Les freinages normaux de service entraînant des enrayages ont eu lieu à des vitesses et dans des contextes différents. Le centre-ville n'est quasiment pas concerné.

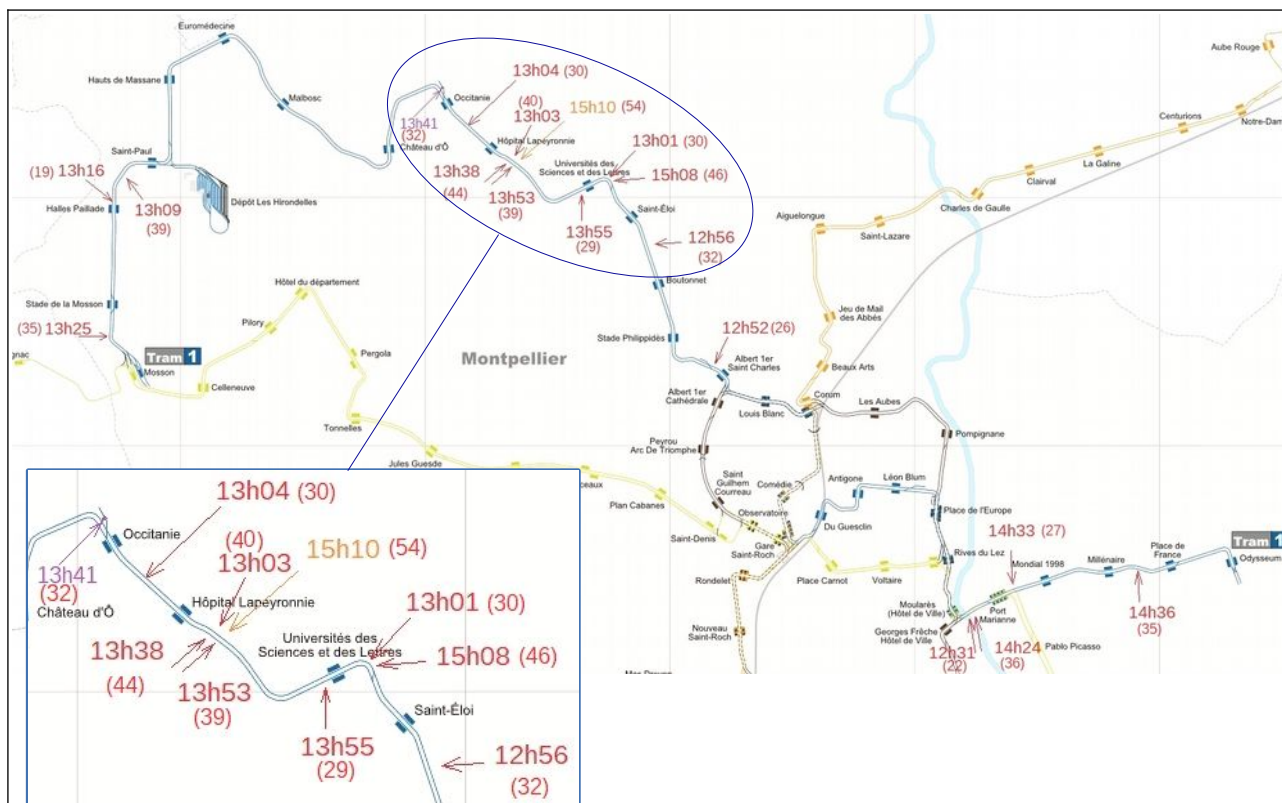


Figure 40 - Schéma des freinages classiques ou avec enrayages sur la ligne 1 pour trois rames le 2 décembre 2019 (source : cartometro.com, modifiée)

Les enrayages n'étaient donc pas rares ce jour-là. L'interstation Universités – Hôpital ressort (avec 5 enrayages) mais elle n'est pas la seule zone touchée.

En supplément, 2 enregistreurs de paramètres ont été vérifiés sur des circulations en novembre 2020 et 4 autres enregistreurs en mars 2021 : aucun d'eux ne présente de courbe caractéristique d'enrayage.

Il ne s'agit donc pas d'une problématique exclusivement localisée dans une zone de la ligne 1 ou exclusive à un seul tramway de la flotte en circulation ce jour-là. Les zones concernées ne sont pas celles identifiées par l'exploitant comme étant les plus polluées par des feuilles : ces dernières ne sont pas forcément le seul contaminant en cause.

3.11.2 - Quelques définitions préalables concernant l'adhérence rail / roue

Pour un véhicule ferroviaire, la puissance de traction et de freinage est transmise par les roues au rail et repose donc sur le frottement d'une roue en acier sur un rail en acier.

Le contact rail / roue : la roue est en contact avec la partie supérieure du rail, la surface de contact entre la roue et le rail est très petite ($\sim 1,5 \text{ cm}^2$). Ce contact est essentiel, car c'est par lui que passe l'ensemble des efforts de traction et freinage. Sa forme dépend des géométries du rail et de la roue, de l'élasticité des matériaux en contact déformés par le poids du véhicule mais aussi de la position latérale et de l'angle de la roue par rapport au rail.

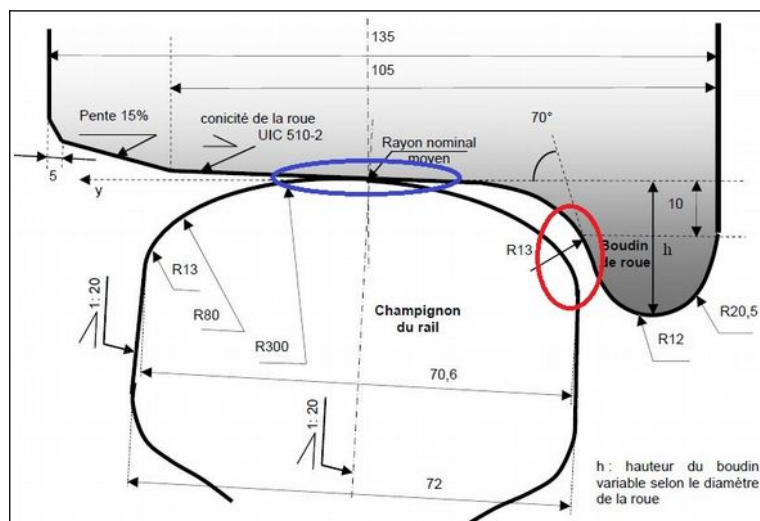


Figure 41 - Profils du champignon du rail et de la table de roulement de la roue
(En bleu, le contact de la roue avec le rail.

En rouge, le contact du boudin de roue avec le bord intérieur du rail.)

(source : « Transport ferroviaire : gestion de l'adhérence », J-C. Alacoque et P. Chapas)

L'adhérence est un frottement qui se produit entre les roues d'un véhicule et les rails, permettant ainsi la transmission d'un effort de traction ou de freinage. Elle est caractérisée par le coefficient de frottement, nombre sans dimension et positif, qui est le rapport entre le module de l'effort de traction – ou de freinage – réellement transmis au rail et le module de la force normale au plan de pose du rail. On parle d'adhérence dégradée quand le coefficient de frottement entre les roues et les rails est insuffisant pour transmettre les efforts mécaniques de traction ou de freinage.

3.11.3 - Les facteurs potentiels de dégradation de l'adhérence

De nombreux facteurs peuvent influencer l'adhérence rail / roue. Sont identifiés dans la littérature scientifique⁵ :

➤ les facteurs concernant le matériel roulant :

- la vitesse de circulation, car l'adhérence maximum sollicitable diminue en fonction de la vitesse du véhicule⁶,
- une dissymétrie même faible des profils de roues d'un même essieu,
- une dissymétrie excessive de diamètres des roues entre essieux d'un même bogie,
- la charge à l'essieu,
- la propreté du bandage de la roue,
- le matériau de la roue – mais également du rail (déformation élastique influençant la taille du contact rail / roue),

⁵ « Évaluation de l'adhérence au contact roue-rail par analyse d'images spectrales. Traitement des images », Claire Nicodeme. Université Paris sciences et lettres, 2018. Français. NNT: 2018PSLEM024

⁶ « Transport ferroviaire : gestion de l'adhérence. », Jean-Claude Alacoque, et Pierre Chapas, Technique de l'ingénieur, 2005

➤ les facteurs concernant le rail :

- l'état de surface de la table de roulement des roues,
- la pose de la voie (notamment l'angle d'inclinaison des rails),
- le ressuage des rails (la dilatation de l'acier permet aux éléments présents en surface de pénétrer à l'intérieur, particulièrement les corps gras. La rétractation de l'acier des rails en raison d'une baisse de sa température entraîne alors le ressuage en surface des corps gras qui l'ont pénétré).

➤ l'environnement :

- les conditions météorologiques (pluie, neige, glace, température, hygrométrie...),
- la pollution atmosphérique et industrielle (déposant sur la surface du rail des composés qui, mélangés à une faible quantité d'eau, forment sur la surface du rail un « film gras »),
- la localisation des voies dans des secteurs boisés (avec en automne la présence de feuilles mortes humides sur les rails).

Les facteurs influents sont ainsi nombreux. Certains peuvent être maîtrisés tandis que d'autres sont aléatoires. Seule une analyse chimique des résidus déposés sur la table de roulement du rail réalisée juste après l'accident aurait pu donner des indications quant aux composants présents à ce moment-là. De plus, il y a une difficulté à répondre à une situation d'adhérence dégradée en raison de l'absence de dispositif de mesure qualitative pour évaluer le besoin de moyens curatifs et / ou correctifs à mettre en place. La table ci-dessous et la figure suivante donnent des amplitudes de variation du coefficient d'adhérence en fonction de l'état du rail.

Rail conditions	Adhesion coefficient	Rail conditions	Adhesion coefficient
Dry and clean	0.25–0.3	Moisture	0.09–0.15
Dry with sand	0.25–0.33	Light snow	0.10
Wet and clean	0.18–0.20	Light snow with sand	0.15
Wet with sand	0.22–0.25	Wet leaves	0.07
Greasy	0.15–0.18		

Figure 42 - Exemples de coefficients d'adhérence rail/roue

(source : Moore D.F. Principles and Applications of Tribology, Elsevier, Amsterdam (1998))

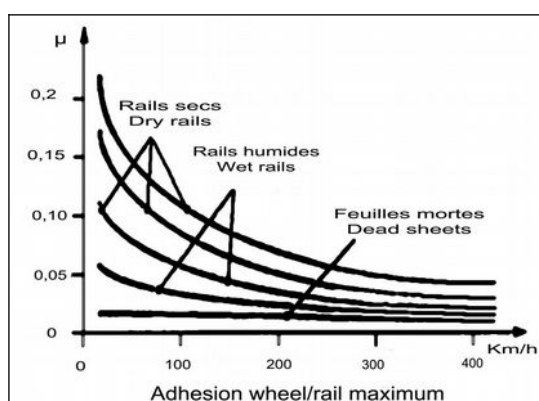


Figure 43 - Coefficient d'adhérence en fonction de la vitesse et de l'état du rail (source : Wikipédia)

Ces tableaux sont donnés à titre indicatif. Devant la complexité de la mesure de ce coefficient d'adhérence, et l'absence de mesure prise immédiatement après l'accident, il a été décidé dans la suite du rapport de ne pas quantifier l'adhérence, mais plutôt de qualifier l'état du rail : par exemple sec, savonné ou graissé.

3.11.3.1 - Les éléments naturels

L'absence d'averse le 2 décembre 2019 à Montpellier selon les archives météo permet d'exclure la présence d'humidité sur le rail au moment du freinage.

La pollution végétale survient surtout en automne lors de la chute de feuille sur les voies. L'écrasement par le passage successif des tramways transforme les feuilles mortes en une « pâte végétale » à la surface du rail qui favorise le glissement de la roue sur le rail.

La voie est bordée d'une rangée d'arbres de moyenne hauteur, sur un seul des deux côtés. Il n'y a pas de risque d'amas de feuilles sur la voie (par du mobilier urbain longeant la voie, par le quai d'une station, etc.) mais plutôt sur les abords. Un côté de voie est plus exposé aux feuilles que l'autre : la voie opposée à celle de la collision. Cette zone n'est pas identifiée par l'exploitant comme problématique par rapport aux feuilles tombées des arbres, contrairement à d'autres zones du réseau (avenue Gambetta, station Blum).



Figure 44 - Route de Ganges : lieu de l'accident (photo BEA-TT du 20 décembre 2019)



Figure 45 - Avenue Gambetta (source : google street view, novembre 2019)



Figure 46 - Boulevard Antigone (station Blum) (source : google street view, septembre 2020)

Cependant, l'hypothèse des feuilles dégradant l'adhérence est étudiée suite aux observations faites le 2 décembre 2019 en fin de journée. Des flashes ont été observés sous un tramway circulant sur la voie opposée à la collision, lors de la reprise des circulations après 4 heures d'interruption, indiquant un possible mauvais retour de courant du fait de feuilles entières sur le rail.

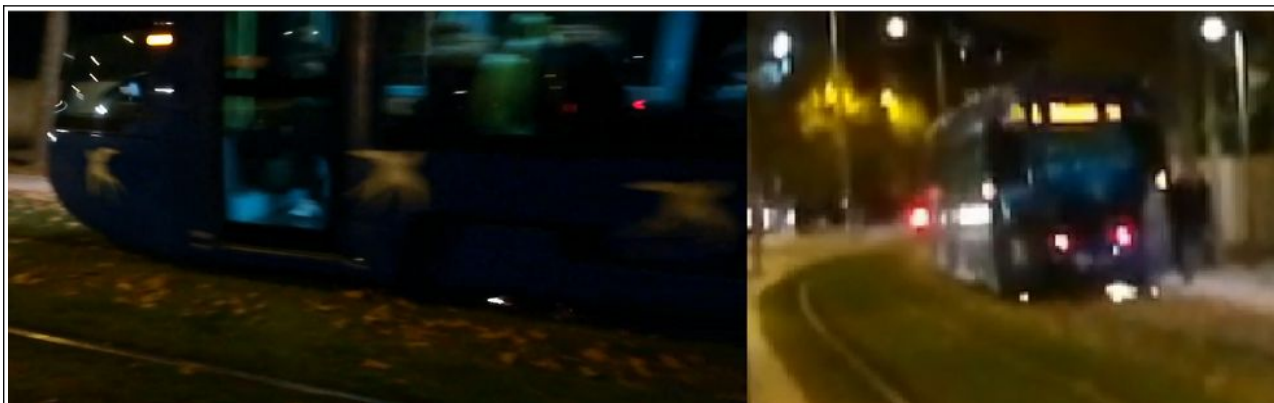


Figure 47 - Capture d'écran de la vidéo effectuée le 2 décembre 2019 soir (source : vidéo TaM)

Ce ne sont pas les feuilles entières elles-mêmes qui causent la faible adhérence mais une réaction chimique pouvant s'opérer entre les composés chimiques de la feuille écrasée et le fer des rails⁷.

3.11.3.2 - L'usure du rail

L'usure peut concerner le contact rail / roue qui s'aplatit, augmentant la surface de contact rail / roue. Elle peut également être ondulatoire.

L'usure ondulatoire est un phénomène d'usure périodique qui apparaît principalement sur la table de roulement des rails, sous forme d'une alternance de zones brillantes et mates. Elle se définit par la longueur entre deux zones similaires et par l'amplitude entre la hauteur de la zone la plus élevée (bosse) celle de la zone la plus basse (creux). Ses principales conséquences sont sonores et vibratoires. Ce défaut se corrige par meulage. Elle a lieu en sortie de station ou en sortie de courbe, car ce sont des zones d'accélération, ou dans les zones de freinage.

Nous avons observé une usure ondulatoire dans la zone de freinage avant la collision, mais nous n'avons pas connaissance de données scientifiques permettant d'en déterminer l'effet sur l'adhérence. De plus, nous verrons par la suite que d'autres facteurs sont dimensionnants face au doublement de la distance de freinage.

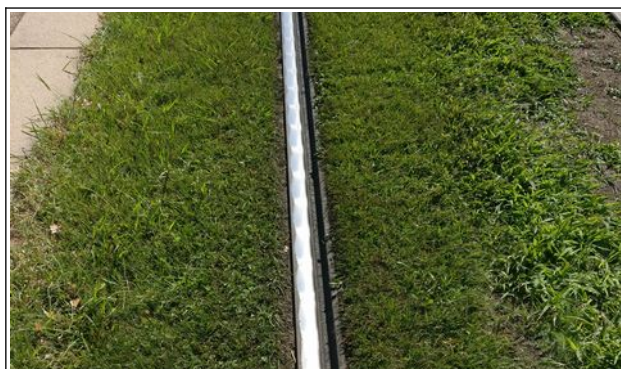


Figure 48 - Usure ondulatoire du rail dans la zone du freinage avant la collision (photo BEA-TT)

⁷ Ishizaka, K., Lewis, S.R. and Lewis, R. (2017) « The Low Adhesion Problem due to Leaf Contamination in the Wheel/Rail Contact: Bonding and Low Adhesion Mechanisms ». ISSN 0043-1648

3.11.3.3 - La pollution du rail par des fluides issus du matériel roulant

Différentes causes quant à une possible pollution de la voie par les tramways sont ici étudiées.

Accident antérieur au rattrapage ayant pour conséquence la perte de fluides

Le tramway n° 2011 précédant le n° 2028 a eu un accident le 2 décembre 2019 à 13 h 40, avec un véhicule routier dans le carrefour d'entrée de l'hôpital Lapeyronie, sur la voie 1. Le conducteur a actionné un freinage d'urgence à 15 km/h, sans blessé ni conséquence matérielle. Il a été autorisé à rentrer par ses propres moyens vers le dépôt du CEMH, après un retournement. Sur son retour, le tramway n° 2011 a été utilisé pour ramener au dépôt le n° 2030 en panne sur le rond-point de Château d'O. Les actions de maintenance sur le n° 2011 indiquent que seule de la carrosserie nécessitait réparation. Il n'y aurait donc pas eu de perte de fluide par cette rame sur la voie lors de cet accident.

Il s'agit du seul accident de tramway ce jour-là. Il n'y a pas eu d'accident avec un tramway la veille. La zone étant éloignée des carrefours, l'hypothèse d'un accident routier salissant la voie n'est pas retenue.

Perte de fluide d'une rame, se traduisant par des pannes

Sur la ligne 1, des tramways ont connu des pannes le 1^{er}, le 2 et le 3 décembre 2019, listées dans la main courante du PCC. Le tramway n° 2027 présentait deux flexibles d'étriers hors service, ce qui a provoqué son rapatriement au dépôt. Cette panne ayant eu lieu à 16 h 53, à Saint-Éloi dans le sens Mosson vers Odysseum, elle n'a pas pu avoir d'impact direct sur la dégradation de l'état de la table de roulement du rail, vu le positionnement des flexibles au centre du bogie. Aucune des autres pannes ne présente la possibilité de perte d'un fluide sur la voie.

En plus des comptes rendus des visites préventives du tramway n° 2028, nous avons également étudié ceux des cinq tramways qui précédaient le n° 2028. Aucune particularité n'est liée à une perte de fluide par ces matériels roulants.

Localisation sur la voie de la commande du graissage des boudins

Le graissage des boudins de roue est effectué afin d'atténuer les frictions dans les courbes entre le rail et les roues des tramways. Le graissage par les graisseurs de boudins est effectué de la façon suivante : de l'huile de graissage est projetée par de fines gouttes sur le boudin de la roue. L'application est commandée par le système d'aide à l'exploitation (SAE). Cette huile est appliquée par contact depuis le boudin sur le côté du rail, et non sur la table de roulement.

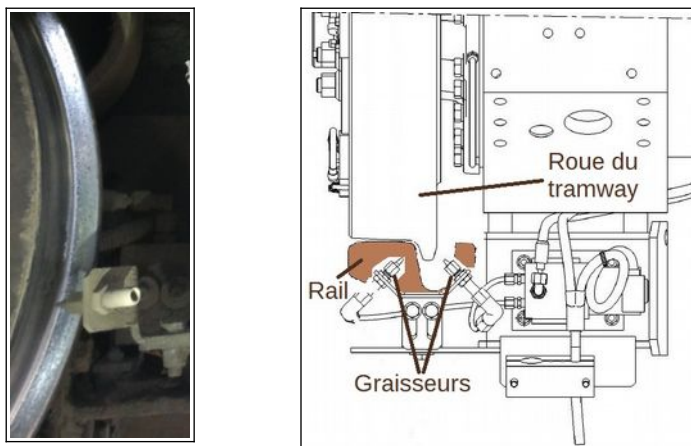


Figure 49 - Graisseurs de boudin (sources : photo BEA-TT / procédure TaM modifiée)

Des points de repères sont implantés sur la ligne et le SAE s'appuie sur la distance parcourue par le tramway pour donner un ordre de graissage au tramway lorsqu'il se trouve à un point de début de graissage et un ordre d'arrêt lorsqu'il passe le point de fin de graissage. Entre les stations Universités et Hôpital, plusieurs zones doivent être graissées, dont la zone de la collision.

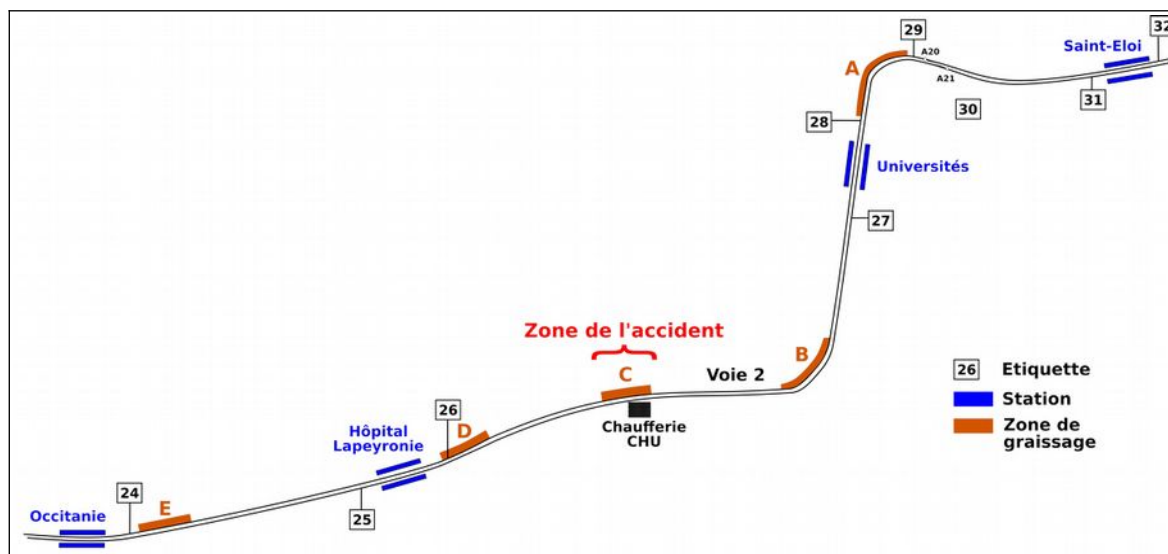


Figure 50 - Schéma de l'interstation et des zones graissées (schéma BEA-TT)

La quantité d'huile projetée n'est pas indiquée dans la documentation du constructeur. Elle peut contribuer avec d'autres composants (poussières, sable éjecté, etc.) à créer une pâte grasse.

Les graisseurs de boudins seront étudiés dans le chapitre suivant concernant le matériel roulant.

Ces divers facteurs potentiels de dégradation de l'état de la table de roulement sont modulés en fonction de la maintenance de la voie réalisée par l'exploitant, qu'elle soit préventive (planifiée) ou curative (suite à sollicitation).

3.11.4 - La maintenance de la voie

Nettoyage planifié

En 2019, la voie est entretenue par un nettoyage avec un aspirail dont la fréquence est de trois passages par mois, sur chaque ligne, toute l'année. L'aspirail est un engin pouvant circuler à la fois sur la route et sur les rails du tramway. Il brosse, aspire et projette de l'eau : en simultané à l'avant de cet engin, des couteaux grattent la gorge du rail, des jets de haute pression sont envoyés et une aspiration est effectuée. À l'arrière, des brosses passent sur la table de roulement du rail. La prestation du nettoyage des rails est sous-traitée à l'entreprise SMN Montpellier / Groupe Nicollin⁸, par une délégation de service public d'une durée de 7 ans. Des avenants sont ajoutés le cas échéant. Fin 2019 et avant l'accident, les nettoyages étaient planifiés pour le 5/11/2019, le 19/11/2019, le 26/11/2019, le 2/12/2019. Le planning prévisionnel respecte donc bien le rythme de 3 passages par mois sur le réseau commercial. Les opérations effectuées fin novembre sont les suivantes :

- Le 19/11/2019, un passage complet est effectué en aspirail dans les deux sens, la zone de l'accident était incluse dans le parcours.

⁸ Le Groupe Nicollin, dont fait partie la Société Méditerranéenne de Nettoyement (SMN), est une entreprise française gérant près de 6500 employés, 3 pôles d'activités et plus de 15 métiers différents dont la propreté urbaine.

- Un auto-contrôle par l'entreprise a été fait le 21/11/2019, à la demande de TaM et leur a été envoyé. Cette fiche indique que les résultats (nettoyage de gorge, désobstruction lumières et nettoyage du champignon du rail) sont conformes aux attendus.
- Le nettoyage suivant de la voie n'a pas été effectué le 26/11 mais le 28/11, entre Occitanie et Hôpital Lapeyronie sur la ligne 1, donc n'incluant pas la zone de la collision. L'aspirail étant tombé en panne, le prestataire a donc effectué un nettoyage des parties enherbées avec un nettoyeur à haute pression et des parties minérales avec des balayeuses de ville.
- Il n'y a pas eu d'autre nettoyage de la voie jusqu'à la collision du 2/12/2019.

La fréquence des passages est donc fixée à 3 passages par mois sur l'ensemble du réseau et le dernier passage sur la zone avant l'accident a eu lieu le 19/11/2019 - soit 13 jours avant l'accident. La fréquence de 10 jours définie par l'exploitant est légèrement dépassée. Toutefois, l'évolution de l'état du rail en fonction du temps n'est pas connue. À noter que ce passage a bien été effectué avec l'aspirail avant que ce dernier ne tombe en panne.

Le contrat initial prévoyait des passages normaux sur notamment les voies courantes avec une fréquence, de début octobre à fin février, d'une fois par semaine, et de début mars à fin septembre, d'une fois toutes les deux semaines. Contrairement à ces objectifs, l'exploitant ne planifie pas de renforcement du nettoyage des voies pendant la période automnale et hivernale. Désormais, selon le cahier des charges de 2020 qui prévoit la future organisation du « Nettoyage des rails du réseau de tramway de Montpellier Méditerranée Métropole », la fréquence de nettoyage (avec l'aspirail) doit être d'une fois par semaine de novembre à février et de 3 fois par mois de mars à octobre, sur les quatre lignes.

Nettoyage suite à sollicitations spécifiques

À cette périodicité de nettoyage trois fois par mois, se rajoutent les sollicitations de TaM auprès du prestataire : lorsqu'un conducteur de tramway effectue un signalement au PCC, le PCC peut effectuer au besoin une demande d'intervention au prestataire de nettoyage. Une note d'information TaM a été communiquée en ce sens aux conducteurs. Quand il s'agit de voies avec ballast ou avec un revêtement végétal, l'aspirail est envoyé et pour les autres zones, ce sera fait par la balayeuse dans un délai de deux heures. TaM n'ayant pas de traçabilité concernant ces demandes d'intervention ponctuelles, il n'a pas pu être identifié de périodes ni de zones de la ligne 1 où le nettoyage de la voie est régulièrement demandé par les conducteurs. Selon l'exploitant, la zone de la collision ne soulève pas de problématique particulière due aux feuilles, contrairement à d'autres endroits du réseau : autour de la station Blum (des platanes sur une zone à 40 km/h avec carrefour important et sorties de résidences), du jeu de paume (zone à 30 km/h) et les zones minérales.

Dans les consignes PCC, il est précisé que « *Toute information de danger potentiel sur la ligne, y compris du fait des conditions météo (mauvaise adhérence ou mauvaise visibilité), doit être relayée par phonie à l'ensemble des rames* ». Ni les témoignages directs ni la main courante ne nous indiquent qu'il y ait eu de telles remontées au PCC ni de communication correspondante, le 2 décembre 2019. Seul le témoignage du conducteur du tramway n° 2028 rapporte les propos de sa collègue sur la glissance, alerte qui n'a pas été remontée au PCC ni n'a fait l'objet d'une demande spécifique de nettoyage de la voie.

Meulage du rail

Le meulage permet de garder le bon profil du rail afin de moins user la voie, de réduire le bruit pour le confort des riverains et des voyageurs. L'objectif est de retrouver un contact rail / roue d'un centimètre carré et de recentrer ce contact.

Avant meulage, un relevé visuel et une écoute du passage des tramways sont effectués à pied par TaM. Puis, avant et après son passage, le prestataire effectue un relevé des mesures latérales et de la table du rail, tous les 250 mètres, à l'aide d'un appareil spécifique. Après le meulage, TaM effectue un contrôle en visuel.

La campagne de meulage précédant la collision s'est déroulée du 12/04/2018 au 12/05/2018. La distance totale meulée était d'environ 4 000 mètres entre Occitanie et Universités, en voies 1 et 2 : la zone de l'accident était donc bien incluse (zone d'Universités à Hôpital). Cette zone ne fait pas partie des zones sensibles observées par le prestataire, telles que des courbes près d'Universités et de Philippidès, ou le tronçon Millénaire vers Odysseum, zones qui étaient en très mauvais état et présentaient des usures longitudinales assez importantes nécessitant de nombreux passages du train meuleur.

Dans la zone de la collision, aucune usure notable n'a été recensée lors du meulage et sur les relevés des mesures latérales et de la table du rail. Nous avons cependant observé, après la collision du 2 décembre 2019, le développement d'une usure ondulatoire (cf §3.11.3.2).

En conclusion, le dernier nettoyage du rail a eu lieu le 19 novembre 2019, soit 13 jours avant l'accident et aucune autre intervention suite à sollicitation n'a pu être tracée. Aucune remontée particulière n'a été faite au PCC quant à des conditions de mauvaise adhérence sur la ligne par les conducteurs. La perte de fluides d'un tramway accidenté ou en panne a pu être exclue. Toutefois, la zone de freinage de l'accident correspond à un début et une fin de commande graissage par le SAE, ce qui ne doit poser pas de difficulté particulière si les graisseurs de boudins sont bien réglés.

3.12 - Les investigations sur le matériel roulant

Les chapitres précédents ont montré que la cause de cette collision est la supériorité de la distance réelle de freinage du tramway n° 2028 à la distance disponible devant lui.

L'analyse de l'enregistreur des paramètres d'exploitation a permis de montrer les éléments suivants :

- un freinage de service appliqué et associé à un mode manuel d'application des patins magnétiques ;
- un phénomène d'enrayage marqué ;
- un freinage d'urgence appliqué en plein enrayage associé à un mode manuel d'application des patins magnétiques ;
- une décélération moyenne estimée à 1,08 m/s².

Les investigations sur le matériel roulant ont porté donc sur la fonction freinage en vue d'identifier les causes possibles de la diminution des performances de freinage notamment :

- la non-application ou l'application partielle des efforts de freinage ;
- l'insuffisance des efforts appliqués ;
- la correction des efforts de freinage par l'anti-enrayeur en lien avec l'état du contact rail / roue ;
- l'influence de l'état du rail (rail sec, rail mouillé, rail graissé...).

Les investigations ont ainsi porté sur :

- l'analyse des constats réalisés sur la rame accidentée et des enregistrements disponibles en vue d'identifier les pannes majeures des organes de traction - freinage du tramway n° 2028 ;
- l'analyse de la réalisation de la maintenance préventive et corrective sur l'ensemble des rames du réseau de Montpellier et plus particulièrement sur le tramway n° 2028 ;
- l'étude des modes de défaillance possibles des organes de freinage en reprenant l'analyse préliminaire des risques. Des essais statiques et dynamiques ont été organisés du 15 au 17 septembre 2020 avec le constructeur et l'exploitant pour écarter des modes de défaillances possibles sur les équipements de traction - freinage du tramway n° 2028 ;
- l'étude des performances de freinage en adhérence dégradée.

3.12.1 - Analyse des constats immédiats et des enregistrements du tramway n° 2028

Les premiers constats visuels de la rame accidentée réalisés sur le terrain et à l'atelier n'ont pas montré de perte ou de casse de pièces en lien avec la fonction freinage. Il n'a pas non plus été observé de plats aux roues.

Néanmoins pour les patins magnétiques, il a été constaté des agglomérats graisseux présents sur un bogie du tramway n° 2012 et un bogie du tramway n° 2028. À noter que globalement les rames entretenues au centre de maintenance des Hirondelles présentent régulièrement ces agglomérats.



Figure 51 - Patin magnétique couvert de graisse, tramway n° 2028, septembre 2020 (photo BEA-TT)



Figure 52 - Patin de rame 401 le 31 août 2021 (photo STRMTG)

Par ailleurs sur le tramway n° 2028 et sur au moins une rame 401 du réseau, il a également été constaté des agglomérats graisseux au niveau des systèmes de graissage de boudins.



Figure 53 - Tramway n° 2028, août 2020 (photo BEA-TT)



Figure 54 - Rame 401, août 2021 (photo STRMTG)

Pour le tramway n° 2028 et le jour de l'accident, l'état du système de graissage de boudins n'a pu être déterminé précisément. Néanmoins, la figure 53, prise 9 mois après l'immobilisation du tramway n° 2028 suite à l'accident, permet de supposer un état pouvant être proche de celui constaté sur la figure 54.

La présence d'agglomérats graisseux sur le bogie, notamment au niveau des patins magnétiques et des graisseurs de boudins, ne peut que conduire à leur chute, potentiellement initiée par des défauts d'infrastructure, des phases de traction - freinage, des mouvements de patins magnétiques volontaires ou automatiques lors de phase de freinage, voire des frottements avec la roue...

La chute de ces agglomérats sur la voie doit rester majoritairement sans impact, mais il ne peut être exclu qu'une chute ait eu lieu sur ou à proximité de la table de roulement du rail. Dans ce cas un enrayage plus ou moins marqué pourrait avoir lieu lors d'une phase de freinage sur une ou plusieurs roues de la rame concernée voire d'une autre rame.

Les conséquences possibles de ces constats visuels sont précisées dans les chapitres suivants.

Concernant les relevés des événements enregistrés dans la rame, l'analyse est la suivante :

➤ **L'enregistreur des paramètres d'exploitation :**

Une première analyse a été effectuée au paragraphe 3.6.2 et n'a pas montré de défauts de la centrale tachymétrique. Il a donc été supposé l'absence de défaillance de l'enregistrement.

➤ **Relevés des événements des équipements de traction - freinage :**

L'analyse des enregistrements des équipements de traction - freinage n'a pas montré de défauts pouvant expliquer la diminution des performances de freinage.

➤ **Relevés des événements du SIE (Système Informatique Embarqué) :**

L'analyse des enregistrements du SIE n'a pas montré de défauts en lien avec l'accident. Il a donc été considéré que les équipements gérés par le SIE, comme les graisseurs de boudins, étaient opérationnels.

➤ **Relevés des événements de l'électronique de commande des freins du bogie porteur :**

L'analyse des enregistrements des équipements de freinage du bogie porteur a montré un défaut. Il s'agit d'un défaut d'incohérence entre une consigne émise par l'électronique de commande correspondant à un manipulateur au neutre et l'ouverture de la boucle d'urgence.

On constate que ce défaut est temporaire et il a pu être généré lors des différentes actions réalisées par le conducteur au cours de l'accident. De toute façon, l'information du FU étant redondée, la consigne d'efforts de freinage reste maximale dès l'ouverture de la boucle avant le traitement par l'anti-enrayeur. Alstom a donc considéré que ce défaut n'a pas de lien direct avec l'accident.

Ces premières analyses ont donc montré l'absence de remontée de défauts pouvant expliquer l'accident. Néanmoins la chute sur la table de roulement d'agglomérats graisseux présents sur les systèmes de graissage des boudins et des patins magnétiques du tramway n° 2028 et d'autres rames du réseau pourrait impacter la distance de freinage. Même si l'occurrence d'un tel événement paraît rare, cette hypothèse ne peut être exclue. Par ailleurs l'état observé de certains patins magnétiques et de graisseurs de boudins mérite des investigations complémentaires et préalablement, une analyse des opérations de maintenance prévues et réalisées.

3.12.2 - Maintenance du matériel roulant

Au vu des premiers constats et de la démarche d'investigation menée sur le matériel roulant, la maintenance prévue et réalisée a été analysée.

3.12.2.1 - Plan de maintenance

La maintenance de la rame et des bogies suit le plan de maintenance des rames 401 de Montpellier transmis par le constructeur et mis à jour en 2005 (dernière mise à jour communiquée). Ce plan de maintenance indique les contrôles et les distances (ou « pas » de maintenance) entre lesquelles les contrôles doivent être réalisés. Le plan de maintenance d'origine et actuel indique des pas de 10 000 km, de 30 000 km, 60 000 km, 120 000 km, 180 000 km, 240 000 km, 300 000 km, 450 000 km, 600 000 km, 900 000 km et 1 200 000 km.

Parmi ces opérations de maintenance, certaines sont classées sécuritaires, par exemple pour le pas de 10 000 km :

- test du FU commandé par le manipulateur ;
- contrôle visuel des étriers (positionnement, fuite d'huile...) ;

- contrôle d'usure de garnitures de frein ;
- contrôle des fixations, de l'usure de la bande de frottement et de la hauteur des patins magnétiques.

Or il a été constaté au cours de l'enquête que le mainteneur pratique depuis 2011 un pas nominal de 15 000 km, au lieu de 10 000 km. Un plan de maintenance mis à jour n'a pu être communiqué et il a été seulement constaté une mise à jour de ces pas dans l'outil informatique de gestion de la maintenance.

Des discussions avaient été engagées entre Alstom et l'exploitant dès 2009 et ont été poursuivies jusqu'en 2011 pour identifier les écarts entre les différents plans de maintenance du matériel roulant de la ligne 1 et de la ligne 2. Cette évolution a fait l'objet d'échanges entre TaM et le STRMTG en 2012, sans toutefois être entièrement formalisée et conclusive.

3.12.2.2 - Actions de maintenance préventives et correctives de la rame 2028

Le tramway n° 2028 présentait le jour de l'accident un kilométrage de 1 044 892 km.

Les dernières actions de maintenance préventive des 1 035 000 km et des 1 050 000 km ont été réalisées respectivement le 9 septembre 2019 à 1 030 871 km et le 27 novembre 2019 à 1 047 995 km. L'examen des ordres de travail n'a pas montré d'éléments pouvant expliquer l'origine de l'accident.

Au vu des opérations de maintenance réalisées au pas de 15 000 km et sur la base de l'ordre de travail rempli, il peut être considéré pour le système de freinage en date du 27 novembre 2019 que :

- les étriers, les disques, les garnitures de freins et les patins magnétiques des bogies porteurs et du bogie moteur de la nacelle n'ont pas montré d'anomalies concernant leurs usures et leurs fixations ;
- les disques et les garnitures de freins des bogies moteurs d'extrémité n'ont pas montré d'anomalies concernant leurs usures et leurs fixations ;
- les centrales hydrauliques des bogies moteur n'ont pas montré visuellement d'anomalies ;
- le sablage des bogies moteurs était fonctionnel et correctement réglé ;
- les gicleurs du graissage de boudins du bogie porteur ont été nettoyés et réglés ;
- le test sécuritaire (vitesse supérieure à 3 km/h) lié au FU a été réalisé et conforme.

En complément du suivi de la maintenance des rames, un suivi spécifique est mis en place pour la maintenance des bogies porteurs et moteurs. L'analyse de ce suivi a montré que tous les bogies du tramway n° 2028 ont été révisés et donc nettoyés à 900 000 km. Les étriers et les centrales hydrauliques ont parcouru un kilométrage inférieur à 300 000 km depuis leur dernière révision ce qui exclut toute problématique de détente de pas pour ces équipements.

En complément des opérations préventives de maintenance, le plan de maintenance prévoit des tests journaliers comme le test Freinage de Sécurité, Freinage d'Urgence, dispositif de sablage. Or la feuille de sortie du tramway n° 2028 du 2 décembre 2019 remplie par le conducteur ne les mentionne pas. En l'absence de cette traçabilité, il a donc été considéré que l'ensemble de ces tests avait été réalisé lors de la dernière opération de maintenance préventive datant du 27 novembre 2019, soit 5 jours d'écart avec les préconisations. De nouveaux tests ont été effectués au cours des investigations, notamment lors des essais complémentaires réalisés sur le tramway n° 2028.

Par ailleurs et en complément du plan de maintenance prévu, l'exploitant réalise des performances annuelles de freinage. Les tests de performance du freinage d'urgence du tramway n° 2028 ont été transmis pour 2017 et 2019. La traçabilité n'a pas pu être retrouvée pour l'année 2018. Le dernier test du freinage d'urgence à 40 km/h et à 70 km/h sur le tramway n° 2028 a été réalisé le 13 septembre 2019. Les résultats sont conformes aux critères présentés dans la fiche de résultats.

Enfin concernant la maintenance corrective, l'analyse des ordres de travail sur le tramway n° 2028 n'a pas montré d'éléments particuliers pouvant avoir un lien avec l'accident.

3.12.2.3 - Conclusion sur la maintenance du tramway n° 2028

Globalement les opérations de maintenance préventives réalisées sur le parc des rames 401 ont fait l'objet de détentes de pas de maintenance par l'exploitant. Au cours de l'enquête, il a été constaté des écarts de traçabilité et l'absence de justification complète, technique et administrative, de ces détentes.

En considérant la dernière opération de maintenance préventive sur le tramway n° 2028 réalisée 5 jours avant l'accident, le système de freinage n'a pas montré d'anomalies pouvant expliquer les causes de l'accident. Le jour de l'accident, il n'a pu être justifié lors de la préparation de la rame, le bon fonctionnement du freinage d'urgence et du système de sablage ce qui a nécessité une attention particulière dans la suite des investigations.

3.12.3 - Analyse des risques et modes de défaillance possibles

Au vu des premiers constats et de l'analyse de la maintenance du tramway n° 2028, il a été nécessaire d'identifier les modes de défaillance possibles des équipements de traction - freinage.

Dans cette perspective, le constructeur Alstom est parti d'une analyse préliminaire des risques en vue de retenir des scénarios de défaillance et de les vérifier par des essais statiques et dynamiques.

3.12.3.1 - Scénarios retenus et vérifiés

Les scénarios de l'analyse préliminaire des risques ont été réduits en considérant notamment les hypothèses suivantes :

- le conducteur n'est pas en hypovigilance ;
- la distance de freinage est suffisante ;
- un freinage étant constaté, les scénarios de perte totale des freins à friction sont éliminés ;
- le conducteur n'a pas appliqué de freinage de sécurité ;
- la rame est en mouvement, sans abandon de cabine, et n'est pas en mode manœuvre ou remorquage - poussage.

À partir de ces hypothèses, des scénarios d'accidents ont été éliminés ce qui a permis de considérer notamment les suivants :

- collision par absence de frein électromagnétique ;
- collision par isolement anormal du frein mécanique ;
- collision par réduction de l'effort de freinage ;
- collision suite à la dégradation de l'adhérence lors d'un freinage ;
- collision suite à la perte du frein à friction par défaut de l'anti-enrayage ;

- collision suite à l'absence de frein électrodynamique ;
- collision suite à non-détection d'une avarie de freinage.

Sur cette base et en considérant l'événement redouté « Non respect des performances du FU », des scénarios de situations dangereuses ont été identifiés tels que :

- absence de frein mécanique en mode Service, FU et FS ;
- perte des performances de freinage ;
- réduction de l'effort de freinage en mode FU ou FS ;
- performance de freinage assujetti à l'état de la batterie principale ;
- risque d'apparition d'un enrayage pouvant entraîner une légère réduction des performances de freinage ;
- risque d'avoir une remontée anormale des patins magnétiques en cas d'enrayage ;
- risque d'enrayage.

À partir de ces scénarios, un programme de tests statiques et dynamiques a été défini en vue d'éliminer les défaillances possibles.

3.12.3.2 - Résultats des essais statiques

Un programme d'essais statiques sur la rame accidentée a été réalisé. Les essais statiques ont consisté notamment à :

- s'assurer que l'isolement d'un frein est détectable ;
- s'assurer que l'électronique de commande n'a pas commandé l'isolement électrique d'un frein ;
- s'assurer qu'un frein mécanique n'est pas défaillant et non détecté ;
- s'assurer de l'état des patins magnétiques ;
- s'assurer que les patins magnétiques sont opérationnels ;
- activer les patins magnétiques avec le niveau bas batterie ;
- vérifier l'état des roues, des disques de freins ;
- contrôler les états des étriers (vérifier qu'un ou plusieurs étriers ne sont pas bloqués) ;
- s'assurer que l'électronique de frein reçoit l'information FU (bogie moteur et bogie porteur).

Tous les essais statiques réalisés ont été conformes aux critères présentés dans la procédure d'essais statiques. Néanmoins il a été émis les réserves suivantes :

- sablage : compte tenu de la durée d'immobilisation de la rame accidentée, avant les essais statiques, les sablières ont été au préalable débouchées quand nécessaire et nettoyées, ce qui ne permet pas d'écarter le fait que des sablières étaient bouchées le jour de l'accident. Avec les sablières débouchées, les essais ont montré que le sablage était bien activé et le sable bien éjecté.
- batterie : les tests statiques relatifs au niveau de charge de la batterie ainsi que l'activation des patins magnétiques en fonction de cette charge n'ont pas montré de dysfonctionnement. Néanmoins ces tests ne permettent pas de conclure à un niveau bas de la batterie, donc à la non-application des patins magnétiques, le jour de l'accident puisque l'information état bas de la batterie ne remonte pas au conducteur sur cette génération de tramway.

Sur ces deux derniers points, des investigations complémentaires ont été nécessaires et seront détaillées au paragraphe 3.12.4.

3.12.3.3 - Résultats des essais dynamiques

Suite à la réalisation des essais statiques, des essais dynamiques ont été programmés en vue notamment de :

- s'assurer du bon traitement de la gestion de vitesse ;
- s'assurer du fonctionnement des capteurs de vitesses ;
- s'assurer de la bonne information des seuils de vitesses ;
- vérifier les performances de freinage en adhérence nominale et dégradée ;
- autant que possible, reproduire les conditions de l'accident c'est-à-dire l'application d'un freinage de service (avec un mode manuel d'application des patins magnétiques) à une vitesse de 58 km/h, l'apparition d'un enrayage marqué et l'application d'un freinage d'urgence à une vitesse de 38 km/h.

Compte tenu de l'état structurel de la rame accidentée, il a été décidé d'établir une liste de pièces à déplacer du tramway accidenté sur un autre (tramway n° 2006). Au vu des résultats d'essais statiques réalisés sur les tramways n° 2028 et n° 2006, les pièces principales déplacées ont été : les bogies porteurs, les bogies moteurs, l'équipement tachymétrique, le manipulateur traction - freinage, les coffres traction, l'électronique de commande des freins porteurs, etc.

Ces essais dynamiques ont été réalisés du 15 au 17 septembre 2020. Les conclusions du rapport du constructeur Alstom sur ces essais sont les suivantes : « Le système de freinage de la rame 2028 installé sur la rame 2006 ne présente aucune anomalie. Les mesures réalisées sur rail sec et rail arrosé, sont en corrélation avec les mesures du rapport de validation des performances de freinage TG1 401 (TRA V 450 485 000 - Rev.A – 2002). Le comportement de l'anti-enrayeur est également conforme à l'attendu » c'est-à-dire les efforts de freinage sont corrigés en fonction de l'adhérence disponible ce qui permet de limiter le blocage de roues et donc d'assurer des performances de freinage acceptables en condition d'adhérence dégradée. « La vérification de la tension batterie lors de l'application des patins magnétiques pantographe haut ou bas, permet de valider un comportement normal de celle-ci. Les différents enregistrements ont montré que les vitesses tachymétriques et GPS sont cohérentes. »

À titre illustratif, la figure 55 présente le type de courbes d'essais de freinage obtenues lors de ces essais :

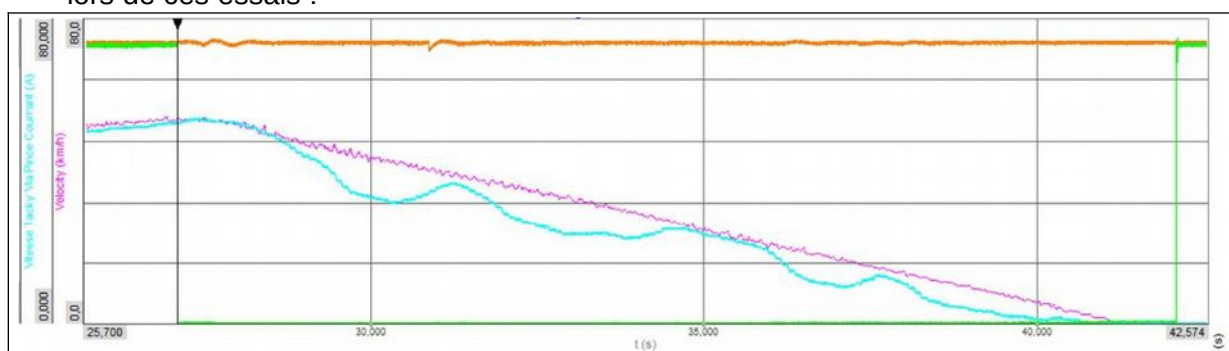


Figure 55 - Courbe de vitesses selon temps d'un essai de freinage (freinage de service à 54 km / h sur rail arrosé avec de l'eau savonneuse) : (en violet, la vitesse mesurée par GPS et en bleu clair, la vitesse mesurée par les roues du tramway)
(source : Alstom)

Cette courbe a été obtenue en réalisant un freinage de service à une vitesse initiale de 54 km/h sur un rail arrosé avec de l'eau savonneuse. La distance de freinage mesurée a été de 110 mètres pour un temps de freinage de 15 secondes et la décélération estimée à 1 m/s², résultats proches de ceux observés lors de l'accident.

3.12.3.4 - Conclusion sur les résultats des essais statiques et dynamiques

Les essais statiques et dynamiques réalisés sur le tramway n° 2028 et le tramway n° 2006 avec les bogies et des équipements du tramway n° 2028 n'ont pas montré d'anomalies pouvant expliquer l'accident.

Les essais dynamiques réalisés ont permis de faire une analyse comparative de certaines performances de freinage observées le jour de l'accident. Il en ressort les éléments principaux suivants :

- la décélération apportée par l'application seule des patins magnétiques est d'environ 1 m/s^2 pour un essai de freinage réalisé à une vitesse initiale de 40 km/h ;
- les performances constatées le jour de l'accident sont proches de celles d'un essai en freinage maximal de service (donc sans l'application des patins magnétiques) effectué à une vitesse initiale de 54 km/h sur un rail arrosé avec de l'eau savonneuse permettant de considérer suivant les règles de l'art que l'essai de freinage a été réalisé en adhérence dégradée ;
- les performances constatées lors des essais de freinage d'urgence à des vitesses initiales de 40 km/h et 50 km/h sur rail arrosé avec de l'eau savonneuse en concentration accrue sont meilleures que celles observées le jour de l'accident.

Ces premiers constats sur le matériel roulant ont fait apparaître la nécessité :

- d'approfondir le fonctionnement supposé du sablage et l'application des patins magnétiques le jour de l'accident ;
- de comprendre l'écart entre les performances de freinage constatées le jour de l'accident (freinage de service, patins magnétiques et freinage d'urgence) et les performances de freinage obtenues en essais en freinage de service sur rail arrosé avec de l'eau savonneuse.

Des investigations complémentaires sont donc nécessaires sur le comportement du tramway en adhérence dégradée avec un freinage d'urgence tiré en plein enrayage.

3.12.4 - Investigations complémentaires

Toutes les investigations présentées précédemment n'ont pas montré de dysfonctionnements ou anomalies du système de freinage du tramway n° 2028.

Néanmoins il est apparu nécessaire de poursuivre les investigations sur le sablage, l'application des patins magnétiques et le comportement de la rame en adhérence dégradée. Sur ce dernier point, le fonctionnement de l'anti-enrayeur a été approfondi et les éléments pouvant dégrader l'adhérence ont été identifiés. À la suite de cette identification, des essais de freinage complémentaires ont donc été réalisés dans des conditions d'adhérence différentes des essais précédents.

3.12.4.1 - Le sablage

Au préalable, il convient de rappeler que la fonction sablage a pour but de maintenir ou rétablir l'adhérence au niveau du contact rail / roue en vue de réduire l'enrayage lors d'un freinage.

Tous les bogies moteurs (nacelle motorisée et motrices d'extrémités sur le tramway n° 2028) sont équipés d'un système de sablage. Ce système agit en fonction du sens de marche, sablant à l'avant des bogies. Le sablage se déclenche automatiquement sur tous les bogies moteurs en cas de freinage d'urgence et de vitesse non nulle. Il se déclenche

aussi en freinage de service pour les bogies moteurs présentant un enrayage. En cas de besoin, il peut être déclenché en mode manuel par le conducteur.

Il est admis que l'absence de sablage peut impacter significativement les performances du freinage de service en adhérence dégradée et dans une proportion plus faible pour un freinage d'urgence en adhérence dégradée.

Le sablage a toute son efficacité pour récupérer de l'adhérence au niveau de l'essieu avant de chaque bogie moteur.

Il a été montré que le système de sablage du tramway n° 2028 était opérationnel après avoir débouché les sablières et il peut être admis que le système était correctement réglé cinq jours avant l'accident.

Néanmoins le retour d'expérience des bogies d'extrémités montre des colmatages fréquents en raison de l'humidité et de la conception du système de sablage. Les éjecteurs sont débouchés manuellement et régulièrement.

En 2019, l'exploitant sous-traite le remplissage des sablières et le débouchage des éjecteurs. Les prestations peuvent être réalisées le soir, les lundi, mercredi, jeudi et samedi. Cependant il n'existe pas de traçabilité des opérations réalisées, notamment sur l'état des sablières. Depuis, l'exploitant a amélioré le traitement et le suivi des sablières bouchées.

Au vu de ce retour d'expérience, il est probable que certaines sablières n'ont pas ou ont partiellement éjecté du sable lors du freinage de service avec enrayage puis lors du freinage d'urgence sur les bogies moteurs, comme celui de l'extrémité avant de la rame. En l'absence de traçabilité, il n'a pu être déterminé la proportion de sablières fonctionnelles le jour de l'accident.

L'hypothèse d'un sablage défaillant sur une partie des bogies moteurs semble probable et est donc considérée dans la suite des investigations.

3.12.4.2 - Application des patins magnétiques

Au préalable, il est rappelé que l'analyse de la centrale tachymétrique a montré que le conducteur a appliqué à plusieurs reprises en mode manuel les patins magnétiques et a tiré un freinage d'urgence déclenchant automatiquement les patins magnétiques. Le freinage d'urgence ayant eu lieu moins d'une seconde après la fin de la commande manuelle par le conducteur, nous considérons que les patins magnétiques du tramway n° 2028 n'ont pas eu le temps de se relever. Il peut donc être considéré que globalement la demande d'application des patins magnétiques a été constante au cours de la phase de freinage.

Au vu des résultats des essais statiques et dynamiques, l'hypothèse de la non-application des patins magnétiques le jour de l'accident a été étudiée, car la performance observée le jour de l'accident avec une décélération moyenne estimée à 1,08 m/s² est similaire à un freinage de service en adhérence dégradée et donc sans l'application des patins magnétiques.

La non-application des huit patins magnétiques peut s'expliquer par la perte simultanée des commandes individuelles des patins ou par la perte de la batterie. Or les essais ont montré que tous les patins s'appliquaient correctement et la tension de la batterie variait très peu (charge rapide de la batterie). Par ailleurs il a été constaté le jour de l'accident que les phares du tramway n° 2028 étaient allumés ce qui ne montre pas un niveau bas de la batterie.

Concernant les efforts de freinage électrique / mécanique, ils ont bien été réduits le jour de l'accident mais cette réduction semble plus improbable sans l'application des huit patins magnétiques qu'avec l'application des patins magnétiques (en totalité ou partiellement) compte tenu des éléments apportés ci-dessus.

En conclusion, il semble comme hautement improbable la non-application des huit patins magnétiques et improbable la perte de patins magnétiques.

La suite des investigations a donc considéré que les patins magnétiques ont été appliqués le jour de l'accident sur tous les bogies et que les efforts de freinage électrique / mécanique ont été réduits. Cette réduction d'efforts s'explique par le constat d'un enrayage important.

3.12.4.3 - Résultats et analyse des essais complémentaires

En vue d'étudier le comportement de la rame en adhérence dégradée et afin d'identifier des scénarios d'accident, des essais complémentaires de freinage ont été réalisés par l'exploitant sur le tramway n° 2006 (avec les équipements traction - freinage du tramway n° 2028).

Les objectifs de ces essais réalisés du 6 au 7 avril 2021 étaient de :

- dégrader l'adhérence avec un produit pouvant provenir du matériel roulant ;
- déclencher les différents types de freinage comme le jour de l'accident, c'est-à-dire un freinage de service suivi d'un freinage d'urgence en plein enrayage ;
- évaluer l'impact de modes dégradés (inhibition du sablage et/ou des patins magnétiques) sur les performances de freinage ;
- comparer le comportement du matériel roulant à celui observé le 2 décembre 2019.

Les conditions des essais ont été les suivantes : après identification des produits présents sur le matériel roulant pouvant impacter le contact rail / roue, il a été retenu le produit de graissage des boudins. Il a été appliqué manuellement. Tous les essais ont été réalisés sur rail graissé et en fonction des essais et de l'état du rail, le rail a été au besoin de nouveau graissé et nettoyé lorsque du sable était présent.



Figure 56 - Pulvérisation sur le rail du produit de graissage de boudin (photo BEA-TT)



Figure 57 - État du rail graissé (photo BEA-TT)

La quantité présente au niveau du contact rail / roue est difficile à évaluer mais elle était suffisante pour déclencher des patinages de la rame et des enrayages à des faibles vitesses (15 km/h environ). Ces conditions d'essais ont donc permis d'obtenir une dégradation importante du contact rail / roue. Il convient de noter que le jour de l'accident,

il est hautement improbable que ces conditions d'essais ont été rencontrées pour les raisons suivantes :

- la quantité déposée lors des essais est bien supérieure à celle potentiellement déposée par plusieurs tramways présentant des graisseurs de boudins mal réglés ;
- le 2 décembre 2019, les enregistreurs de paramètres n'ont pas montré d'enrayages ou patinages (cf. figure 40) aussi systématiques que lors de ces essais sur la zone ;
- aucune remontée n'a été faite au PCC le 2 décembre 2019 quant à des conditions de mauvaise adhérence sur la ligne par les conducteurs.

Les essais ont consisté à réaliser :

- des freinages de service à 30 km/h, 40 km/h et 50 km/h ;
- des freinages de service à 50 km/h suivis de freinages d'urgence (avec/sans applications des patins magnétiques et/ou sablage inhibé) ;
- un freinage de service à 60 km/h avec application des patins magnétiques suivi d'un freinage d'urgence tiré en plein enrayage.

Les essais suivants ont été particulièrement analysés :

1. Freinage de service déclenché à 50 km/h et application du freinage d'urgence à une vitesse proche de 30 km/h avec sablage inhibé.

La courbe (vitesse, temps) obtenue a été la suivante :

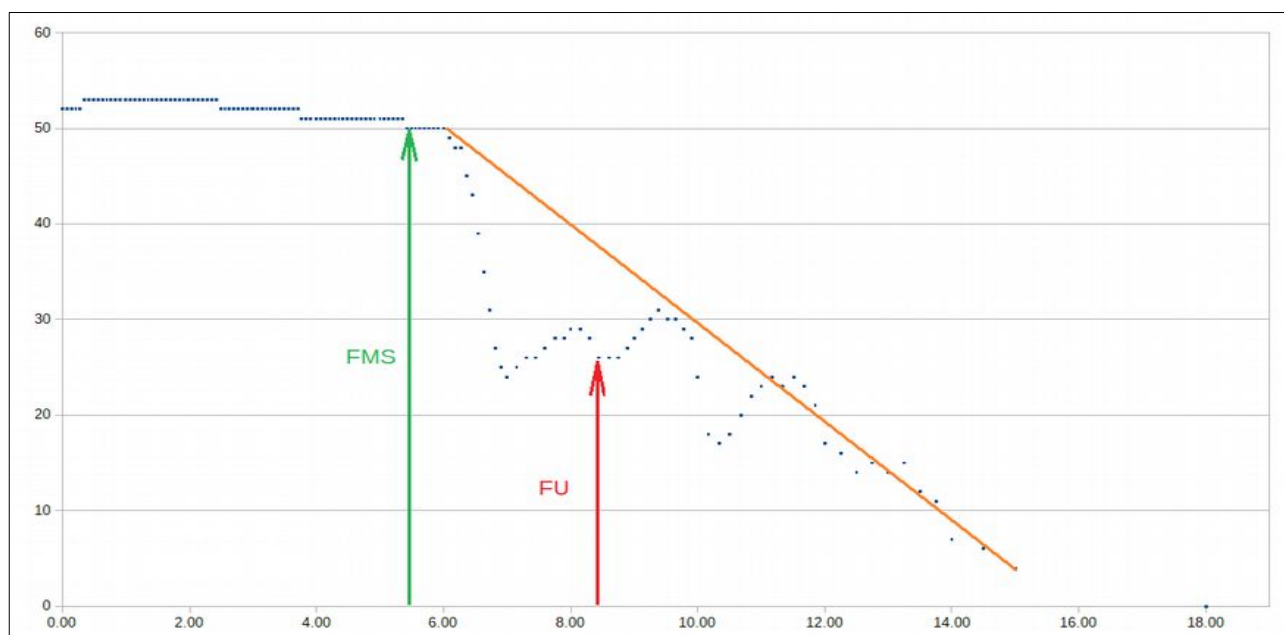


Figure 58 - Courbe de vitesse à la roue du tramway selon le temps, d'un essai de freinage (freinage de service à 50 km/h avec sablage inhibé puis freinage d'urgence sur rail graissé) (image BEA-TT)

La distance de freinage réelle a été mesurée à 90 mètres pour un temps de freinage de 12,5 secondes. En ne prenant pas la dernière valeur du graphe (saut de 3 secondes), la décélération estimée à $1,16 \text{ m/s}^2$ (droite orange⁹).

⁹ Approximation ne correspondant pas à la vitesse réelle mais permettant le calcul de décélération le plus juste possible.

2. Freinage de service déclenché à 60 km/h et application du freinage d'urgence à une vitesse proche de 40 km/h.

La courbe (vitesse, temps) obtenue a été la suivante :

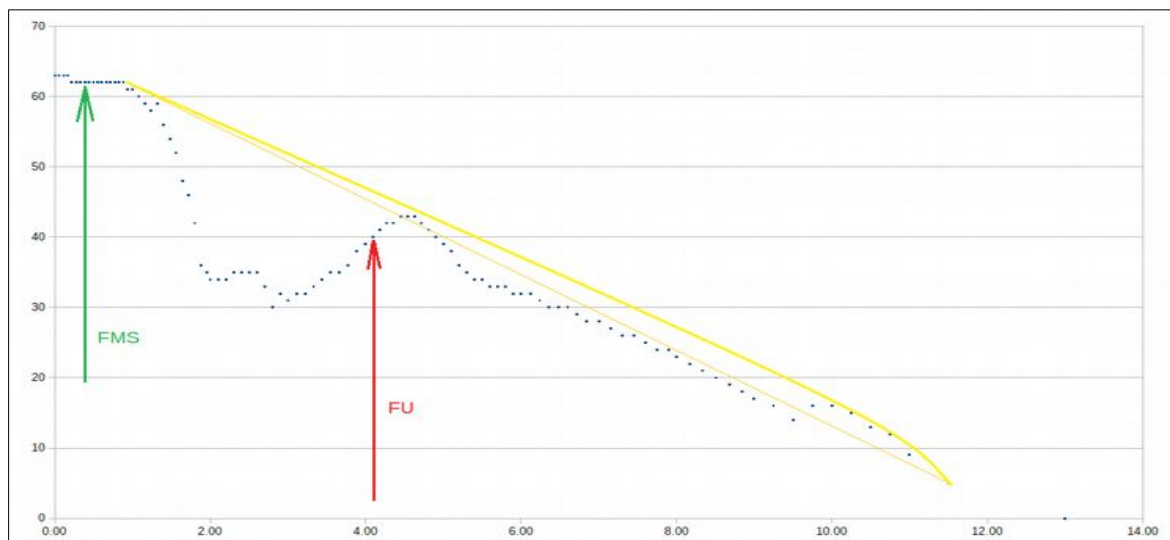


Figure 59 - Courbe de vitesse à la roue du tramway selon le temps, d'un essai de freinage (freinage de service à 60 km/h puis freinage d'urgence sur rail graissé) (image BEA-TT)

La distance de freinage a été mesurée à 121 mètres pour un temps de freinage de 12,6 secondes. La décélération est estimée à $1,48 \text{ m/s}^2$. Pour rappel, la distance du freinage au choc le 2 décembre 2019 était de 115 mètres (et 131 mètres si le tramway n° 2012 n'avait pas été présent). Dans ces conditions d'essais avec dégradation importante du contact rail / roue et lorsque rien n'est inhibé sur le matériel roulant d'essai, des distances inférieures ont été obtenues.

De manière générale, ces essais ont montré qu'en présence d'un rail graissé, la dégradation des performances de freinage est potentiellement plus importante que celle constatée en présence d'un rail arrosé avec de l'eau savonneuse.

Par ailleurs, les essais confirment que l'inhibition des patins magnétiques et du sablage impactent fortement les performances de freinage sur rail graissé. En comparant des essais de freinage sans sablage avec ou sans application des patins magnétiques, il est aussi constaté que l'application des patins magnétiques permet de réduire significativement la distance d'arrêt en adhérence dégradée et ce, de manière plus importante que le sablage. Les patins magnétiques contribuent bien au nettoyage du dessus du rail dont bénéficient principalement les autres essieux.

L'analyse des résultats de ces essais complémentaires a montré :

- l'obtention de distances d'arrêt proches de celles observées le 2 décembre 2019 en appliquant sur le rail le produit utilisé par le système de graissage de boudins ;
- l'effet de l'application des patins magnétiques et du sablage sur les performances de freinage en adhérence dégradée ;
- un comportement de l'anti-enrayage similaire à celui constaté le jour de l'accident tout en notant des corrections différentes lorsque le freinage d'urgence est tiré.

Ces résultats permettent de conforter les hypothèses prises précédemment :

- l'application effective des patins magnétiques ;
- un sablage partiel.

Néanmoins il est nécessaire de compléter l'analyse pour expliquer le comportement de l'anti-enrayeur le jour de l'accident en déterminant les conditions possibles d'application du produit du système de graissage de boudins et en étudiant le fonctionnement de l'anti-enrayeur.

3.12.4.4 - Le système de graissage des boudins

Le système de graissage des boudins est installé sur les bogies moteurs d'extrémités des rames 401. Néanmoins lors des révisions des bogies, l'exploitant a déplacé ce système de graissage des bogies moteurs d'extrémités vers le bogie porteur.

Par ailleurs, l'exploitant a lancé une modification du système de graissage depuis décembre 2020, en l'implantant uniquement sur les bogies porteurs et en reprenant des éléments du système actuellement en service sur les rames 302 et 402. À terme, les éjecteurs de graisse du système de graissage présenteront la configuration de la photo ci-contre.



Figure 60 - Système de graissage des boudins après modification
(photo TaM)

Cette évolution est notamment justifiée par le retour d'expérience de l'exploitant acquis sur le système présent sur les bogies moteurs : mélange huile / sable, difficultés de réglages des gicleurs et de nettoyage des systèmes, inefficacité du graissage des boudins... À noter qu'un autre réseau de tramway français justifie aussi ce type d'évolution par la création d'agglomérats graisseux tombant sur le rail et la plateforme, et par l'encrassement des bogies. Enfin de manière plus générale et pour différents types de systèmes sur rail, le retour d'expérience montre également que des phénomènes de manque d'adhérence en lien avec des systèmes de graissage des boudins ont déjà été rencontrés.

Dans l'attente de la modification ci-dessus, les rames 401 présentaient un système de graissage localisé soit sur les bogies moteurs d'extrémités soit sur le bogie porteur.

Le jour de l'accident, et si on considère le tramway n° 2028 et les 6 tramways précédents, le dispositif de graissage était localisé sur les bogies moteurs d'extrémités pour 4 d'entre eux et sur les bogies porteurs sur 3 d'entre eux (dont le tramway n° 2028).

Par ailleurs, les investigations sur la voie ont montré que des ordres de graissage étaient émis par le système d'aide à l'exploitation dans la zone de collision. À partir du point de graissage, une impulsion de 0,5 seconde a lieu toutes les 2 secondes pendant 34 secondes. Après 34 secondes, le cycle de graissage est interrompu automatiquement même si la commande origine de la demande est toujours présente.

Au vu de la localisation du point de commande par le système d'aide à l'exploitation (cf. figure 50) et de la durée des cycles de graissage, il s'avère que la phase de freinage du tramway n° 2028 le 2 décembre 2019 a eu lieu dans cette même zone.

Compte tenu des difficultés de maintenance du système de graissage des boudins, il est donc probable que le jour de l'accident le rail ait été graissé (par remontée de graisse du boudin vers la table de roulement) par des rames présentant un dispositif mal réglé sans pour autant pouvoir les identifier précisément. Il convient également de rappeler que le rail n'avait pas été nettoyé depuis le 19 novembre 2019.

Néanmoins l'état précis du rail n'a pu être déterminé au cours des investigations : il peut être juste admis au vu des premiers constats visuels que le rail n'était pas autant graissé que lors des essais complémentaires décrits au chapitre précédent. Cette hypothèse est confortée par l'analyse des enrayages réalisée au cours des investigations sur la voie qui ne montrent pas des enrayages généralisés dans la zone de collision.

En complément de cet état du rail supposé graissé et même si l'occurrence d'un tel événement a été qualifiée comme rare après analyse des constats visuels réalisés sur le tramway n° 2028 et d'autres tramways du réseau, la chute sur le haut du rail d'agglomérats graisseux présents sur les graisseurs des boudins et sur les patins magnétiques du tramway n° 2028 ou potentiellement des rames précédentes est à envisager. Ces agglomérats tombent habituellement en terminus selon l'exploitant. Mais il ne peut être exclu qu'ils puissent tomber ailleurs sur la ligne, notamment en considérant l'utilisation abusive des patins par le conducteur au cours des kilomètres précédents. Un agglomérat graisseux présent sur le haut du rail et tombé d'un tramway précédent ou depuis le tramway n° 2028 pourrait, en étant étalé par le passage des roues, dégrader le contact rail / roue au niveau d'un essieu et le maintenir tant que l'essieu n'est pas nettoyé. Pour le tramway n° 2028, il ne peut être aussi exclu, malgré le réglage des graisseurs de boudins supposé 5 jours avant l'accident, qu'une partie de la table de roulement ait été graissée.

Il convient donc de retenir de cette analyse sur le système de graissage de boudins les éléments suivants :

- le système présente des difficultés de maintenance (réglage, nettoyage...) et provoque la création d'agglomérats graisseux sur les bogies ;
- le tramway n° 2028 a freiné sur une zone où le système d'aide à l'exploitation a commandé des cycles de graissage ;
- le jour de l'accident, l'adhérence aurait été réduite par la présence d'un rail graissé, sans excès en référence aux essais complémentaires, et n'ayant pas été nettoyé récemment.

Néanmoins pour expliquer les performances de freinage obtenues le jour de l'accident, d'autres hypothèses doivent être émises et peuvent être formulées comme suit :

- un agglomérat graisseux provenant du tramway n° 2028 ou des rames précédentes est tombé sur le rail ce qui a entraîné l'enrayage constaté le 2 décembre 2019 ;
- la correction des efforts de freinage par l'anti-enrayeur n'aurait éventuellement pas été adaptée alors que l'état d'adhérence du rail aurait dû lui permettre de rester dans sa limite de fonctionnement.

La seconde hypothèse relative à l'anti-enrayeur doit donc être étudiée avant d'envisager ou non le cumul de ces hypothèses et préciser un scénario probable de l'accident.

3.12.4.5 - L'anti-enrayeur

Chaque bogie est surveillé par un équipement d'anti-enrayage. Cet équipement régule un glissement, c'est-à-dire un écart de vitesse entre l'essieu et une vitesse de référence calculée à partir de vitesses d'autres essieux, afin d'exploiter de façon optimale

l'adhérence rail / roue disponible et de l'améliorer. La détection de glissement est réalisée essieu par essieu sur les bogies moteurs, et roue par roue sur les bogies porteurs.

Cette régulation est différente entre les bogies moteurs et le bogie porteur. Elle dépend également du type de freinage (freinage de service et freinage d'urgence).

L'anti-enrayeur corrige donc les efforts de freinage afin d'empêcher le blocage des essieux et un glissement incontrôlé dus à une mauvaise adhérence. Ces consignes d'efforts sont gérées localement sur chaque bogie.

Ces régulations sont assurées par un logiciel intégré dans l'équipement traction - freinage des bogies moteurs et par un autre logiciel intégré dans l'électronique de commande du freinage mécanique du bogie porteur. Il convient de noter que, pour la dernière génération des tramways Citadis, un seul et même logiciel d'anti-enrayage intervient pour les bogies moteurs et porteurs.

Le logiciel des bogies moteurs est de conception Alstom et celui des bogies porteurs de conception Knorr-Bremse¹⁰. Alstom a indiqué qu'une seule évolution majeure a eu lieu sur le logiciel de l'anti-enrayeur et concernait uniquement les bogies moteurs de type Arpège (donc uniquement le bogie de la nacelle motorisée pour une rame 401).

Les algorithmes de base du logiciel d'anti-enrayage Alstom sont identiques sur les matériels roulants Alstom et bénéficient à ce titre d'un retour d'expérience de plus de 20 ans ne montrant pas d'éléments défavorables.

Néanmoins des réglages sont différents entre les différentes générations d'équipements de traction et freinage des bogies moteurs et selon les fournisseurs de l'électronique de commande des bogies porteurs.

Les différents algorithmes des logiciels Alstom et Knorr-Bremse, ainsi que leurs interfaces, n'ont pas été analysés au cours des investigations.

La validation de ces logiciels a été réalisée par une évaluation indépendante d'un organisme qualifié sans s'inscrire dans un processus de certification particulier en l'absence de référentiel en vigueur au moment de sa conception. Il n'a pu être précisé au cours des investigations les niveaux de sécurité associés à cette validation.

Il a été néanmoins retrouvé les objectifs suivants de performances de freinage. L'équipement d'anti-enrayage permet de limiter à 40 % maximum en freinage maximal de service et à 25 % maximum en freinage d'urgence, l'allongement de la distance d'arrêt en adhérence dégradée par rapport à un rail sec. Cette performance doit être respectée pour une adhérence correspondant à des rails arrosés avec un mélange d'eau additionnée de 4 % de savon. Aucun blocage de roue n'est admis dans cette configuration.

Il a été montré précédemment que l'état du rail était potentiellement graissé et donc des conditions d'adhérence plus faibles qu'avec un rail savonné ce qui permet d'expliquer que ces objectifs n'ont pas été respectés le jour de l'accident.

Pour comprendre le comportement de l'anti-enrayeur le jour de l'accident, une analyse est nécessaire et peut être réalisée, en premier lieu, à partir de la courbe de freinage obtenue le 2 décembre 2019 et rappelée ci-dessous :

10 Créée en 1905, l'entreprise Knorr-Bremse fabrique des systèmes de freins pour véhicules sur rails et utilitaires. Elle emploie 29 700 personnes dans le monde.

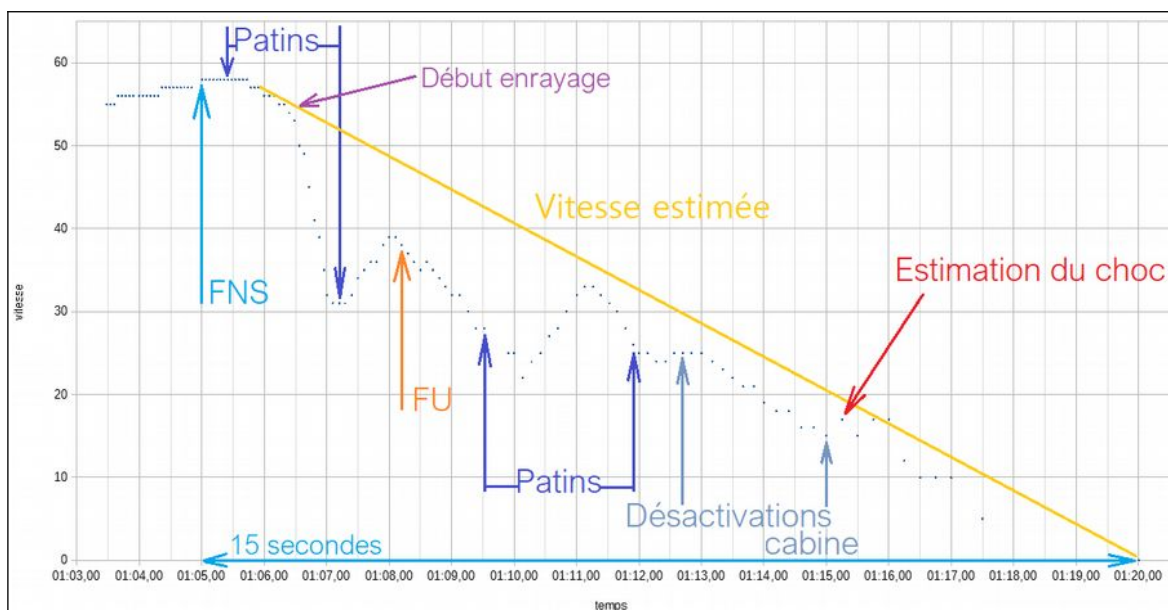


Figure 61 - Courbe de freinage (vitesse de roue selon temps) du 2 décembre 2019 (graphe BEA-TT)

Au préalable il convient de rappeler que la centrale tachymétrique reçoit deux informations vitesses issues d'un capteur de vitesse situé sur chaque bogie moteur. Lors d'une phase de freinage, la courbe de vitesse enregistrée le jour de l'accident présente une vitesse égale au maximum des deux informations vitesse transmises.

La figure 61 montre que la vitesse estimée du tramway reste toujours supérieure à la vitesse maximale transmise par la centrale tachymétrique ce qui laisse penser que, tout au long du freinage de service et d'urgence, les efforts de freinage ont bien été corrigés par l'anti-enrayeur en fonction de l'état du rail. La réduction importante des efforts de freinage électrique / mécanique pourrait donc s'expliquer par un faible niveau d'adhérence entre la roue et le rail comme celui constaté lors de la réalisation des essais complémentaires de freinage sur rail graissé.

Dans ce cas, au vu du faible niveau d'adhérence et de l'allongement important de la distance d'arrêt, il peut être évoqué un enrayage profond. À noter qu'une correction d'efforts a toujours eu lieu sur les bogies moteurs sans atteindre les valeurs d'une commande perdue¹¹ qui aurait provoqué l'inhibition de l'anti-enrayeur sur ces bogies (défaut non remonté par les équipements de traction - freinage).

Cet enrayage profond a pu avoir lieu sur l'ensemble des bogies et le tirage du freinage d'urgence n'a pas modifié le comportement de l'anti-enrayeur si on considère que les efforts étaient appliqués au maximum de l'adhérence disponible.

Néanmoins l'enregistrement de la centrale tachymétrique ne permet pas de statuer sur les événements survenus sur les autres essieux, car notamment aucune autre information de vitesse des autres essieux n'est enregistrée et utilisée par la centrale tachymétrique. En effet, lors d'un enrayage, la vitesse de l'essieu considéré est comparée à la vitesse de référence établie pour chaque équipement de freinage. Pour les bogies moteurs, cette vitesse de référence est calculée à partir de 4 autres informations de vitesse, provenant des bogies moteurs et du bogie porteur, et différentes de celles de la centrale tachymétrique. Cette vitesse de référence est utilisée pour adapter la consigne d'effort du freinage électrique puis la consigne du freinage mécanique (la priorité étant la réduction des efforts de freinage mécanique). Pour le bogie porteur, cette vitesse de référence est calculée à partir d'informations de vitesse provenant de ses roues, pour en

¹¹ Une commande est dite perdue lorsque, au bout d'un temps donné, elle est annulée du fait d'une consigne de sortie qui ne correspond pas aux résultats attendus.

déduire les corrections d'efforts de freinage à appliquer. À partir de toutes ces informations vitesse, le délestage est effectué bogie par bogie (tant sur les bogies moteurs que sur le bogie porteur).

Le jour de l'accident et au vu de l'état du rail, une correction des efforts était nécessaire mais il convient de se demander si la correction apportée était adaptée tout en rappelant qu'aucun défaut vitesse n'a été remonté et que les essais dynamiques n'ont pas montré d'anomalies de l'anti-enrayeur dans les conditions des essais (rail arrosé avec de l'eau savonneuse). Une correction des efforts pourrait être inadaptée, par exemple si les vitesses de référence locales sont erronées. En effet, une vitesse de référence erronée, notamment si cette vitesse est supérieure à la vitesse réelle du tramway, pourrait conduire à des corrections inadaptées à l'état d'adhérence. Il n'a pas été possible pour le constructeur d'apporter sur ce point d'autre élément au cours de l'enquête.

Pour conclure, l'analyse de la courbe de freinage obtenue à partir de la centrale tachymétrique ne met pas en évidence d'anomalies de l'anti-enrayeur. Néanmoins en l'absence d'autres enregistrements de vitesses locales, il ne peut être exclu que la correction des efforts de freinage par l'anti-enrayeur n'aurait éventuellement pas été adaptée alors que l'état d'adhérence du rail aurait dû lui permettre de rester dans sa limite de fonctionnement. Cette possibilité, qui ne peut être totalement écartée, est donc reprise en conclusion.

3.12.4.6 - Conclusion des investigations sur le matériel roulant

Les investigations menées sur le matériel roulant ont montré :

- la présence d'agglomérats graisseux sur les bogies au niveau des patins magnétiques et des systèmes de graissage de boudins ;
- l'absence de remontée de défauts majeurs au niveau des enregistrements du tramway ;
- la détente de gamme (et d'opérations de maintenance) sans justification et validation complètes ;
- l'absence d'anomalies du système de freinage lors de la dernière opération de maintenance ;
- des tests journaliers prévus par le plan de maintenance mais non tracés donc sans garantie de réalisation ;
- l'absence d'anomalies constatées du système de freinage lors des essais statiques et dynamiques ;
- des performances de freinage constatées le jour de l'accident inférieures à des performances de freinage avec un rail arrosé avec de l'eau savonneuse mais similaires à des performances de freinage avec un rail graissé excessivement par le produit utilisé pour le système de graissage de boudins ;
- un système de sablage des bogies moteurs d'extrémités présentant des colmatages fréquents et nécessitant des débouchages manuels et réguliers, prestations sous-traitées par l'exploitant mais ne faisant pas l'objet d'un suivi particulier ;
- un système de graissage de boudins présentant des difficultés de maintenance (réglage, nettoyage...) et provoquant la création d'agglomérats graisseux sur les bogies.

Ces investigations ont permis d'émettre pour le jour de l'accident les hypothèses probables suivantes :

- l'application effective des patins magnétiques ;
- un sablage défaillant sur une partie des bogies moteurs d'extrémité ;
- l'adhérence réduite par la présence d'un rail non nettoyé récemment et probablement graissé.

En complément et pour expliquer l'enrayage profond constaté le jour de l'accident, des hypothèses complémentaires ont été émises et pourraient être les suivantes :

- un agglomérat graisseux est tombé sur le haut du rail soit du tramway n°2028 soit d'un tramway précédent ;
- la correction des efforts de freinage par l'anti-enrayeur n'aurait éventuellement pas été adaptée alors que l'état d'adhérence du rail aurait dû lui permettre de rester dans sa limite de fonctionnement.

3.13 - Les scénarios possibles de l'accident

Tout d'abord les investigations menées sur l'infrastructure et le matériel roulant n'ont pas permis d'identifier une cause principale de l'accident du 2 décembre 2019 et notamment sur le système de freinage du tramway n° 2028.

L'accident ne peut s'expliquer que par une combinaison de facteurs constatés sur l'exploitation, l'infrastructure et le matériel roulant et ayant conduit à une dégradation des performances de freinage. L'importance de cette dégradation n'a pu être complètement justifiée au cours de l'enquête mais seulement expliquée à partir de différentes hypothèses plus ou moins probables.

Notre proposition de scénario de l'accident est donc la suivante.

Le conducteur circulait à une vitesse élevée et a déclenché un freinage sur une zone présentant un rail non nettoyé récemment. L'adhérence n'était donc pas optimale.

Le système d'aide à l'exploitation commande des cycles de graissage de boudins dans cette zone pour toutes les rames. D'une part, le système de graissage de boudins des rames 401 présente des difficultés de maintenance et provoque la création d'agglomérats graisseux sur les bogies. D'autre part, le passage de rames présentant des dispositifs potentiellement mal réglés conduit à graisser en partie le haut du rail par remontée de graisse du boudin vers la table de roulement.

Le tramway n° 2028 a donc freiné en totalité sur une zone présentant probablement un rail graissé et donc en condition d'adhérence dégradée. Cet état d'adhérence a provoqué l'enrayage du tramway n° 2028 pendant toute la phase de freinage. Cette phase de freinage (freinage de service puis freinage d'urgence) a eu lieu avec une application des patins magnétiques (initiée en mode manuel par le conducteur dès le freinage de service) et un sablage probablement défaillant sur une partie des bogies moteurs d'extrémités (compte tenu du retour d'expérience du système de sablage).

Un enrayage profond a eu lieu et n'a pas permis au tramway n° 2028 de s'arrêter.

L'ampleur de l'enrayage constaté au cours de l'accident pourrait s'expliquer par les hypothèses complémentaires suivantes :

- un agglomérat graisseux est tombé sur le haut du rail soit du tramway n° 2028 soit d'un tramway précédent ;
- la correction des efforts de freinage par l'anti-enrayeur n'aurait éventuellement pas été adaptée alors que l'état d'adhérence du rail aurait dû lui permettre de rester dans sa limite de fonctionnement.

L'enquête menée n'a pas permis de valider l'une ou l'autre hypothèse ni même le cumul de ces deux hypothèses.

4 - Déroulement de l'accident

Ce chapitre restitue l'analyse du déroulement de la collision par rattrapage ayant eu lieu le 2 décembre 2019, en conclusion des investigations conduites par le BEA-TT.

Le lundi 2 décembre 2019 en début d'après-midi, une panne d'un tramway sur la ligne 1 provoque l'arrêt en ligne ou en station de plusieurs tramways. Le tramway n° 2012 s'arrête une centaine de mètres avant la station Hôpital Lapeyronie, où un autre tramway est déjà à quai.

Le tramway n° 2028 qui le suit quitte la station Universités des Sciences et des Lettres en direction de cette station Hôpital Lapeyronie. Au niveau du Centre Hospitalier Universitaire Lapeyronie, il atteint la vitesse de 58 km/h, dépassant de 8 km/h la vitesse maximale autorisée malgré les messages d'alerte du PCC.

Le conducteur du tramway n° 2028 aperçoit le tramway n° 2012 devant lui. Il freine normalement, applique les patins magnétiques, puis enclenche un freinage d'urgence via son manipulateur. Le tramway ralentit mais pas suffisamment pour éviter la collision. Le tramway ne réagissant pas classiquement, le conducteur tire de nouveau le freinage d'urgence au manipulateur, applique les patins magnétiques via le bouton-poussoir, puis dans un mouvement de panique, désactive et réactive par deux fois sa cabine.

Le conducteur circulait à une vitesse élevée et a déclenché un freinage sur une zone présentant un rail non nettoyé récemment. L'adhérence n'était donc pas optimale.

À cela s'ajoute que, d'une part, le système de graissage de boudins des rames 401 présente des difficultés de maintenance et provoque la création d'agglomérats graisseux sur les bogies ; et d'autre part, le passage de rames présentant des systèmes de graissage potentiellement mal réglés conduit à graisser en partie le haut du rail par remontée de graisse du boudin vers la table de roulement. Le tramway n° 2028 a donc freiné en totalité sur une zone présentant probablement un rail graissé et donc en condition d'adhérence dégradée.

Cet état d'adhérence a déclenché l'anti-enrayeur du tramway n° 2028 pendant toute la phase de freinage (freinage de service puis freinage d'urgence), qui a eu lieu avec une application des patins magnétiques et un sablage probablement défaillant sur une partie des bogies moteurs d'extrémités (compte tenu du retour d'expérience du système de sablage).

Un enrayage profond a eu lieu et n'a pas permis au tramway n° 2028 de s'arrêter.

Le tramway n° 2028 heurte le tramway n° 2012 par l'arrière à une vitesse estimée entre 15 et 20 km/h.

La collision a fait 41 blessés légers parmi les passagers des deux tramways, soit environ 200 personnes. Des dégâts matériels sont constatés sur les deux tramways.

5 - Analyse des causes et facteurs associés, orientations préventives

5.1 - Arbre des causes

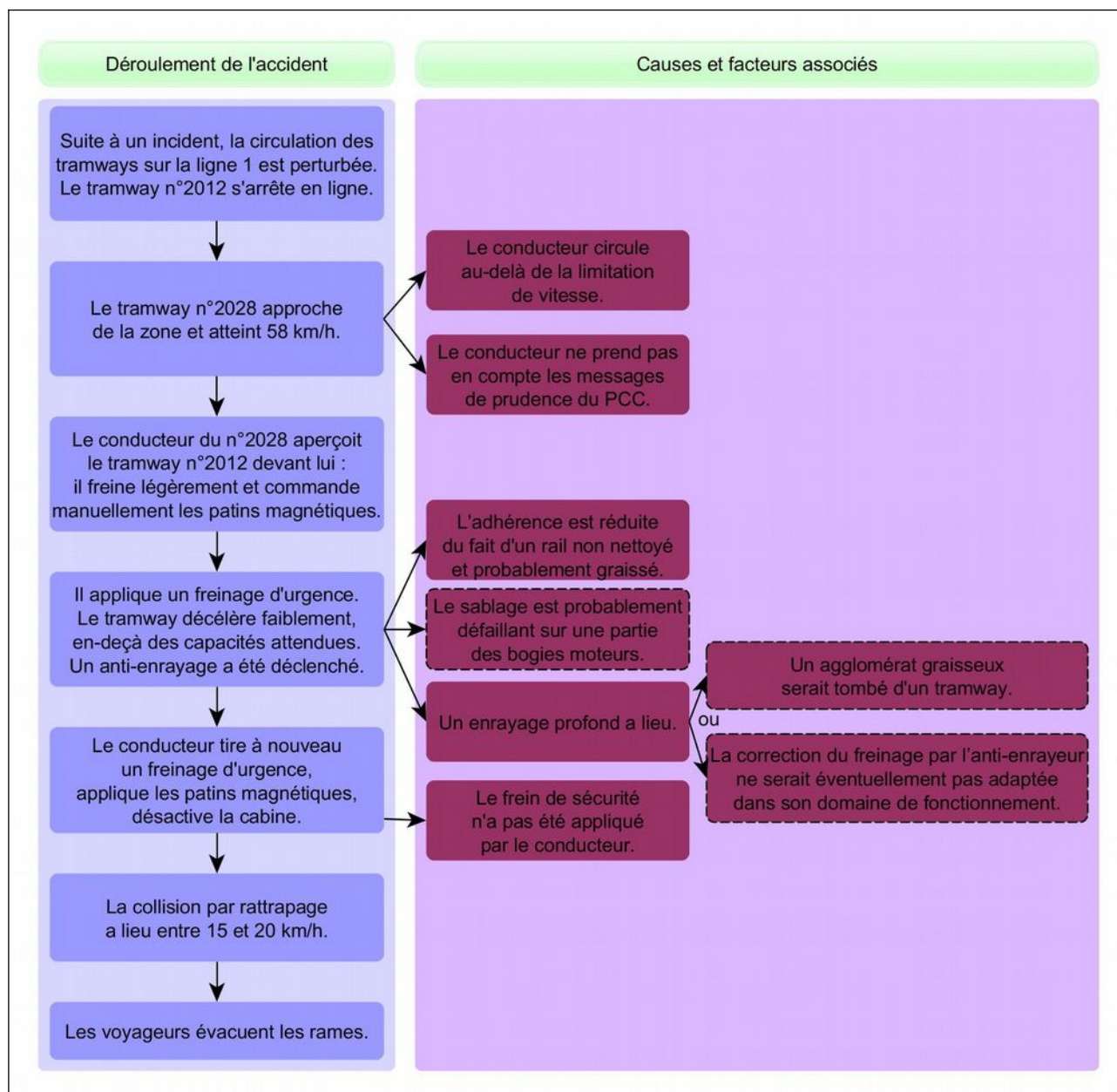


Figure 62 - Arbre des causes

5.2 - Les causes de l'événement

Le 2 décembre 2019 à 15 h 10, circulant le long du Centre Hospitalier Universitaire Lapeyronie, le conducteur du tramway est en excès de vitesse mais lorsqu'il commande le freinage d'urgence, la distance devant lui est suffisante pour que dans une situation normale, il puisse s'arrêter avant l'arrière du tramway n° 2012.

Les performances de freinage du tramway n° 2028 associées à un phénomène d'enrayage ont été inférieures à celles qui étaient attendues, causant ainsi la collision.

La complexité de l'interaction véhicule-voie a exigé une analyse systémique pour rechercher les causes du rattrapage. Les investigations ont identifié plusieurs facteurs contributifs :

- le comportement de conduite du conducteur du tramway n° 2028, sollicitant fortement le matériel roulant, alors que les conditions d'exploitation étaient défavorables ;
- l'adhérence réduite en présence d'un rail non nettoyé récemment et probablement graissé ;
- un sablage probablement défaillant sur une partie des bogies moteurs d'extrémités du tramway.

Ces facteurs se sont cumulés, sans que l'on puisse, au vu de la complexité du cas, déterminer avec exactitude la contribution de chacun.

Néanmoins, pour expliquer l'enrayage profond constaté lors de l'accident, des facteurs additionnels sont nécessaires. Deux hypothèses complémentaires sont donc émises :

- un agglomérat graisseux serait tombé d'un tramway dans la zone de freinage,
- la correction du freinage par l'anti-enrayeur n'aurait éventuellement pas été adaptée alors que l'état d'adhérence du rail aurait dû lui permettre de rester dans sa limite de fonctionnement.

L'enquête n'a pas permis d'exclure ou de valider l'une ou l'autre hypothèse, ni de valider un cumul de ces deux hypothèses.

Les orientations préventives visant à éviter le renouvellement d'un tel événement sont ainsi recherchées dans les domaines suivants :

- le comportement de conduite du conducteur ;
- l'état de propreté du rail, et sa maintenance ;
- le comportement au freinage et la maintenance du matériel roulant.

5.3 - Le comportement de conduite du conducteur

Le 2 décembre 2019, le conducteur du tramway n° 2028 a dépassé de multiples fois les limitations de vitesse imposées sur la ligne 1 et a notamment atteint 58 km/h au lieu de 50 km/h entre la courbe de la route de Ganges et le lieu de la collision. De plus, il n'a pas pris en considération l'appel général ni anticipé l'accumulation de tramways qui se formait devant lui, alors que le règlement de circulation des tramways de TaM prône de la « prévoyance » et de la « défiance » en tout lieu et tout temps pour les conducteurs de tramways.

Suite à cette collision, le conducteur n'a pas repris la conduite du tramway.

Il convient de s'interroger sur la répétabilité d'un tel comportement. Les observations du conducteur précédemment faites par sa hiérarchie relevaient soit une conduite trop rapide, soit une conduite trop lente. Il n'a pas été possible d'établir un lien entre ces observations et les constats du 2 décembre 2019.

Les observations régulières de conduite par l'exploitant de ses conducteurs tramway aident néanmoins à la connaissance et la compréhension de l'exercice de la conduite par les conducteurs et par la hiérarchie. Elles sont une bonne pratique. Elles doivent être poursuivies.

Par ailleurs, le conducteur a appliqué de façon manuelle et répétée les patins magnétiques dans : un passage de courbe, un arrêt en station et au début du freinage qui a mené à la collision. Juste avant la collision, le conducteur aurait aussi pu enclencher le frein de sécurité au lieu d'actionner la clé d'activation de la cabine, sans pour autant pouvoir démontrer que son application aurait changé le cours de l'accident. Afin de renforcer l'apprentissage et l'usage du frein de sécurité ainsi que de rappeler la bonne utilisation des patins magnétiques et les bonnes pratiques générales de conduite, le BEA-TT émet la recommandation ci-après.

Recommandation R1 à destination de TaM :

Améliorer la formation initiale, continue et le suivi régulier des conducteurs de tramways de Montpellier, sur les sujets suivants :

- la connaissance et la pratique du frein de sécurité par les conducteurs ;
- l'usage adéquat des patins magnétiques ;
- les risques d'une vitesse excessive ;
- la nécessité de la réception et de la prise en compte des messages du PCC dans l'anticipation des obstacles pouvant se présenter devant tout conducteur de tramways.

5.4 - L'état de propreté de la voie, et sa maintenance

La fréquence des passages de l'aspirail sur la voie était fixée à 3 passages par mois sur l'ensemble du réseau en toutes saisons. Le contrat initial prévoyait des passages sur les voies courantes avec une fréquence, de début octobre à fin février, d'une fois par semaine, et de début mars à fin septembre, d'une fois toutes les deux semaines. Contrairement à ces objectifs, l'exploitant ne planifiait pas de renforcement du nettoyage des voies pendant la période automnale et hivernale. Une sollicitation par les conducteurs auprès du PCC est possible, ce dernier demandant alors une intervention de nettoyage au prestataire. La traçabilité de ces interventions n'a pu être apportée.

Le dernier passage sur la zone avant l'accident a eu lieu le 19 novembre 2019 – soit 13 jours avant l'accident. La fréquence de 10 jours définie par l'exploitant était légèrement dépassée. Même sans connaître l'évolution de l'état du rail en fonction du temps, l'état du rail ne pouvait être optimal.

Désormais, TaM prévoit que son prestataire passe à une fréquence de nettoyage d'une fois par semaine de novembre à février et de 3 fois par mois de mars à octobre. Cette mesure est une réponse appréciable.

Suite aux constats ci-dessus, le BEA-TT émet la recommandation suivante :

Recommandation R2 à destination de TaM :

Entériner dans la documentation de maintenance la fréquence de nettoyage du rail avec le renforcement en période automnale et hivernale telle que désormais prévu. De plus, tracer les interventions de nettoyage faites à la demande.

Un perturbographe a été installé en octobre 2020 sur le tramway n° 2006 équipé des équipements traction - freinage du tramway n° 2028 : il n'a pas été remonté de freinage d'urgence ou de difficulté liée à de l'adhérence pendant les douze mois qui ont suivi. Toutefois, l'exploitant nous indique avoir rencontré de nouveau des difficultés avec des

rames 401 lors d'enrayages, sans pouvoir apporter les données de l'enregistreur de paramètres, préciser l'état du rail ou le contexte de ces enrayages.

C'est pourquoi le BEA-TT invite TaM à procéder, immédiatement après tout signalement en lien avec la problématique d'adhérence par un conducteur, à la collecte des données de l'enregistreur de paramètres et de toute autre donnée utile du tramway, puis à inspecter l'état du rail et collecter tous les éléments de contexte nécessaire, afin d'analyser les réactions du tramway concerné et de capitaliser un retour d'expérience sur ces événements.

5.5 - Le comportement au freinage et la maintenance du matériel roulant

Il a été constaté que le système de graissage de boudins des rames 401 présente des difficultés de maintenance et provoque la création d'agglomérats graisseux sur les bogies, c'est pourquoi le mainteneur a engagé une modification du système. De plus, dans les zones commandées par le système d'aide à l'exploitation, le passage de rames présentant des dispositifs potentiellement mal réglés peut conduire à graisser en partie le haut du rail par remontée de graisse du boudin vers la table de roulement. De fait, lors d'un freinage, l'anti-enrayeur peut s'activer compte tenu d'une adhérence potentiellement dégradée.

De plus, que la chute d'un agglomérat graisseux ait eu lieu ou non dans l'accident du 2 décembre 2019, leur présence sur les rames est à éviter afin d'éviter leur chute sur la voie et le cas échéant, leur étalement sur le rail.

C'est pourquoi le BEA-TT émet la recommandation suivante :

Recommandation R3 à destination de TaM :

Adapter les processus de maintenance du système de graissage de boudins, et mettre en œuvre la modification de ce système, afin d'éviter la présence de graisse sur la table de roulement et la formation d'agglomérats graisseux sur les bogies des tramways.

Bien que le lien de cause à effet dans l'accident ne soit pas effectif, des détentes de pas de maintenance sécuritaire ont été mises en œuvre dans le plan de maintenance des rames 401 par TaM sans justification et validation complètes (gamme à 15 000 km). Toute détente de pas de maintenance constitue potentiellement une évolution de la démonstration de sécurité du système. Le BEA-TT émet ainsi la recommandation ci-après :

Recommandation R4 à destination de TaM :

Finaliser le processus de validation des évolutions des pas de maintenance sécuritaire engagé auprès du service de contrôle STRMTG.

Et de façon globale, le BEA-TT invite l'ensemble des autorités organisatrices de la mobilité de réseaux de tramway français à informer le STRMTG de toute détente de pas de maintenance sécuritaire, au vu de leur impact potentiel sur les démonstrations de sécurité du système.

Au cours des investigations, la traçabilité de certaines vérifications sécuritaires issues du plan de maintenance n'a pu être apportée (par exemple, tests journaliers du freinage d'urgence et du frein de sécurité). De plus, nous avons pu observer que le nombre de débouchages et remplissages des sablières n'est pas tracé, empêchant de quantifier l'impact du non-sablage le jour de l'accident. Les réglages et les nettoyages réellement effectués sur les graisseurs de boudins, ainsi que tout déplacement de graisseur vers un autre bogie, ne sont pas complètement tracés. Le BEA-TT émet donc la recommandation suivante :

Recommandation R5 à destination de TaM :

Poursuivre l'amélioration de la traçabilité de la maintenance préventive et corrective du matériel roulant, notamment concernant les tests journaliers du freinage d'urgence et du frein de sécurité, l'entretien des sablières et les actions menées sur les graisseurs de boudin.

Au vu des écarts au plan de maintenance et de la traçabilité perfectible de l'exploitant TaM, le BEA-TT émet la recommandation suivante :

Recommandation R6 à destination du STRMTG :

Réaliser un audit sur la maintenance des rames 401 et sur la maintenance du rail, du réseau de Montpellier, à l'issue des actions d'amélioration conduites par TaM suite à l'accident du 2 décembre 2019.

Suite aux investigations et au vu de l'enrayage profond constaté le jour de l'accident, une hypothèse complémentaire portant sur la correction des efforts de freinage par l'anti-enrayeur a été étudiée. Elle n'a pas pu être validée ou invalidée. Les différents algorithmes des logiciels Alstom et Knorr-Bremse, ainsi que leurs interfaces, n'ont pu être analysés au cours de l'enquête. La validation de ces logiciels a été réalisée par une évaluation indépendante d'un organisme qualifié sans s'inscrire dans un processus de certification particulier en l'absence de référentiel en vigueur au moment de sa conception. Ainsi les niveaux de sécurité associés à cette validation n'ont pu être précisés au cours des investigations. Bien que l'analyse de la courbe de freinage obtenue à partir de la centrale tachymétrique n'ait pas mis en évidence d'anomalies de l'anti-enrayeur, et en l'absence d'autres données, il ne peut être exclu que la correction du freinage par l'anti-enrayeur n'aurait éventuellement pas été adaptée alors que l'état d'adhérence du rail aurait dû lui permettre de rester dans sa limite de fonctionnement. Afin de préciser à l'avenir les performances et le niveau de sécurité apportés par l'anti-enrayage, le BEA-TT émet la recommandation suivante :

Recommandation R7 à destination d'Alstom :

Dans le cadre d'un nouveau marché d'acquisition de matériel roulant tramway, définir le niveau de sécurité associé à la fonction anti-enrayage et définir les objectifs de performance de freinage en adhérence dégradée, en s'inspirant des règles de l'art actuel.

Afin de garantir des objectifs de sécurité communs pour la conception des tramways circulant en France et compte tenu de la conception actuelle des anti-enrayeurs,

le BEA-TT invite également les autres constructeurs de matériel roulant tramway, dans le cadre d'un nouveau marché d'acquisition de rames, à définir le niveau de sécurité associé à la fonction anti-enrayage et définir les objectifs de performance de freinage en adhérence dégradée, en s'inspirant des règles de l'art actuel.

6 - Conclusions et recommandations

6.1 - Conclusions

Le lundi 2 décembre 2019 en début d'après-midi, l'exploitation de la ligne 1 du réseau de Montpellier est perturbée. En effet, un accident matériel s'est produit entre un tramway et une voiture à 13 h 44 à proximité de la station Universités des Sciences et des Lettres. Puis s'est ajouté un incident technique à 14 h 36 sur un autre tramway, en panne au niveau de la station Château d'Ô. Plusieurs tramways de la ligne 1 s'accumulent sur la voie entre les stations Hôpital Lapeyronie et Château d'Ô. Un de ces tramways est arrêté à la station Hôpital Lapeyronie. Derrière lui, à 15 h 06, le tramway n° 2012 s'arrête en ligne à une centaine de mètres avant ce tramway en station.

À 15 h 10, le tramway n° 2028 part de la station Universités des Sciences et des Lettres en direction de la station Hôpital Lapeyronie. Le long du Centre Hospitalier Universitaire Lapeyronie, le conducteur du tramway n° 2028 aperçoit le tramway n° 2012 devant lui. Il freine très légèrement, applique les patins magnétiques, puis deux secondes plus tard enclenche un freinage d'urgence via son manipulateur. Le tramway ralentit mais insuffisamment. Au début du freinage, le conducteur du tramway est en excès de vitesse par rapport aux limitations imposées mais lorsqu'il commande le freinage d'urgence, la distance devant lui est suffisante pour que dans une situation normale, il puisse s'arrêter avant l'arrière du tramway n° 2012. Le tramway n° 2028 heurte pourtant le tramway n° 2012 à une vitesse estimée, suite aux investigations menées, entre 15 et 20 km/h.

La collision fait 41 blessés légers parmi les quelque 200 passagers des deux tramways. Des dégâts matériels sont constatés sur les deux tramways.

Les performances de freinage du tramway n° 2028 associées à un phénomène d'enrayage ont été inférieures à celles qui étaient attendues, causant ainsi la collision.

La complexité de l'interaction véhicule-voie a exigé une analyse systémique pour rechercher les causes du rattrapage. Les investigations ont identifié plusieurs facteurs contributifs :

- le comportement de conduite du conducteur du tramway n° 2028, sollicitant fortement le matériel roulant, alors que les conditions d'exploitation étaient défavorables ;
- l'adhérence réduite en présence d'un rail non nettoyé récemment et probablement graissé ;
- un sablage probablement défaillant sur une partie des bogies moteurs d'extrémités du tramway.

Ces facteurs se sont cumulés, sans que l'on puisse, au vu de la complexité du cas, déterminer avec exactitude la contribution de chacun.

Néanmoins, pour expliquer l'enrayage profond constaté lors de l'accident, des facteurs additionnels sont nécessaires. Deux hypothèses complémentaires sont donc émises :

- un agglomérat graisseux serait tombé d'un tramway dans la zone de freinage ;
- la correction du freinage par l'anti-enrayeur n'aurait éventuellement pas été adaptée alors que l'état d'adhérence du rail aurait dû lui permettre de rester dans sa limite de fonctionnement.

L'enquête n'a pas permis d'exclure ou de valider l'une ou l'autre hypothèse, ni de valider un cumul de ces deux hypothèses.

Les orientations préventives visant à éviter le renouvellement d'un tel événement ont ainsi été recherchées dans les domaines suivants :

- le comportement de conduite du conducteur ;
- l'état de propreté de la voie, et sa maintenance ;
- le comportement au freinage et la maintenance du matériel roulant.

En conséquence, le BEA-TT formule des recommandations relatives à la formation et le suivi des conducteurs de tramways de TaM ; l'amélioration de la traçabilité des actions de maintenance, qu'il s'agisse de la voie ou des rames 401 ; et la fonction anti-enrayage pour les futurs matériels roulants tramway.

6.2 - Recommandations

Recommandation R1 à destination de TaM :

Améliorer la formation initiale, continue et le suivi régulier des conducteurs de tramways de Montpellier, sur les sujets suivants :

- la connaissance et la pratique du frein de sécurité par les conducteurs ;
- l'usage adéquat des patins magnétiques ;
- les risques d'une vitesse excessive ;
- la nécessité de la réception et de la prise en compte des messages du PCC dans l'anticipation des obstacles pouvant se présenter devant tout conducteur de tramways.

Recommandation R2 à destination de TaM :

Entériner dans la documentation de maintenance la fréquence de nettoyage du rail avec le renforcement en période automnale et hivernale telle que désormais prévu. De plus, tracer les interventions de nettoyage faites à la demande.

Recommandation R3 à destination de TaM :

Adapter les processus de maintenance du système de graissage de boudins, et mettre en œuvre la modification de ce système, afin d'éviter la présence de graisse sur la table de roulement et la formation d'agglomérats graisseux sur les bogies des tramways.

Recommandation R4 à destination de TaM :

Finaliser le processus de validation des évolutions des pas de maintenance sécuritaire engagé auprès du service de contrôle STRMTG.

Recommandation R5 à destination de TaM :

Poursuivre l'amélioration de la traçabilité de la maintenance préventive et corrective du matériel roulant, notamment concernant les tests journaliers du freinage d'urgence et du frein de sécurité, l'entretien des sablières et les actions menées sur les graisseurs de boudin.

Recommandation R6 à destination du STRMTG :

Réaliser un audit sur la maintenance des rames 401 et sur la maintenance du rail, du réseau de Montpellier, à l'issue des actions d'amélioration conduites par TaM suite à l'accident du 2 décembre 2019.

Recommandation R7 à destination d'Alstom :

Dans le cadre d'un nouveau marché d'acquisition de matériel roulant tramway, définir le niveau de sécurité associé à la fonction anti-enrayage et définir les objectifs de performance de freinage en adhérence dégradée, en s'inspirant des règles de l'art actuel.

De façon globale, le BEA-TT invite l'ensemble des autorités organisatrices de la mobilité de réseaux de tramway français à informer le STRMTG de toute détérioration de pas de maintenance sécuritaire, au vu de leur impact potentiel sur les démonstrations de sécurité du système.

Le BEA-TT invite TaM à procéder, immédiatement après tout signalement en lien avec la problématique d'adhérence par un conducteur, à la collecte des données de l'enregistreur de paramètres et de toute autre donnée utile du tramway, puis à inspecter l'état du rail et collecter tous les éléments de contexte nécessaire, afin d'analyser les réactions du tramway concerné et de capitaliser un retour d'expérience sur ces événements.

Le BEA-TT invite les autres constructeurs de matériel roulant tramway, dans le cadre d'un nouveau marché d'acquisition de rames, à définir le niveau de sécurité associé à la fonction anti-enrayage et définir les objectifs de performance de freinage en adhérence dégradée, en s'inspirant des règles de l'art.

ANNEXES

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête

Annexe 2 : Enregistrements de l'outil du PCC : localisation des tramways sur la ligne 1

Annexe 3 : Retranscription des appels entre le PCC et les conducteurs le 2 décembre 2019 à partir de 14 h 47

Annexe 4 : Données brutes de l'enregistreur de paramètres du tramway n° 2028

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête



Le Directeur

La Défense, le 3 décembre 2019

DÉCISION

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

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

Vu les circonstances de la collision de deux rames de tramway survenue le 2 décembre 2019 à Montpellier (34) ;

décide

Article 1 : Une enquête technique est ouverte en application des articles L. 1621-2 et R. 1621-22 du Code des transports concernant la collision par rattrapage de deux rames de tramway de la ligne 1 survenue le 2 décembre 2019 à Montpellier dans l'Hérault.

Jean PANHALEUX

Annexe 2 : Enregistrements de l'outil du PCC : localisation des tramways sur la ligne 1

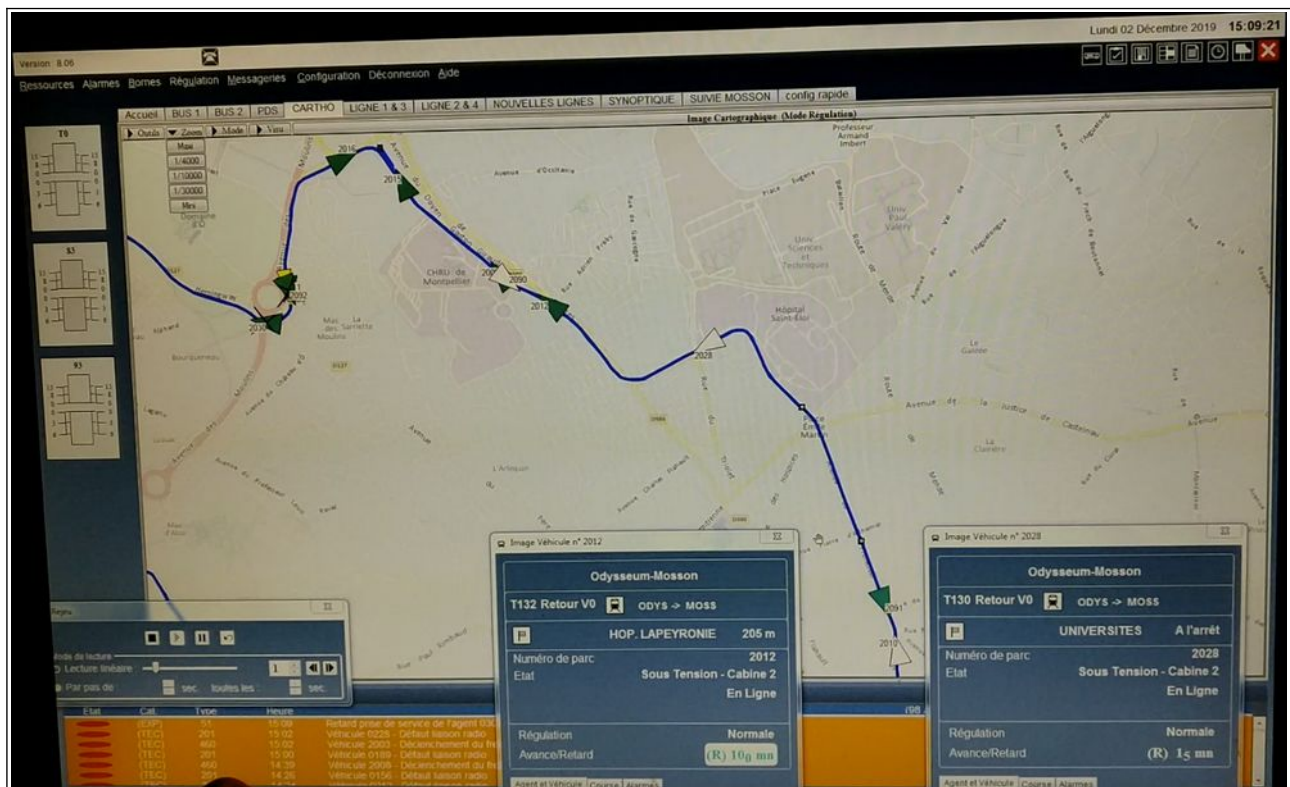


Figure 63 - Début de l'enregistrement : la rame 2028 arrive et s'arrête en station Universités

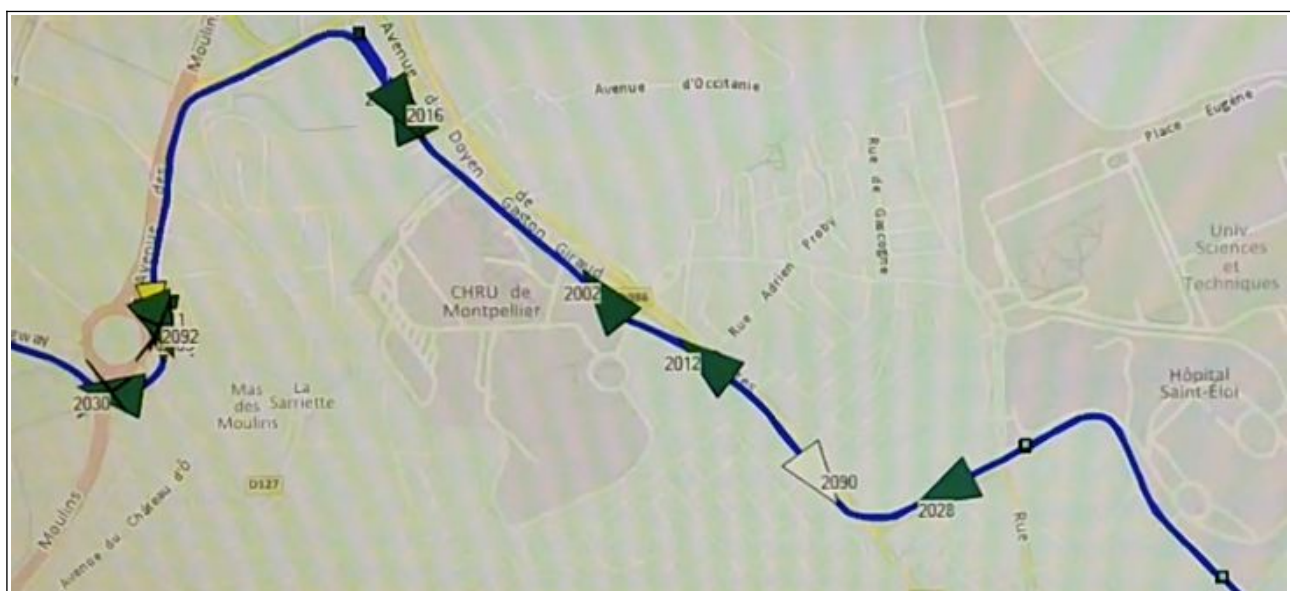


Figure 64 - La rame 2028 quitte la station Universités



Figure 65 - La rame 2028 traverse le carrefour route de Ganges et va croiser la rame 2090

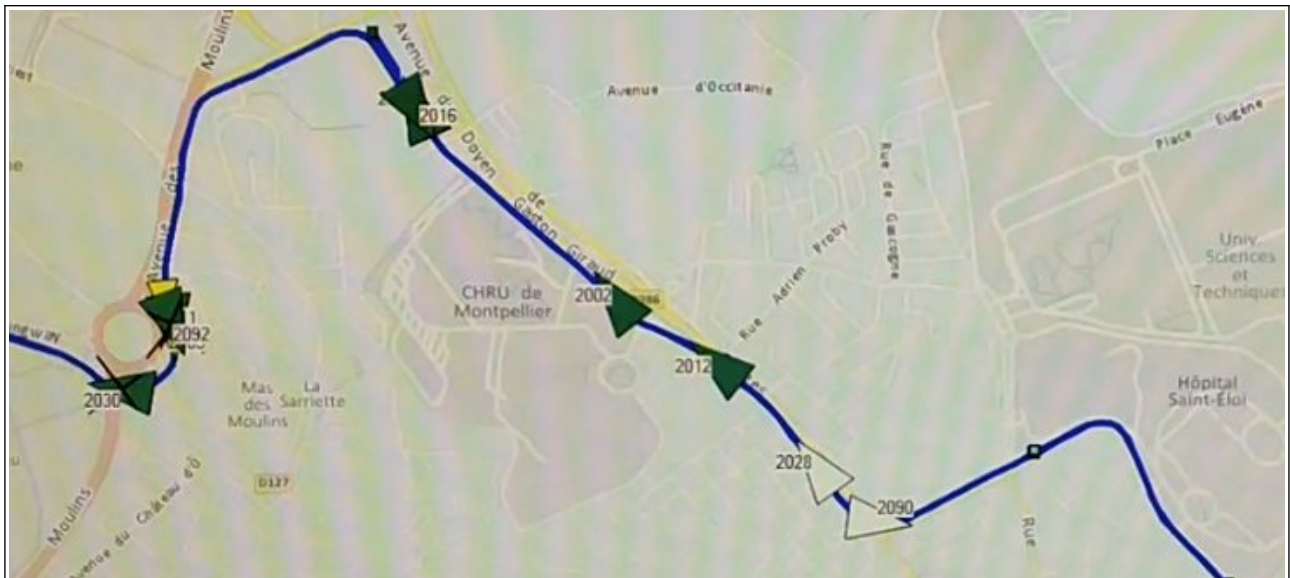


Figure 66 - La rame 2028 traverse le carrefour d'entrée/sortie de l'hôpital La Colombière

Annexe 3 : Retranscription des appels entre le PCC et les conducteurs le 2 décembre 2019 à partir de 14 h 47

Le 2 décembre 2019 à partir de 14 h 47, les échanges oraux ont été les suivants :

➤ **Appel général à 14h47:07 du PCC à tous les conducteurs sur la ligne 1 indiquant une perturbation sur V2 secteur Château d'Ô :**

« Appel à la ligne 1, appel général ligne 1 pour vous informer que nous avons une rame en panne sur V2 et en plein milieu du carrefour à Château d'Ô. Je répète : une rame en panne sur V2 au milieu de Château d'Ô donc les véhicules, les voitures euh la pelouse euh pour circuler donc prudence sur le secteur Château d'Ô, nous avons une rame en panne, donc euh sur V2. Merci message terminé. »

➤ **Appel général à 14h58:53 du PCC à tous les conducteurs sur la ligne 1 :**

« Appel général ligne 1, appel général ligne 1 : pour information du coup ben la rame est toujours en poussage avec la rame derrière euh donc il faut patienter euh je suis désolé les rames qui sont sur le secteur Occitanie-Château d'Ô, merci de patienter. Je répète : la rame 2030 qui est en panne sur Château d'Ô va être poussée par une autre rame donc du coup ben sur V2 c'est un peu compliqué euh donc patientez les rames qui sont sur le secteur Occitanie. Terminé. »

➤ **Appel provenant du conducteur de la rame n° 2028 au PCC :**

« - PC à la 28

- [mots inaudibles] très très grave. Je viens de taper la rame qui était devant moi à Occitanie euh Lapeyronie Lapeyronie ! [message fort, hâché, peu audible]

- Calme-toi je comprends rien parle lentement s'il te plaît

- La rame qui est devant moi à Lapeyronie. Est-ce que vous pouvez m'amener quelqu'un s'il vous plaît. J'ai tapé, j'ai tapé la rame qui est devant moi à Lapeyronie, à Lapeyronie, j'ai tapé la rame devant moi ! Vous pouvez m'envoyer quelqu'un s'il vous plaît ?

- Tu... tu as tapé la rame devant toi c'est ça ?

- J'ai tapé la rame qui est devant moi !

- Est-ce qu'il y a des blessés ? PC à la 28. PC à la 28 réponds-moi s'il te plaît, est-ce qu'il y a des blessés ?

- [mot inaudible] ! »

➤ **Appel du régulateur du PCC à l'attention du conducteur de la rame n° 2028 :**

« - PC à la 28

- Les pompiers envoyez-moi quelqu'un s'il vous plaît

- Oui oui ils arrivent ils arrivent

- Les gens sont descendus sur les rails, sur les rails

- Y a les véhicules qui arrivent sur place

- Y a des y a des blessés appelez les pompiers s'il vous plaît

- Oui on a appelé les pompiers ils sont au courant ils vont arriver

- Vous pouvez m'envoyer les pompiers s'il vous plaît y a des blessés dans la rame

- Oui oui pour info ils sont au courant les pompiers ils vont intervenir ils arrivent. »

Annexe 4 : Données brutes de l'enregistreur de paramètres du tramway n° 2028

Distance/km	Temps	V1	A1	M1	MC	M	ms c P ONML	K J I H G F E D
80,659	02.12.2019 - 15:10:12	54,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,660	02.12.2019 - 15:10:12	55,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,661	02.12.2019 - 15:10:12	55,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,662	02.12.2019 - 15:10:12	55,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,663	02.12.2019 - 15:10:12	55,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,664	02.12.2019 - 15:10:12	55,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,665	02.12.2019 - 15:10:12	55,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,666	02.12.2019 - 15:10:12	55,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,667	02.12.2019 - 15:10:12	55,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,668	02.12.2019 - 15:10:12	56,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,669	02.12.2019 - 15:10:12	56,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,670	02.12.2019 - 15:10:12	56,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,671	02.12.2019 - 15:10:12	56,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,672	02.12.2019 - 15:10:12	56,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,673	02.12.2019 - 15:10:13	56,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,674	02.12.2019 - 15:10:13	56,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,675	02.12.2019 - 15:10:13	56,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,676	02.12.2019 - 15:10:13	56,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,677	02.12.2019 - 15:10:13	56,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,678	02.12.2019 - 15:10:13	56,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,679	02.12.2019 - 15:10:13	57,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,680	02.12.2019 - 15:10:13	57,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,681	02.12.2019 - 15:10:13	57,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,682	02.12.2019 - 15:10:13	57,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,683	02.12.2019 - 15:10:13	57,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,684	02.12.2019 - 15:10:13	57,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,685	02.12.2019 - 15:10:13	57,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,686	02.12.2019 - 15:10:13	57,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,687	02.12.2019 - 15:10:13	57,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,688	02.12.2019 - 15:10:14	58,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,689	02.12.2019 - 15:10:14	58,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,690	02.12.2019 - 15:10:14	58,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,691	02.12.2019 - 15:10:14	58,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,692	02.12.2019 - 15:10:14	58,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,693	02.12.2019 - 15:10:14	58,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,694	02.12.2019 - 15:10:14	58,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,695	02.12.2019 - 15:10:14	58,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,696	02.12.2019 - 15:10:14	58,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,697	02.12.2019 - 15:10:14	58,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,698	02.12.2019 - 15:10:14	58,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,699	02.12.2019 - 15:10:14	58,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,700	02.12.2019 - 15:10:14	58,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,701	02.12.2019 - 15:10:14	57,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,702	02.12.2019 - 15:10:14	57,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,703	02.12.2019 - 15:10:14	57,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,704	02.12.2019 - 15:10:15	56,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,705	02.12.2019 - 15:10:15	56,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,706	02.12.2019 - 15:10:15	56,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----
80,707	02.12.2019 - 15:10:15	55,0	0,00	---	---	---	-----M--	---I H-----

début du freinage
de service

début application
manuelle des patins

maintien du freinage
de service

Figure 67 - Extrait n° 1 des données de l'enregistreur de paramètres du tramway n° 2028

Distance/km	Temps	V1	A1	M1	MC	M	ms c P O N M L	K J I H G F E D
80,708	02.12.2019 - 15:10:15	55,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,709	02.12.2019 - 15:10:15	54,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,710	02.12.2019 - 15:10:15	53,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,711	02.12.2019 - 15:10:15	50,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,712	02.12.2019 - 15:10:15	49,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,713	02.12.2019 - 15:10:15	45,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,714	02.12.2019 - 15:10:15	41,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,715	02.12.2019 - 15:10:15	39,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,716	02.12.2019 - 15:10:15	35,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,717	02.12.2019 - 15:10:16	32,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,718	02.12.2019 - 15:10:16	31,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,719	02.12.2019 - 15:10:16	31,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,720	02.12.2019 - 15:10:16	31,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,721	02.12.2019 - 15:10:16	32,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,722	02.12.2019 - 15:10:16	34,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,723	02.12.2019 - 15:10:16	35,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,724	02.12.2019 - 15:10:16	36,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,725	02.12.2019 - 15:10:16	36,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,726	02.12.2019 - 15:10:16	38,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,727	02.12.2019 - 15:10:17	39,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,728	02.12.2019 - 15:10:17	39,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,729	02.12.2019 - 15:10:17	38,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,730	02.12.2019 - 15:10:17	37,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,731	02.12.2019 - 15:10:17	36,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,732	02.12.2019 - 15:10:17	35,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,733	02.12.2019 - 15:10:17	36,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,734	02.12.2019 - 15:10:17	35,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,735	02.12.2019 - 15:10:17	34,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,736	02.12.2019 - 15:10:17	33,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,737	02.12.2019 - 15:10:18	32,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,738	02.12.2019 - 15:10:18	32,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,739	02.12.2019 - 15:10:18	30,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,740	02.12.2019 - 15:10:18	28,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,741	02.12.2019 - 15:10:18	28,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,742	02.12.2019 - 15:10:18	28,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,743	02.12.2019 - 15:10:18	26,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,744	02.12.2019 - 15:10:18	25,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,745	02.12.2019 - 15:10:19	25,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,746	02.12.2019 - 15:10:19	22,0	0,00	---	---	---	--- M ---	-- J ---
80,746	02.12.2019 - 15:10:19	---	---	---	---	---	--- c ---	-- J ---
80,747	02.12.2019 - 15:10:19	24,0	0,00	---	---	---	--- O ---	-- J ---
80,748	02.12.2019 - 15:10:19	25,0	0,00	---	---	---	--- O ---	-- J ---
80,749	02.12.2019 - 15:10:19	27,0	0,00	---	---	---	--- O ---	-- J ---
80,750	02.12.2019 - 15:10:19	28,0	0,00	---	---	---	--- O ---	-- J ---
80,751	02.12.2019 - 15:10:19	30,0	0,00	---	---	---	--- O ---	-- J ---
80,752	02.12.2019 - 15:10:20	32,0	0,00	---	---	---	--- O ---	-- J ---
80,753	02.12.2019 - 15:10:20	33,0	0,00	---	---	---	--- O ---	-- J ---
80,754	02.12.2019 - 15:10:20	33,0	0,00	---	---	---	--- O ---	-- J ---
80,755	02.12.2019 - 15:10:20	32,0	0,00	---	---	---	--- O ---	-- J ---

Figure 68 - Extrait n° 2 des données de l'enregistreur de paramètres du tramway n° 2028

Distance/km	Temps	V1	A1	M1	MC	M	ms c P O N M L	K J I H G F E D
80,756	02.12.2019 - 15:10:20	31,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,757	02.12.2019 - 15:10:20	30,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,758	02.12.2019 - 15:10:20	28,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,759	02.12.2019 - 15:10:20	26,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,760	02.12.2019 - 15:10:21	25,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,761	02.12.2019 - 15:10:21	25,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,762	02.12.2019 - 15:10:21	24,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,763	02.12.2019 - 15:10:21	24,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,764	02.12.2019 - 15:10:21	25,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,765	02.12.2019 - 15:10:21	25,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,766	02.12.2019 - 15:10:21	25,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,767	02.12.2019 - 15:10:22	25,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,768	02.12.2019 - 15:10:22	24,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,769	02.12.2019 - 15:10:22	23,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,770	02.12.2019 - 15:10:22	22,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,771	02.12.2019 - 15:10:22	21,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,772	02.12.2019 - 15:10:22	21,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,773	02.12.2019 - 15:10:23	19,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,774	02.12.2019 - 15:10:23	18,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,775	02.12.2019 - 15:10:23	18,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,776	02.12.2019 - 15:10:23	16,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,777	02.12.2019 - 15:10:23	16,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,778	02.12.2019 - 15:10:24	15,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,779	02.12.2019 - 15:10:24	17,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,780	02.12.2019 - 15:10:24	15,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,781	02.12.2019 - 15:10:24	17,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,782	02.12.2019 - 15:10:25	17,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,783	02.12.2019 - 15:10:25	12,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,784	02.12.2019 - 15:10:25	10,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,785	02.12.2019 - 15:10:25	10,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,786	02.12.2019 - 15:10:26	10,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,787	02.12.2019 - 15:10:26	5,0	0,00	---	---	---	--- O - M -	-- J --- D
80,787	02.12.2019 - 15:10:29	0,0	---	---	---	---	--- s ---	-- J --- D
80,787	02.12.2019 - 15:37:08	---	---	---	---	---	--- c ---	-- J --- E
80,787	02.12.2019 - 17:46:39	---	---	---	0	237	m ---	-- J --- E
80,787	02.12.2019 - 17:46:39	---	---	---	0	220	m ---	-- J --- E
80,787	02.12.2019 - 17:46:46	---	---	---	0	227	m ---	-- J --- E
80,787	02.12.2019 - 17:46:52	---	---	---	0	228	m ---	-- J --- E
80,787	02.12.2019 - 17:49:15	---	---	---	---	---	--- c ---	-- J --- G
80,787	02.12.2019 - 17:49:20	---	---	---	---	---	--- c ---	-- J --- D
80,787	02.12.2019 - 17:50:29	---	---	---	0	237	m ---	-- J --- D
80,787	02.12.2019 - 17:50:29	---	---	---	0	220	m ---	-- J --- D
80,787	02.12.2019 - 17:50:37	---	---	---	0	227	m ---	-- J --- D
80,787	02.12.2019 - 17:50:37	---	---	---	0	228	m ---	-- J --- D
80,787	02.12.2019 - 17:55:23	---	---	---	0	237	m ---	-- J --- D
80,787	02.12.2019 - 17:55:24	---	---	---	0	220	m ---	-- J --- D
80,787	02.12.2019 - 17:55:31	---	---	---	0	227	m ---	-- J --- D
80,787	02.12.2019 - 17:55:31	---	---	---	0	228	m ---	-- J --- D
80,787	02.12.2019 - 17:59:24	---	---	---	0	237	m ---	-- J --- D

Figure 69 - Extrait n° 3 des données de l'enregistreur de paramètres du tramway n° 2028



Bureau d'Enquêtes sur les Accidents de Transport Terrestre



Grande Arche - Paroi Sud
92055 La Défense cedex

Téléphone : 01 40 81 21 83

bea-tt@developpement-durable.gouv.fr

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

