

**RAPPORT
D'ENQUÊTE TECHNIQUE
sur la chute mortelle
d'un voyageur
dans un tramway
lors d'un freinage d'urgence
le 3 septembre 2012
à Montpellier (34)**

Avril 2016



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE



Ministère
de l'Environnement,
de l'Énergie
et de la Mer

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

Affaire n° BEATT-2012-0013

**Rapport d'enquête technique
sur la chute mortelle d'un voyageur
dans un tramway lors d'un freinage d'urgence
le 3 septembre 2012 à Montpellier (34)**

Bordereau documentaire

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

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

Titre du document : Rapport d'enquête technique sur la chute mortelle d'un voyageur dans un tramway lors d'un freinage d'urgence le 3 septembre 2012 à Montpellier (34)

N° ISRN : EQ-BEAT--16-5--FR

Proposition de mots-clés : transport guidé, tramway, chute, freinage d'urgence

Avertissement

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

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

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

SOMMAIRE

GLOSSAIRE.....	9
RÉSUMÉ.....	11
1 - CONSTATS IMMÉDIATS ET ENGAGEMENT DE L'ENQUÊTE.....	13
1.1 - Les circonstances de l'accident.....	13
1.2 - L'engagement et l'organisation de l'enquête.....	13
2 - CONTEXTE DE L'ACCIDENT.....	15
2.1 - Le réseau de tramway de Montpellier.....	15
2.1.1 -Données générales.....	15
2.1.2 -La section de ligne comprise entre les stations « Comédie » et « Corum ».....	16
2.2 - Les rames du tramway de Montpellier.....	16
2.2.1 -Les principales caractéristiques.....	16
2.2.2 -Les commandes de freinage d'urgence du modèle Citadis 402.....	17
2.2.3 -La « veille automatique à contrôle de maintien d'appui » (VACMA).....	18
2.3 - Quelques notions sur le déséquilibre des passagers.....	18
2.4 - La norme NF EN 13452 <i>relative aux systèmes de freinage des transports publics urbains et suburbains</i>	19
3 - COMPTE RENDU DES INVESTIGATIONS EFFECTUÉES.....	21
3.1 - Les résumés des témoignages.....	21
3.1.1 -Le témoignage d'une passagère ayant portée assistance à la victime.....	21
3.1.2 -Le témoignage du conducteur de la rame.....	21
3.2 - L'examen des enregistreurs techniques.....	22
3.2.1 -Les enregistrements des caméras intérieures de la rame.....	22
3.2.2 -Les enregistrements des caméras extérieures de la rame.....	22
3.2.3 -La bande tachymétrique de la rame.....	23
3.2.4 -Les enregistrements des communications du PCC.....	25
3.3 - L'examen des éléments de traçabilité du matériel et de l'exploitation.....	25
3.3.1 -La rame 2095 impliquée dans les événements.....	25
3.3.2 -La portion de voie entre les stations « Comédie » et « Corum ».....	26
3.3.3 -Le conducteur de la rame 2095 et le régulateur en poste au PCC.....	26
3.3.4 -Les consignes à destination des régulateurs.....	26
3.4 - Les investigations menées sur la VACMA.....	27
3.4.1 -L'examen de la VACMA de la rame 2095.....	27
3.4.2 -L'utilisation de la VACMA par le conducteur impliqué.....	27
3.4.3 -Le panorama des dispositifs de veille existant sur les réseaux de tramway.....	28
3.5 - Les investigations menées sur le freinage d'urgence.....	29
3.5.1 -Les choix techniques opérés par Alstom concernant le freinage d'urgence.....	29

3.5.2 -Les performances du freinage d'urgence à la réception des rames.....	30
3.5.3 -Les essais de freinage et de déséquilibre réalisés après l'accident.....	31
3.5.4 -L'étude de l'IFSTTAR sur l'influence du jerk sur l'équilibre des passagers.....	32
3.6 - Les investigations menées sur les dispositifs de maintien.....	33
3.7 - Les retours d'expériences.....	34
3.7.1 -Les statistiques des freinages d'urgence à Montpellier en 2012.....	34
3.7.2 -Les statistiques nationales des victimes de freinages d'urgence.....	35
3.8 - Les suites données à l'accident par l'exploitant.....	36
4 - ANALYSE DU DÉROULEMENT DE L'ACCIDENT ET DES SECOURS.....	37
4.1 - La situation avant l'accident.....	37
4.2 - Le déroulement de l'accident.....	37
4.3 - La gestion de l'accident et l'intervention des secours.....	37
5 - ANALYSE DES CAUSES ET FACTEURS ASSOCIÉS, ORIENTATIONS PRÉVENTIVES.....	39
5.1 - Le schéma des causes et des facteurs associés.....	39
5.2 - L'ergonomie du dispositif de veille.....	40
5.3 - L'adaptation des performances du freinage d'urgence.....	41
5.4 - La gestion de la situation accidentelle par l'exploitant.....	42
6 - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	43
6.1 - Les causes de l'accident.....	43
6.2 - Les recommandations.....	43
ANNEXES.....	45
Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête.....	47

Glossaire

- **AOT** : Autorité Organisatrice des Transports
- **DLC** : Dossier de Livraison du Constructeur
- **EOQA** : Expert ou Organisme Qualifié Agréé
- **FMS** : Freinage Maximal de Service
- **FU** : Freinage d'Urgence
- **GART** : Groupement des Autorités Responsables de Transport
- **IFSTTAR** : Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux
- **PCC** : Poste de Contrôle Centralisé
- **SAEM** : Société Anonyme d'Economie Mixte
- **SAM** : Spécification d'Admission du Matériel
- **SAMU** : Service d'Aide Médicale Urgente
- **STRMTG** : Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés
- **STI** : Spécification Technique d'Interopérabilité
- **TaM** : Transports alternatifs de Montpellier Méditerranée Métropole
- **UTP** : Union des Transporteurs Publics et ferroviaires
- **VACMA** : Veille Automatique à Contrôle de Maintien d'Appui

Résumé

Le 3 septembre 2012 à 11 h 14, la rame 2095 circulant sur la ligne 2 du tramway de Montpellier déclenche un freinage d'urgence entre les stations « *Comédie* » et « *Corum* », qui provoque la chute d'un passager de 73 ans qui se déplaçait à l'intérieur de la rame et dont la tête heurte violemment le bas d'une barre de maintien. Il décède malgré les tentatives de réanimation réalisées d'abord par des voyageurs, puis par les services de secours après que la rame a été amenée à la station « *Beaux-Arts* ».

La chute de la victime est la conséquence directe du freinage d'urgence déclenché par le dispositif de veille automatique de type « VACMA » que le conducteur doit périodiquement actionner pour signifier qu'il n'est ni victime d'un malaise, ni décédé, et qu'il n'a pas activé dans les délais prévus.

Trois facteurs ont contribué à cet accident :

- la conception de la rame, qui ne module pas ses performances de freinage d'urgence en fonction du dispositif qui le déclenche, et qui applique un freinage brutal générant un très fort risque de chute lors d'un défaut d'actionnement du dispositif de veille, bien que, dans un tel cas, il n'y ait généralement pas de danger avéré et imminent de collision avec un tiers ;
- l'ergonomie de l'alarme du dispositif de veille, dont le son est moins fort et la tonalité plus feutrée que celle des autres matériels que le conducteur avait l'habitude de conduire, et dont le temps de réaction qu'elle laisse au conducteur avant de déclencher un freinage d'urgence est court ;
- l'attention du conducteur mobilisée par deux piétons cheminant sur la plate-forme, qui est vraisemblablement à l'origine du défaut d'actionnement dans les délais du dispositif de « VACMA », dont la conception et les réglages sur les tramways français demandent une manipulation fréquente.

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

- le dispositif de veille et l'ergonomie de son alarme ;
- l'adaptation des performances du freinage d'urgence des rames de tramway ;
- la gestion des situations accidentelles.

Pour mémoire, le dispositif de « VACMA » équipant la majorité des rames de tramway français fait actuellement l'objet d'analyses concernant les risques qu'il est susceptible de générer sur la santé des conducteurs. Cet aspect ne relève pas des compétences du BEA-TT et n'a donc pas été pris en compte dans le présent rapport d'enquête technique.

1 - Constats immédiats et engagement de l'enquête

1.1 - Les circonstances de l'accident

Le 3 septembre 2012 à 11 h 14, la rame 2095 circulant sur la ligne 2 du tramway de Montpellier déclenche un freinage d'urgence entre les stations « *Comédie* » et « *Corum* », qui provoque la chute d'un passager de 73 ans qui se déplaçait à l'intérieur et dont la tête heurte violemment l'embase d'une barre de maintien. Il décède malgré les tentatives de réanimation réalisées d'abord par des voyageurs, puis par les services de secours après que la rame a été amenée à la station « *Beaux-Arts* ».

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

Au vu des circonstances de cet accident, le directeur du bureau d'enquêtes sur les accidents de transport terrestre (BEA-TT) a ouvert, le 14 septembre 2012, une enquête technique en application des articles L. 1621-1 à 1622-2 du code des transports.

L'enquêteur technique du BEA-TT s'est rendu sur place. Il a rencontré le conducteur de la rame ainsi que des représentants de l'exploitant du tramway de l'agglomération montpelliéraine, la TaM. Il a également rencontré le constructeur Alstom, l'expert ou organisme qualifié agréé (EOQA) Certifer ayant évalué la rame avant sa mise en service, et le service technique des remontées mécaniques et des transports guidés (STRMTG).

Il a eu communication de l'ensemble des pièces et documents nécessaires à son analyse, notamment le dossier de l'enquête de flagrance menée par la direction départementale de la sécurité publique de l'Hérault et le rapport d'accident établi par l'exploitant.

Il a également participé à des essais visant à mesurer, dans différentes configurations, les performances du freinage d'urgence d'une rame du même modèle que celle impliquée dans l'accident et à en évaluer les effets sur l'équilibre des passagers.

2 - Contexte de l'accident

2.1 - Le réseau de tramway de Montpellier

2.1.1 - Données générales

Le réseau de tramway de l'agglomération montpelliéraine comprend quatre lignes desservant au total 84 stations réparties sur quelque 56 kilomètres.

L'autorité organisatrice des transports (AOT) en est la métropole « *Montpellier Méditerranée Métropole* » regroupant 31 communes. Elle en a confié l'exploitation, par une délégation de service public couvrant la période 2010-2017, au groupement momentané d'entreprises constitué de la société anonyme d'économie mixte (SAEM) « *Transports alternatifs de Montpellier Méditerranée Métropole* » (TaM) et de la société Transdev-Montpellier, filiale à 100 % du groupe Transdev¹.

En 2014, l'exploitant a recensé 61 millions de voyages effectués pour 5,4 millions de kilomètres parcourus par les rames.



Fig. 1 : plan du réseau et localisation de l'accident

1 Dans la suite du rapport, dans un souci de simplification, ce groupement sera désigné « l'exploitant TaM ».

2.1.2 - La section de ligne comprise entre les stations « Comédie » et « Corum »

La section de ligne comprise entre les stations « Comédie » et « Corum » est un tronç commun parcouru à la fois par les rames des lignes 1 et 2.

Sur les 75 premiers mètres du parcours après la station « Comédie », la plate-forme du tramway est accessible aux piétons. Elle est simplement délimitée du reste de l'espace public par de discrets « clous » insérés régulièrement dans le revêtement, par ailleurs identique à celui de la place de la Comédie. À une quinzaine de mètres des quais de la station, la largeur laissée aux piétons, quand une rame circule, est faible, de l'ordre d'un mètre, contrainte par la présence de la pergola d'une terrasse de café.

La plate-forme plonge ensuite dans une tranchée dont l'accès est interdit aux piétons par des panneaux de signalisation avant d'en ressortir pour rejoindre la station « Corum ». À l'endroit où le freinage d'urgence s'est déclenché, la pente y est très faible.

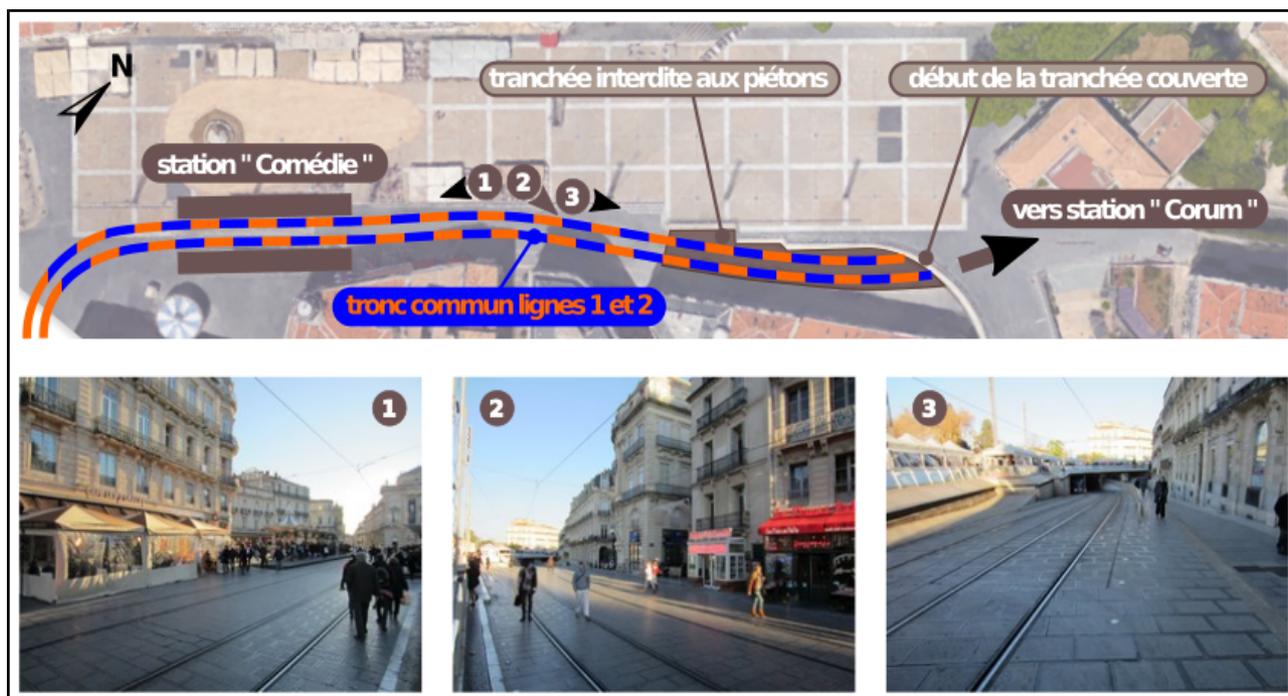


Fig. 2 : plan et photos de la zone de l'accident

2.2 - Les rames du tramway de Montpellier

2.2.1 - Les principales caractéristiques

Le parc de véhicules utilisés pour l'exploitation du réseau compte 87 rames du constructeur Alstom se répartissant en :

- 30 rames du modèle Citadis 401 (les 2 premiers chiffres de la numérotation correspondent sensiblement à la longueur de la rame, le deuxième à la génération du matériel), mises en service entre 1999 et 2002, circulant sur la ligne 1 ;
- 27 rames du modèle Citadis 302, mises en service en 2006 et 2007, circulant sur les lignes 2 et 4 ;
- 30 rames du modèle Citadis 402, mises en service entre 2012 et 2014, circulant sur les lignes 2, 3 et 4.

La rame impliquée dans l'accident est de type Citadis 402. Elle présente une longueur de 43,7 m, une largeur de 2,65 m et une masse à vide de 57,2 t. Elle se compose de 7 caisses articulées, portées par 2 bogies moteurs situés sous les caisses d'extrémité et par 2 bogies porteur.

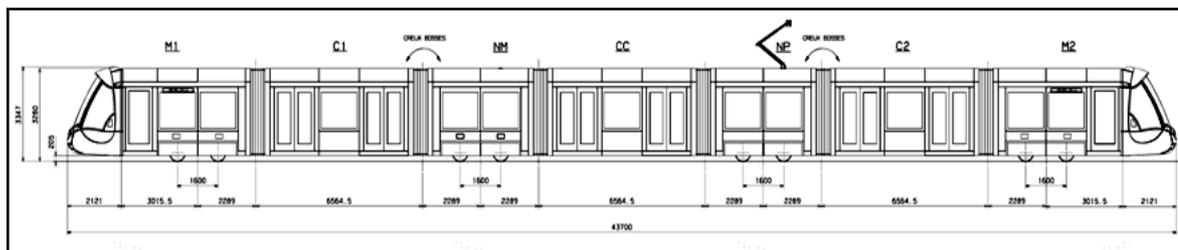


Fig. 3 : synoptique d'une rame Citadis 402 de Montpellier



Fig 4 : rame Citadis 402 de Montpellier (crédit photo : « ange34 » sur internet)

2.2.2 - Les commandes de freinage d'urgence du modèle Citadis 402

Le conducteur module l'effort de freinage en déplaçant vers lui le manipulateur de traction-freinage. Le conducteur le tire dans sa position extrême, nettement différenciable par un cran spécifique en fin de course, pour actionner le freinage d'urgence. Ce freinage est alors dit « irréversible », dans la mesure où on ne peut l'interrompre avant l'arrêt complet de la rame.

Le conducteur dispose également d'un bouton coup de poing, qui actionne un freinage également irréversible.

Plusieurs sécurités peuvent déclencher un freinage d'urgence. Il s'agit du dispositif de veille automatique détaillé au paragraphe ci-dessous, du dispositif d'anti-dérive empêchant la rame de reculer inopinément, du ramasse-corps, du système de fermeture des portes en cas de détection d'une anomalie, des alarmes passagers dans certaines conditions, notamment lorsque la rame quitte un quai².

² Ces sécurités déclenchent un freinage équivalent à celui que peut actionner le conducteur par l'intermédiaire du manipulateur de traction-freinage (il en a les mêmes performances, il met en jeu les mêmes dispositifs et il est irréversible), à l'exception de l'alarme passagers lorsque la rame quitte un quai, qui provoque un freinage d'urgence sans faire intervenir les patins magnétiques.

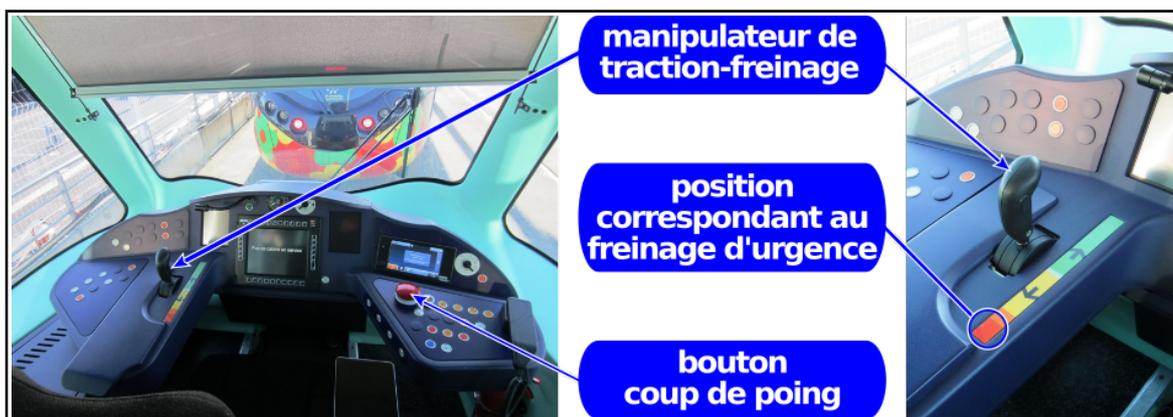


Fig. 5 : commandes de freinage d'urgence à disposition du conducteur

2.2.3 - La « veille automatique à contrôle de maintien d'appui » (VACMA)

Les rames françaises de tramway sont équipées d'un dispositif appelé « *veille* », parfois « *vigilance conducteur* » ou « *homme mort* », dont l'objectif est de les arrêter en cas de malaise ou de décès de leur conducteur.

Les rames de tramway Citadis disposent d'une veille dite « *veille automatique à contrôle de maintien d'appui* » (VACMA) qui, sur le réseau de Montpellier, fonctionne de la sorte : lorsque la rame roule, le conducteur doit périodiquement actionner, à sa convenance, un bouton implanté sur le manipulateur de traction-freinage ou une pédale. S'il maintient appuyé l'un ou l'autre de ces dispositifs pendant plus de 10 secondes, ou s'il les relâche pendant plus de 3 secondes, une alarme sonore résonne. S'il ne réagit pas à cette alarme au cours des 2 secondes suivantes, un freinage d'urgence irréversible se déclenche.

À l'époque de livraison des premières rames Citadis 402 de Montpellier, ces dispositifs ne faisaient pas l'objet de normalisation technique. Ils sont à ce jour abordés dans deux guides, l'un édité par le STRMTG pour les aspects de sécurité, l'autre publié conjointement par le Groupement des autorités responsables de transport (GART) et l'Union des transporteurs publics et ferroviaires (UTP) pour les autres aspects³. Ce dernier a vocation à évoluer prochainement en fonction des conclusions d'un groupe de travail piloté par l'UTP dénommé « fonction de veille », auquel participent notamment les constructeurs.

2.3 - Quelques notions sur le déséquilibre des passagers

Lorsque la rame roule à vitesse constante, sa décélération est nulle, et le voyageur n'en ressent théoriquement aucun effet sur son corps, à l'identique d'une rame immobile.

Lorsque la rame est en phase de décélération constante, le voyageur debout dans le sens de la marche est penché en avant d'un angle d'autant plus important que la décélération est élevée. Il est cependant en équilibre si la décélération n'est pas excessive.

C'est le passage d'une décélération nulle à cette décélération constante qui est la principale sources du déséquilibre des voyageurs. L'ampleur de la variation de décélération, rapportée à la rapidité à laquelle elle s'effectue, est mesurée par le jerk, en m/s^3 , qui correspond mathématiquement à la dérivée de la décélération.

³ Le guide technique du STRMTG s'intitule « Sécurité des postes de conduite des tramways » et celui du GART et de l'UTP « Confort des postes de conduite des tramways ». Il n'y figure pas, à ce jour, d'exigences sur les temporisations de maintien, de relâchement et de déclenchement d'alarme de la veille de type VACMA.

Pour rattraper le déséquilibre créé par cette variation de la décélération, un voyageur debout dans le sens de la marche adoptera instinctivement une ou plusieurs des actions suivantes : il transférera le poids de son corps du talon vers ses orteils, basculera son bassin vers l'arrière, ou effectuera un pas en avant, voire plusieurs.

2.4 - La norme NF EN 13452 relative aux systèmes de freinage des transports publics urbains et suburbains

La norme NF EN 13452 relative aux systèmes de freinage des transports publics urbains et suburbains, éditée en décembre 2003, spécifie les exigences et les performances des systèmes de freinage des transports publics urbains et suburbains. Elle s'applique notamment aux tramways et véhicules ferroviaires légers⁴, ainsi qu'aux métros sur roues fer et sur pneumatiques.

Elle précise notamment que le système de freinage d'urgence doit être « capable d'arrêter le train sur une distance définie en fonction de la vitesse avec des niveaux de décélération et de jerk compatible avec la sécurité des passagers et du personnel ».

Elle distingue pour cela quatre modes de freinage d'urgence selon l'origine de leur déclenchement :

- l'« urgence 1 », déclenchée par la « vigilance conducteur », en l'occurrence le dispositif de VACMA sur les rames Citadis, ou par le pilotage automatique ;
- l'« urgence 2 », déclenchée par une alarme passagers ;
- l'« urgence 3 », déclenchée par le conducteur quand il positionne son manipulateur à sa position extrême ou par un automatisme de sécurité d'arrêt des trains ;
- l'« urgence 4 », déclenchée par une commande séparée du manipulateur de traction-freinage.

La norme affecte à chacune de ces catégories des performances de freinage minimales et maximales portant sur :

- le temps de réponse équivalent t_e , qui traduit le temps que met le freinage à s'établir une fois la commande passée⁵ ;
- la décélération équivalente a_e en m/s^2 , qui s'apparente à une décélération « moyenne »⁶ ;
- la décélération instantanée maximale en m/s^2 ;
- le jerk en m/s^3 , tel que défini au paragraphe 2.3 ci-avant⁷.

Le tableau ci-après reprend les performances de freinage exigées pour les tramways et les véhicules ferroviaires légers³ :

4 Ce sont les véhicules ferroviaires destinés à circuler sur la voie publique.

5 Le temps de réponse équivalent se calcule de la sorte : $t_e = (t_{10} + t_{90})/2$, avec t_{10} représentant le temps mis pour atteindre 10 % de la décélération établie et t_{90} le temps mis pour atteindre 90 % de cette décélération.

6 Le terme « moyenne » est à comprendre au sens trivial, la décélération équivalente se calcule en fait de la sorte : $a_e = v_0^2 / 2(s - v_0 t_e)$, avec v_0 la vitesse initiale, s la distance d'arrêt, t_e le temps de réponse équivalent défini à la note ci-avant.

7 La norme précise qu'il s'agit d'une valeur moyenne durant le « temps de montée » de la décélération, c'est-à-dire lorsque la décélération est entre 10 % et 90 % de sa valeur établie. Le constructeur Alstom le calcule ainsi : $j = (a_{90} - a_{10}) / (t_{90} - t_{10})$ avec a_{90} représentant 90 % de la décélération établie et a_{10} en représentant 10 %.

	Mode « urgence 1 » déclenché par le dispositif de veille	Mode « urgence 2 » déclenché par une alarme passagers	Mode « urgence 3 » déclenché par le manipulateur de traction-freinage en position extrême	Mode « urgence 4 » déclenché par une commande séparée
Décélération équivalente « a_e »	$a_e \geq 1,2 \text{ m/s}^2$	$a_e \geq 1,2 \text{ m/s}^2$	$a_e \geq 2,8 \text{ m/s}^2$	$a_e \geq 2,8 \text{ m/s}^2$
Temps de réponse équivalent « t_e »	$T_e \leq 1,5 \text{ s}$	$t_e \leq 2 \text{ s}$	$t_e \leq 0,85 \text{ s}$	$t_e \leq 0,85 \text{ s}$
Décélération instantanée maximale	$a \leq 2,5 \text{ m/s}^2$	$a \leq 2,5 \text{ m/s}^2$	$a \leq 5 \text{ m/s}^2$	$a \leq 4 \text{ m/s}^2$
Jerk « j » (moyenne)	$j \leq 4 \text{ m/s}^3$	$j \leq 4 \text{ m/s}^3$	$j \leq 8 \text{ m/s}^3$	$j \leq 8 \text{ m/s}^3$

Fig. 6 : principales performances de freinage demandées par la norme NF EN 13452

Ainsi, afin d'assurer la sécurité des passagers, les performances exigées pour les freinages en modes « urgence 1 » et « urgence 2 », pour lesquels il n'y a pas de danger avéré et imminent devant la rame, sont sensiblement deux fois moindres que celles des freinages en mode « urgence 3 » ou « urgence 4 », où il s'agit prioritairement d'éviter le heurt d'un obstacle à l'extérieur du tramway.

La norme n'interdit cependant pas de regrouper plusieurs de ces modes de freinage. Pour la catégorie des tramways et des véhicules ferroviaires légers, les exigences mentionnées au tableau ci-dessus sont telles qu'on ne peut pas regrouper les modes « urgence 1 » et « urgence 2 » avec les modes « urgence 3 » et « urgence 4 » en les respectant toutes. Dans un tel cas, cela reviendrait en effet à avoir une décélération équivalente supérieure à $2,8 \text{ m/s}^2$ et une décélération instantanée inférieure ou égale à $2,5 \text{ m/s}^2$, ce qui est physiquement impossible⁸.

Par ailleurs, la réglementation actuelle précise que tout nouveau système de transport public guidé doit être conçu et réalisé de telle sorte que son niveau global de sécurité soit au moins équivalent à celui des systèmes existants assurant des services comparables⁹. Elle ne rend donc pas obligatoire l'application d'une liste donnée de normes, mais demande cependant que chaque AOT précise, dans les dossiers de sécurité qu'elle transmet en préalable à la mise en service d'un nouveau système, celles qu'elle prend en compte¹⁰. La norme NF EN 13452 précitée, traitant d'un sous-système de sécurité aussi important que le freinage et reflétant un consensus technique européen, est quasi-systématiquement intégrée au référentiel technique de sécurité de tout nouveau projet.

8 Pour toutes les autres catégories de matériel roulant auxquelles s'applique la norme, qui circulent dans un environnement qui n'est pas ouvert au tiers, il existe toujours une plage de valeurs qui permet de respecter simultanément tous seuils de performance exigés pour les quatre modes d'« urgence ». Il est donc possible, pour ces matériels-là, d'avoir une unique commande de freinage d'urgence, qui ne module pas les performances en fonction du dispositif qui le déclenche.

9 Article 5 du décret n° 2003-425 du 9 mai 2003 *relatif à la sécurité des transports publics guidés*.

10 Arrêté du 23 mai 2003 relatif aux dossiers de sécurité des systèmes de transport publics guidés urbains.

3 - Compte rendu des investigations effectuées

3.1 - Les résumés des témoignages

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

3.1.1 - *Le témoignage d'une passagère ayant porté assistance à la victime*

Très peu de temps après que la rame est repartie de la station « *Comédie* », une passagère a ressenti un brusque freinage et a vu une voyageuse chuter, puis se relever. Elle a alors pris conscience d'un voyageur au sol et, étant infirmière, s'est approchée et a constaté qu'il saignait abondamment de la tête et n'avait plus de pouls.

Aidée par une seconde voyageuse, avec les conseils téléphoniques des pompiers qu'une troisième voyageuse relayait, elle lui a prodigué un massage cardiaque.

Elle a constaté que la rame s'est arrêté un temps à la station « *Corum* », avant de repartir et de stopper à la station « *Beaux-Arts* », où les secours sont intervenus très peu de temps après.

3.1.2 - *Le témoignage du conducteur de la rame*

Après s'être arrêté à la station « *Comédie* » pour y effectuer son échange voyageurs, le conducteur de la rame redémarre doucement. Constatant que deux jeunes cheminent devant sa rame, dont l'un engage le gabarit du tramway, il actionne son gong afin qu'ils s'éloignent de la plate-forme. Il passe alors devant eux puis, très peu de temps après, la rame freine brusquement. Il met un léger temps pour comprendre qu'il s'agit d'un freinage d'urgence déclenché par son dispositif de VACMA.

Il redémarre et, alors que sa rame approche de la tranchée couverte passant sous la place de la Comédie, un signal lui indique qu'un voyageur a tiré une poignée d'alarme¹¹ pendant qu'un autre voyageur frappe à sa porte de communication : il est informé qu'un passager a fait une chute et saigne abondamment. Il arrête sa rame et en avise immédiatement le PCC, en lui demandant de faire intervenir les pompiers. Le PCC lui intime de continuer jusqu'à la station « *Beaux-Arts* », située deux arrêts plus loin.

Arrivé à la station « *Corum* », il se rend au niveau de la victime, constate que deux voyageuses lui prodiguent un massage cardiaque, et retourne à sa cabine informer le PCC de la gravité et de l'urgence de la situation. Celui-ci confirme qu'il a demandé l'intervention des pompiers à la station « *Beaux-Arts* » suivante et lui demande de repartir.

Arrivé à cette station, il en informe le PCC, puis se rend à nouveau au niveau de la victime pour y attendre les secours, qui arriveront peu de temps après.

11 Sauf lorsque la rame dégage le quai, l'actionnement d'une poignée d'alarme ne déclenche pas un freinage d'urgence, elle active une alarme dans la cabine de conduite et met en communication phonique le passager et le conducteur.

3.2 - L'examen des enregistreurs techniques

3.2.1 - Les enregistrements des caméras intérieures de la rame

L'examen des enregistrements des caméras placées à l'intérieur de la rame montre que la rame s'est sensiblement vidée à la station « Comédie », et après son départ, plusieurs places assises étaient disponibles.

Lors du démarrage de la rame à cette station, la victime, venant de l'arrière, marchait vers l'avant, sans précipitation, en se tenant aux différentes barres de maintien jalonnant son déplacement. Il n'est pas possible de distinguer si elle est montée à la station « Comédie » ou si elle était déjà présente à l'intérieur de la rame.

Dans l'instant précédant immédiatement le freinage d'urgence, sa main gauche avait juste lâché la barre de maintien au centre d'un des espaces de montée/descente, et sa main droite s'apprêtait à saisir la barre de maintien horizontale située au-dessus de l'un des sièges.

Le déclenchement du freinage d'urgence a projeté son buste vers l'avant. Sa main droite a alors manqué la barre de maintien qu'elle s'apprêtait à saisir. Elle a tenté sans succès de retrouver son équilibre en faisant deux pas vers l'avant, qui ne l'ont malheureusement pas empêché de chuter. À la fin de sa chute, sa tête a heurté l'embase de la barre de maintien au centre de l'espace de montée/descente suivant. La rame n'avait alors pas encore achevé de s'immobiliser.

Parmi les autres passagers visibles sur la vidéo, deux seulement voyageaient debout :

- l'un d'eux était installé contre un appui ischiatique, son corps de profil par rapport au sens déplacement de la rame, sa main tenant une barre de maintien. Lors du freinage, il a gardé son équilibre en se retenant plus fermement à cette barre ;
- l'autre était au centre d'un des espaces de montée/descente, de dos par rapport au sens déplacement de la rame, se tenant à la barre centrale. Il a été vivement déséquilibré, et a réalisé un pas de rattrapage en arrière en se retenant très fortement à la barre pour ne pas chuter.

3.2.2 - Les enregistrements des caméras extérieures de la rame

L'examen des enregistrements des caméras extérieures permet d'établir les éléments de chronologie suivants :

Temps écoulé depuis le départ de la station « Comédie »	Éléments de chronologie
t_0	La rame démarre de la station « Comédie » après y avoir stationné pendant 25 s
$t_0 + 24$ s	La rame s'arrête brutalement et repart 1 à 3 s plus tard
$t_0 + 2$ min 20 s	La rame s'arrête à nouveau peu avant la tranchée couverte et repart 1 min 49 s après
$t_0 + 4$ min 35 s	La rame arrive à la station « Corum » et y stationne pendant 2 min 20 s
$t_0 + 8$ min 11 s	La rame arrive à la station « Beaux-Arts »
$t_0 + 13$ min	Les pompiers arrivent à la station « Beaux-Arts »
$t_0 + 16$ min 54 s	Le Samu arrive à la station « Beaux-Arts »

Fig. 7 : éléments de chronologie issus de l'examen des vidéos filmant l'extérieur de la rame

Ces enregistrements permettent également d'apprécier l'importance des tiers à proximité de la plate-forme du tramway susceptibles d'avoir mobilisé l'attention du conducteur. Ainsi, lors de l'arrivée de la rame à la station « Comédie », environ 25 personnes étaient présentes sur le quai correspondant.

Après le départ de la rame, une dizaine de personnes était en mouvement sur les 75 mètres de l'espace public (plate-forme et abords) séparant la station « Comédie » de l'accès à la tranchée couverte. Trois seulement étaient sur la plate-forme ou à ses abords immédiats, et devaient faire l'objet d'une attention particulière du conducteur :

- une a traversé la plate-forme obliquement, courant à moins de 5 mètres de l'avant de la rame alors qu'elle démarrait juste de la station « Comédie » ;
- deux amis cheminaient sans précipitation, l'un sur la plate-forme, l'autre juste à côté. Ils n'avaient manifestement pas conscience de la rame dans leur dos car c'est celui de droite qui, après s'être retourné vraisemblablement en entendant le gong, a pris son ami par le bras pour l'en écarter.

S'agissant d'une plate-forme partagée avec des piétons, la présence de tiers susceptibles de se mettre en danger au moment de l'accident est donc réelle même si l'affluence est modérée.



Fig. 8 : extrait de la vidéo filmant l'intérieur de la rame : les barres de maintien impliquées dans les événements



Fig. 9 : extrait de la vidéo filmant l'extérieur de la rame : les deux amis cheminant le long de la plate-forme

3.2.3 - La bande tachymétrique de la rame

Les rames de tramway sont dotées d'un dispositif enregistrant certains paramètres d'exploitation, et notamment la distance parcourue, la vitesse de la rame, l'activation de la traction, du freinage de service, l'origine du freinage d'urgence, l'actionnement du gong. Cet enregistrement est communément appelé « bande tachymétrique ».

La figure ci-après présente la vitesse de la rame en fonction de son avancée, ainsi que les différentes actions du conducteur et des automatismes. La localisation et le comportement des deux amis cheminant le long de la plate-forme ont été situés sur le graphique à partir des vidéos. L'alarme VACMA, qui n'est pas une donnée qui s'enregistre sur la bande tachymétrique, a été indiquée en considérant qu'elle est intervenue deux secondes avant le freinage d'urgence.

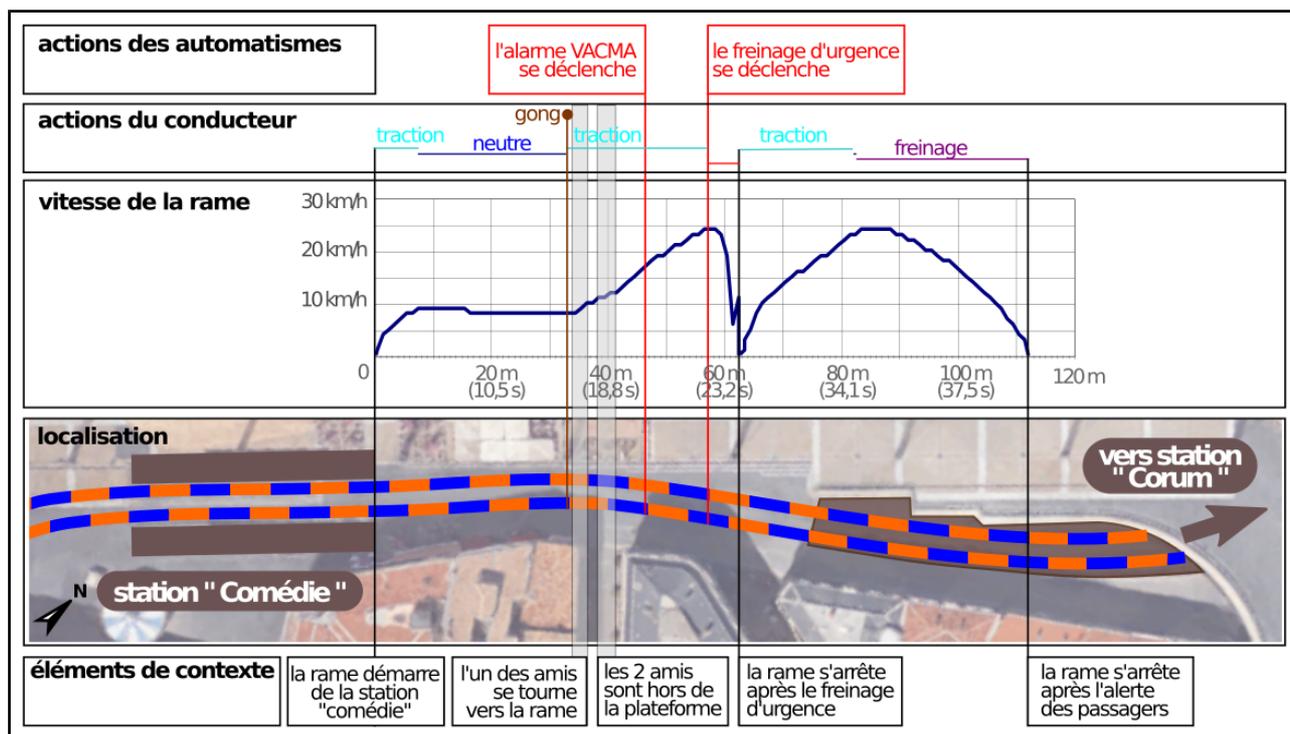


Fig. 10 : vitesse de la rame et actions du conducteur et des automatismes

Ces enregistrements confirment que le freinage à l'origine de la chute du passager est un freinage d'urgence automatiquement déclenché par le dispositif de VACMA. Préalablement à celui-ci, la conduite du conducteur est la suivante :

- au départ de la station « Comédie », le conducteur accélère modérément pendant 5 secondes, jusqu'à atteindre 9 km/h. Son accélération moyenne étant de $0,4 \text{ m/s}^2$, cela permet d'estimer qu'il a poussé son manipulateur de traction-freinage au tiers environ de sa course maximale ;
- pendant les 11 secondes suivantes, le conducteur replace son manipulateur au neutre, et sa rame reste entre 8 et 9 km/h. Les enregistrements vidéos correspondants montrent que la rame se rapproche des deux amis cheminant latéralement à la plateforme ;
- le conducteur actionne alors le gong et déplace légèrement son manipulateur de traction-freinage sur sa plage de traction. Les vidéos montrent la personne de droite qui tourne la tête vers la rame puis tire son compagnon hors du gabarit, ces actions se déroulant sur trois secondes ;
- durant les six secondes suivantes, le conducteur accélère progressivement en poussant son manipulateur de traction-freinage quasiment à son maximum, et sa rame atteint 24 km/h^{12} lors du déclenchement du freinage d'urgence.

L'ensemble de ces éléments reflète une conduite manifestement souple et prudente.

Après le freinage d'urgence, la bande tachymétrique montre :

- que la rame s'immobilise sur 5 mètres en environ 3 secondes. La précision de $\pm 1 \text{ km/h}$ et de $\pm 1 \text{ mètre}$ des enregistrements permet d'estimer la décélération moyenne de ce freinage comprise entre $3,4$ et 6 m/s^2 ;
- qu'une à trois secondes après l'arrêt de la rame, le conducteur redémarre jusqu'à

12 C'est la forme convexe de la courbe de la vitesse en fonction du temps qui permet de déduire que le déplacement du manipulateur a été progressif. L'accélération de l'ordre de $1,3 \text{ m/s}^2$ en fin de course permet de déduire un positionnement du manipulateur proche de sa position maximale.

atteindre 24 km/h, puis effectuée, 9 secondes plus tard, un freinage de service. Les témoignages permettent de comprendre que c'est en réaction au signal d'alarme tiré et à l'interpellation d'un des passagers frappant sur la paroi vitrée de sa cabine de conduite.

3.2.4 - Les enregistrements des communications du PCC

Les appels reçus et émis par le PCC sont enregistrés. Les échanges liés à l'événement sont repris synthétiquement ci-après.

Le conducteur appelle une première fois le régulateur du PCC, lui précise qu'il est arrêté entre la station « *Comédie* » et le tunnel adjacent et lui demande de faire intervenir d'urgence les pompiers pour un voyageur sans connaissance qui saigne abondamment de la tête après avoir fait une chute à l'intérieur de la rame.

Dans un premier temps, le régulateur lui intime de s'arrêter au terminus intermédiaire « *Notre-Dame de Sablassou* », dix stations plus loin¹³ afin de ne pas pénaliser l'exploitation. Devant la forte insistance du conducteur sur la gravité de la situation, il demande que la rame libère le tronç commun entre les lignes 1 et 2 et poursuive jusqu'à la station « *Beaux-Arts* », située à deux arrêts, immédiatement après.

Le régulateur contacte ensuite les secours, déjà au courant de l'accident par des passagers, et leur demande d'intervenir à cette station.

Le conducteur rappelle à quatre reprises le régulateur : à la station « *Corum* » pour lui confirmer la gravité de la situation après s'être rendu auprès de la victime et l'informer qu'elle est en arrêt cardiaque, à son arrêt à la station « *Beaux-Arts* » pour l'avertir de son arrivée, quelques instants plus tard pour s'inquiéter de l'arrivée des secours, puis ultérieurement pour l'aviser du décès de la victime.

Par ailleurs, au cours de cet événement, les régulateurs du PCC ont émis des consignes à trois reprises à l'ensemble des conducteurs de la ligne 2 pour initier son exploitation en deux sous-lignes. Ils ont également reçu un appel du standard des secours leur demandant de confirmer le lieu d'intervention à la station « *Beaux-Arts* ».

3.3 - L'examen des éléments de traçabilité du matériel et de l'exploitation

3.3.1 - La rame 2095 impliquée dans les événements

La rame Citadis 402 impliquée dans les événements porte le numéro 2095. Elle a été livrée à l'AOT par le constructeur Alstom en mars 2012. Aucune anomalie relative au dispositif de VACMA ou aux aménagements intérieurs n'est mentionnée dans son dossier de livraison du constructeur (DLC) du 20 mars 2012. S'agissant des performances dynamiques en freinage, celui-ci précise qu'elles « *sont conformes aux exigences contractuelles excepté pour les temps de réponse des essais de freinage d'urgence et [de] freinage maximal de service, ainsi que [pour] le jerk des freinages d'urgence en ELE¹⁴* ».

Cette rame a fait l'objet d'un rapport favorable de l'expert ou organisme qualifié agréé (EOQA) Certifer. Elle fait partie d'une commande dont la tête de série porte le numéro 2071, et dont l'autorisation d'exploitation commerciale a été délivrée par le préfet du département de l'Hérault en avril 2012 conjointement à l'autorisation de mise en service de la ligne 3 de Montpellier.

¹³ En service commercial normal, la rame aurait mis 13 minutes.

¹⁴ C'est-à-dire mesurées alors que le véhicule est sans voyageur, mais avec son conducteur et l'ensemble des réservoirs (d'eau, de sable, etc.) remplis.

S'agissant de sa maintenance, aucun des éléments de traçabilité examinés ne fait ressortir d'anomalie.

3.3.2 - La portion de voie entre les stations « Comédie » et « Corum »

La voie comprise entre les stations « Comédie » et « Corum » fait partie de la première ligne de tramway mise en service en juin 2000. Ses rails ont, en outre, fait l'objet d'un meulage en novembre 2011.

Sur cette portion, une opération périodique de nettoyage des rails a eu lieu durant la nuit du 28 au 29 août 2012. Elle n'a cependant pas pu être réalisée sur la voie 1, sur laquelle a eu lieu l'accident, du fait de la présence d'une rame d'essais au moment du passage de la balayeuse.

Ce retard de nettoyage serait plutôt de nature à diminuer l'efficacité d'un freinage d'urgence. Par ailleurs, l'examen visuel de la voie réalisée après l'accident n'a révélé aucune anomalie.

3.3.3 - Le conducteur de la rame 2095 et le régulateur en poste au PCC

Le conducteur de la rame 2095 était âgé de 35 ans au moment des faits. Il a été engagé par l'exploitant TaM en février 2004 en tant que conducteur d'autobus. Il a été habilité à la conduite des rames de tramway de la ligne 2 en avril 2007, puis a obtenu un complément d'habilitation pour la ligne 4 en février 2012.

Il avait jusqu'alors peu conduit de rames Citadis 402 compte-tenu de leur faible nombre en circulation sur la ligne 2 à l'époque (quatre), et la dernière fois qu'il avait eu à le faire remontait à 2 mois environ avant l'accident. Le jour de l'accident, il revenait d'un mois de congés et avait pris son service à 7h05 au dépôt de la ligne 2.

L'agent du PCC impliqué dans les événements a été embauché à la TaM en mai 1989 en tant que conducteur bus. Il est devenu régulateur au PCC en 2000 lors de la mise en service du tramway. Le jour de l'accident, il était affecté à la régulation des lignes 2 et 4, et avait pris son service à 5 heures.

3.3.4 - Les consignes à destination des régulateurs

Parmi les consignes à disposition des régulateurs, celle dénommée « *consigne d'urgence n° 1.3.2 – agression, malaise, décès à l'intérieur d'un véhicule* » s'applique aux événements objets du présent rapport. Elle dispose que :

« sur l'appel d'un CR¹⁵ ou de tout agent TaM, le Régulateur doit :

- prendre tous les renseignements sur le client blessé,
- informer immédiatement les pompiers de la situation.

Si la nature le justifie, [...]

- sur tramway : positionner la rame aux terminus ou dans un tiroir pour intervention des secours [...]

On peut raisonnablement supposer que les situations justifiant un tel positionnement de la rame aux terminus sont celles sans gravité. Toutefois rien n'est précisé sur la conduite attendue pour les situations graves.

15 Contrôleur-Receveur

3.4 - Les investigations menées sur la VACMA

3.4.1 - L'examen de la VACMA de la rame 2095

L'examen fonctionnel de la rame impliquée n'a montré aucun dysfonctionnement du dispositif de VACMA. Les valeurs de ses temporisations sont conformes à celles prévues à la conception : l'alarme se déclenche correctement lorsque le dispositif est actionné continûment pendant plus de 10 secondes et lorsqu'il n'est pas actionné pendant plus de 3 secondes. Le freinage d'urgence se déclenche effectivement 2 secondes plus tard en l'absence de réaction du conducteur.

Toutefois, deux points ont été notés concernant l'alarme VACMA :

- le son émis sur les rames Citadis 402 alors en cours d'introduction sur les lignes du réseau de Montpellier est sensiblement plus sourd et feutré que celui émis par les autres matériels du réseau ;
- certains conducteurs avaient fait la remarque que le volume de cette alarme sur ce modèle de matériel était trop faible.

3.4.2 - L'utilisation de la VACMA par le conducteur impliqué

Lors de l'entretien que le BEA-TT a pu mener avec le conducteur, celui-ci explique que ses habitudes sont de relâcher brièvement le dispositif de VACMA toutes les 3 à 5 secondes environ. Il s'agit d'un automatisme auquel il ne prête plus d'attention. Il utilise préférentiellement le bouton sensitif du manipulateur de traction-freinage, et emploie parfois la pédale « *pour se reposer* ». Lorsqu'il arrive, rarement, que l'alarme se déclenche, c'est un signe pour lui qu'il doit se concentrer plus fortement sur sa conduite.

Le jour de l'accident, il n'a pas été en mesure de se rappeler s'il avait relâché ou au contraire maintenu trop longtemps le dispositif de VACMA juste avant le freinage d'urgence, ni s'il utilisait alors le bouton sensitif du manipulateur ou la pédale. Il n'a aucun souvenir d'avoir entendu l'alarme VACMA retentir et a été très surpris par le freinage d'urgence, qu'il a d'abord attribué au déclenchement du ramasse-corps mobile¹⁶, qu'il a alors tenté de réarmer en tirant sur le câblot situé à droite de son siège.

Le graphique ci-après illustre l'utilisation du dispositif de VACMA les instants précédant l'accident selon deux hypothèses :

- dans le cas où le conducteur l'a maintenu plus de 10 secondes ;
- à l'inverse, s'il l'a relâché plus de 3 secondes.

¹⁶ Le ramasse-corps mobile est un dispositif qui, lorsque l'avant d'une rame Citadis 402 passe sur un corps ou un obstacle, tombe devant le bogie afin d'éviter qu'il ne soit écrasé par les roues. L'actionnement de ce dispositif déclenche le freinage d'urgence.

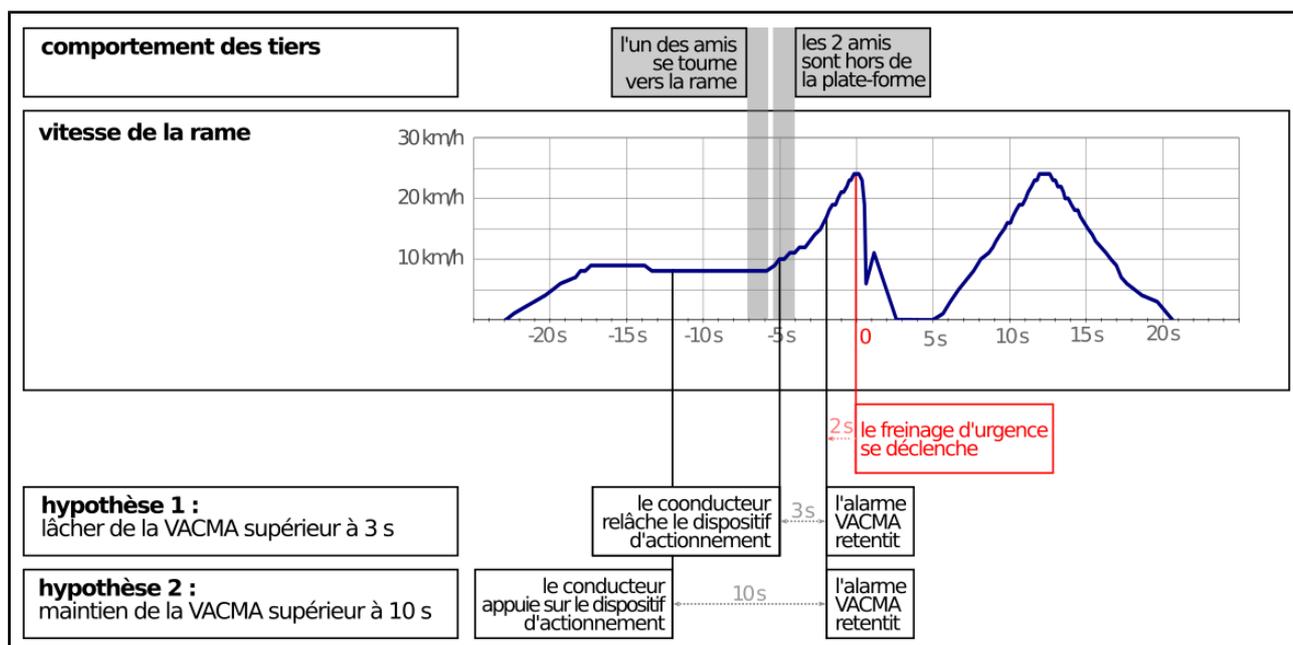


Fig. 11 : utilisation du dispositif de VACMA les instants précédant l'accident

Il en ressort que :

- le conducteur avait effectué au moins un cycle d'actionnement du dispositif de VACMA après son départ de la station « Comédie », sinon le freinage d'urgence serait intervenu au plus tard 15 secondes¹⁷ après l'avoir quittée et non 23 secondes ;
- dans l'hypothèse où le conducteur a maintenu son dispositif de VACMA pendant plus de 10 secondes, comme dans celle où il l'a relâché pendant plus de 3 secondes, il avait, durant cette période, son attention mobilisée par les deux amis qui cheminaient le long de la plate-forme. On peut raisonnablement attribuer son oubli d'actionnement à la gestion de cette situation, qui n'a cependant rien d'inhabituel sur cette partie du parcours partagé avec les tiers ;
- à l'inverse, au moment où l'alarme VACMA s'est déclenchée, 2 secondes avant le freinage d'urgence, la cabine de conduite avait déjà dépassé les deux amis, le conducteur était en phase d'accélération à 17 km/h, et aucun autre tiers n'était susceptible de mobiliser son attention. Le son de cette alarme, plus sourd et moins fort que sur les autres matériels qu'il conduit habituellement, associée à sa pratique encore brève du matériel Citadis 402 et son retour d'un mois de congés, expliquent très vraisemblablement que le conducteur n'a pas entendu l'alarme, ou ne l'a pas associée à un défaut d'actionnement du dispositif de VACMA.

3.4.3 - Le panorama des dispositifs de veille existant sur les réseaux de tramway

Les données figurant dans le présent paragraphe sont issues du recensement que l'UTP a effectué auprès des exploitants français et étrangers dans le cadre de son groupe de travail « fonctions de veille ».

Les dispositifs techniques de veille présents sur les rames des réseaux de tramway français sont très majoritairement du type VACMA, avec des temporisations similaires à celle de la gamme Citadis 402 de Montpellier :

¹⁷ Ces 15 secondes sont constituées de 10 secondes de maintien, de 3 secondes de lâcher, et de 2 secondes d'alarme.

- le temps de maintien maximum du dispositif d'actionnement est de 10 secondes, un réseau l'a ramené à 8 secondes et quelques rares l'ont porté à 13, 15 voire 30 secondes ;
- le temps maximum de relâchement du dispositif d'actionnement est de 3 secondes, parfois ramené à 2 secondes ;
- le temps de réaction laissé aux conducteurs avant un freinage d'urgence est de 2 secondes, parfois 2,5 ou 3 secondes ;
- le dispositif d'actionnement est un bouton mécanique ou sensitif placé sur le manipulateur, voire de part et d'autre du pupitre, qui est souvent doublé par une pédale.

Toutefois, sur deux réseaux, des constructeurs ont équipé leurs rames d'un autre type de dispositif de veille : le conducteur doit maintenir une pédale dans un état intermédiaire, s'il appuie trop fortement ou s'il la relâche, une alarme retentit et, s'il n'y réagit pas dans les 2 à 3 secondes, un freinage se déclenche. Sur certains de ces matériels, le conducteur peut choisir, au lieu d'agir sur la pédale, d'appuyer continûment sur un bouton-poussoir.

Enfin, deux particularités sont à noter :

- sur les rames de Saint-Étienne, le freinage d'urgence est réversible, c'est-à-dire que le conducteur peut l'interrompre après que le dispositif de veille l'a déclenché ;
- le dispositif de veille des rames des constructeurs Bombardier et CAF circulant sur le réseau de Nantes actionne un freinage maximal de service.

Ce dispositif de VACMA est très différent de sa version ferroviaire. Cette dernière est normalisée, au niveau international, par la fiche « *UIC 641* » et par la spécification technique d'interopérabilité (STI) « *matériel roulant* » et, au niveau français, par la spécification d'admission du matériel « *SAM S301* ». Les temps de maintien sont plus longs, jusqu'à 55 secondes, et les alarmes sonores sont différentes pour le maintien et pour le relâcher. En outre, elle peut être réarmée par les actions normales du conducteur sur les commandes de son engin.

3.5 - Les investigations menées sur le freinage d'urgence

3.5.1 - Les choix techniques opérés par Alstom concernant le freinage d'urgence

Depuis la conception de ses premiers modèles Citadis, en 1997-1999, l'entreprise Alstom a fait le choix d'avoir un système de freinage d'urgence qui procure une performance de freinage identique qu'il soit déclenché par le conducteur, une alarme ou un dispositif automatique¹⁸.

S'agissant des rames Citadis 402 de Montpellier, les exigences attendues de ce freinage d'urgence ont été formalisées comme suit :

- d'une part, les dossiers de sécurité présentés par l'AOT au préfet du département de l'Hérault en vue d'obtenir leur autorisation de mise en exploitation commerciale prévoient l'application de la norme NF EN 13452 détaillée au paragraphe 2.4 ci-avant ;
- d'autre part, le contrat entre l'AOT et le constructeur spécifie une décélération minimale de 2,9 m/s², un temps de réaction de 0,7 s et un jerk maximal de 8 m/s³, c'est-à-dire des performances légèrement plus contraignantes que le mode « urgence 3 » de la norme précitée. Il n'exige cependant rien concernant la décélération instantanée et ne prévoit pas non plus d'adapter ce freinage d'urgence selon le dispositif qui le déclenche. Ce contrat précise également que la norme NF EN 13452 a servi au développement de la gamme de matériels Citadis.

¹⁸ Le freinage d'urgence déclenché lorsqu'un voyageur actionne la poignée d'alarme alors que la rame sort de quai a cependant évolué au fil du temps, de sorte à le rendre moins brutal.

Cependant, comme indiqué au paragraphe 2.4 du présent rapport, dès lors qu'il n'est pas prévu de moduler le freinage d'urgence selon le dispositif qui le déclenche, il est physiquement impossible que ces rames puissent respecter tous les seuils de performance de freinage des modes « urgence 1 » à « urgence 4 » édictés par cette norme, quels que puissent être les réglages que le constructeur y apporte.

Le constructeur et l'AOT ont toutefois considéré que la possibilité ouverte par cette norme de pouvoir regrouper plusieurs modes leur permettait de ne respecter que les seuls seuils du mode le plus exigeant pour éviter les collisions avec les tiers, en l'occurrence « urgence 3 ». Ce raisonnement, qui s'écarte d'une lecture stricte de la norme et en dénature les objectifs de limitation du déséquilibre des voyageurs, a été accepté par l'EOQA lorsqu'il a évalué les résultats des essais de freinage des rames. Il semble qu'à l'époque, les enjeux de sécurité concernant le déséquilibre des passagers, les valeurs de jerk et de décélération instantanée n'étaient pas totalement perçus par les acteurs compte tenu du faible nombre de voyageurs gravement blessés au cours d'une chute.

Les rames Citadis 402 de Montpellier s'arrêtent donc très rapidement sur une courte distance, au risque d'occasionner des chutes de leurs passagers, y compris lorsque la situation de danger ne le nécessite pas.

3.5.2 - Les performances du freinage d'urgence à la réception des rames

La batterie des essais visant à s'assurer des performances de freinage des nouvelles rames Citadis 402 a été réalisée sur la rame « tête de série » numérotée 2071.

Le tableau ci-après reprend les valeurs de performance du freinage d'urgence réalisées sur une portion de voie à Montpellier, avec la rame à vide à une vitesse de 40 km/h sur rail sec, situation d'essais la plus proche de celle de l'accident¹⁹, et les compare avec les attentes de la norme pour les différents modes de déclenchement.

		Mode « urgence 1 » déclenché par le dispositif de veille	Mode « urgence 2 » déclenché par une alarme passagers	Mode « urgence 3 » déclenché par le manipulateur de traction-freinage en position extrême	Mode « urgence 4 » déclenché par une commande séparée
Décélération équivalente a_e	Exigence de la norme	$a_e \geq 1,2 \text{ m/s}^2$	$a_e \geq 1,2 \text{ m/s}^2$	$a_e \geq 2,8 \text{ m/s}^2$	$a_e \geq 2,8 \text{ m/s}^2$
	Résultat des essais	a_e moyen de 4,68 m/s ² (variant entre 4,43 et 4,87 m/s ² selon les essais)			
Temps de réponse équivalent t_e	Exigence de la norme	$t_e \leq 1,5 \text{ s}$	$t_e \leq 2 \text{ s}$	$T_e \leq 0,85 \text{ s}$	$t_e \leq 0,85 \text{ s}$
	Résultat des essais	t_e moyen de 0,7 s (variant entre 0,71 et 0,78 s selon les essais)			
Décélération instantanée a	Exigence de la norme	$a \leq 2,5 \text{ m/s}^2$	$a \leq 2,5 \text{ m/s}^2$	$a \leq 5 \text{ m/s}^2$	$a \leq 4 \text{ m/s}^2$
	Résultat des essais	Non renseignée mais nécessairement supérieure à la décélération a_e			
Jerk moyen j	Exigence de la norme	$j \leq 4 \text{ m/s}^3$	$j \leq 4 \text{ m/s}^3$	$j \leq 8 \text{ m/s}^3$	$j \leq 8 \text{ m/s}^3$
	Résultat des essais	j moyen de 8,7 m/s ³ (variant entre 7,4 et 10,2 m/s ³ selon les essais)			

Fig. 12 : résultats des essais de réception du freinage d'urgence de la rame tête de série (les cases grisées représentent les seuils de la norme dépassés lors des essais)

Trois points sont à noter :

- le jerk dépasse de 9 % la valeur maximale autorisée par la norme précitée pour les situations « urgence 3 ». Il dépasse également la valeur prévue au contrat de fourniture

19 En effet, Alstom a réalisé ses essais de réception à 40 km/h et à 70 km/h. La partie 2 de la norme NF EN 13452 demande soit trois essais pour trois vitesses différentes uniformément réparties sur la gamme de vitesse ou a défaut définies par le réseau ferroviaire, soit neuf essais distribués de façon uniforme dans la gamme de vitesse.

des rames, ce que le constructeur a justifié par la présence d'une rampe à 5 ‰ sur la zone de réalisation des essais, en renvoyant à des essais conformes réalisés sur son propre site²⁰. Ce dépassement atteint 117 % si on le compare au seuil du mode « urgence 1 » adapté aux freinages d'urgence du dispositif de veille ;

- bien que le compte-rendu d'essai ne précise pas la décélération instantanée, elle est cependant nécessairement supérieure à la décélération équivalente de 4,68 m/s² mesurée. Elle dépasse donc à coup sûr les valeurs maximales retenues par la norme pour les situations « urgence 1 » « urgence 2 » et « urgence 4 », et très probablement pour la situation « urgence 3 » ;
- enfin, la valeur de décélération équivalente de 4,68 m/s² est sensiblement supérieure aux minimums requis par la norme (2,8 m/s² pour le mode « urgence 3 », et 1,2 m/s² pour le mode « urgence 1 »).

Ces performances témoignent d'un freinage d'urgence :

- très puissant, avec des valeurs de décélération équivalente qui sont notablement supérieures au minimum requis ;
- brutal, avec des valeurs de jerk et de décélération instantanée qui, sur le site d'essai de Montpellier, dépassent celles de la norme.

3.5.3 - Les essais de freinage et de déséquilibre réalisés après l'accident

Le constructeur Alstom et l'exploitant TaM ont réalisé, à la demande du BEA-TT et en présence du STRMTG, des essais de freinage d'urgence destinés à mesurer les performances de freinage d'une rame Citadis 402 de Montpellier et à apprécier le déséquilibre ressenti par les passagers durant ceux-ci.

Ils se sont déroulés durant la nuit du 12 au 13 novembre 2013 sur la rame Citadis 402 numérotée 2093, à l'endroit de l'accident qui présente une légère pente et à proximité de la gare Saint-Roch dont la voie est en palier. Ils ont été effectués à 25 km/h, vitesse de la rame 2095 lors de l'accident, ainsi qu'à 10 et 40 km/h. Le freinage a été déclenché par un dispositif simulant le déclenchement du dispositif de VACMA, alors que le conducteur a son manipulateur de traction-freinage positionné en traction et que la rame est en accélération, situation présente lors de l'accident.

Pour évaluer le déséquilibre ressenti par les usagers au cours du freinage, deux personnes, de morphologie et de poids différents, situées dans l'un des espaces de montée-descente, debout dans le sens de la marche et immobiles, ont été filmées. L'échelle relative suivante a été utilisée :

- 1 à 3 : déséquilibre peu sensible, ne nécessitant qu'un mouvement des chevilles ou du bassin pour s'y opposer, qui ne peut conduire à une chute ;
- 4 à 5 : déséquilibre modéré nécessitant un pas de rattrapage pour s'y opposer, sans que cela conduise à une chute ;
- 6 à 8 : fort déséquilibre nécessitant plusieurs pas de rattrapage et susceptible de conduire à une chute ;
- 9 à 10 : déséquilibre violent conduisant selon toute vraisemblance à une chute sans un dispositif pour se rattraper.

²⁰ Dans son rapport des essais réalisés sur son propre site, le constructeur précise toutefois que « le contact roue/rail étant différent sur le site d'essais Alstom et celui du réseau de la ligne 3 de Montpellier, l'ensemble des résultats [sur le site d'essais Alstom] sont donnés à titre d'information ». Lorsque les essais sont réalisés sur une portion en pente, la norme recommande soit de calculer l'effet de la pente sur les résultats, soit de réaliser ces essais dans les deux sens.

Les résultats de ces essais sont synthétisés dans le tableau ci-après.

	Décélération équivalente a_e	Jerk j en début de freinage	Jerk en fin de freinage	Décélération instantanée maximale ²¹	Déséquilibre ressenti par un passager debout
Seuils de la norme en mode « urgence 1 »	$a_e \geq 1,2 \text{ m/s}^2$	$j \leq 4 \text{ m/s}^3$	Non normé	$a \leq 2,5 \text{ m/s}^2$	Sans objet
Essais à 10 km/h en palier					
Moyenne des 4 essais réalisés	2,6 m/s^2	5,4 m/s^3	4,9 m/s^3	4,1 m/s^2	4,5 (variant entre 4 et 5) déséquilibre modéré
Essais à 25 km/h en palier					
Moyenne des 4 essais réalisés	4 m/s^2	8,1 m/s^3	16,9 m/s^3	6,6 m/s^2	9,4 (variant entre 7 et 10) déséquilibre violent
Essais à 40 km/h en palier					
Moyenne des 4 essais réalisés	4,2 m/s^2	5 m/s^3	18,2 m/s^3	6,4 m/s^2	7,6 (variant entre 6 et 9) déséquilibre fort
Essais de reconstitution de l'accident (à 25 km/h sur les lieux de l'accident présentant une légère pente)					
Moyenne des 4 essais réalisés	n'a pas pu être mesurée en raison d'un signal GPS insuffisant dans la zone	6,5 m/s^3	9,4 m/s^3	6,1 m/s^2	9,5 (variant entre 8 et 10) déséquilibre violent

Fig. 13 : essais de performance du freinage d'urgence et du déséquilibre engendré sur les passagers

On peut en retenir les éléments suivants :

- lors des essais à 25 km/h, vitesse à laquelle s'est produit l'accident du 3 septembre 2012, les déséquilibres engendrés par le freinage d'urgence ont été qualifiés de « violents », c'est-à-dire qu'ils ont nécessité un dispositif de maintien pour éviter une chute ;
- bien que la décélération équivalente « a_e » n'ait pu être calculée lors des essais de reconstitution à cause d'une réception insuffisante des signaux GPS dans la zone de l'accident, les courbes de décélération obtenues sont très proches de celles des essais à 25 km/h en palier. La décélération équivalente lors des événements du 3 septembre 2012 est donc très vraisemblablement de l'ordre de 4 m/s^2 ;
- l'analyse des vidéos montre que c'est le tout début du freinage qui crée le déséquilibre initial du passager et est à l'origine de sa réaction réflexe pour y faire face. La toute fin du freinage produit une impulsion inverse moindrement ressentie, bien que le jerk correspondant soit notablement plus élevé.

3.5.4 - L'étude de l'IFSTTAR sur l'influence du jerk sur l'équilibre des passagers

À la suite de l'accident objet du présent rapport, le STRMTG a confié à l'IFSTTAR une étude visant à apprécier l'influence du jerk sur l'équilibre des passagers, à évaluer les conséquences d'un éventuel dépassement des seuils de jerk de la norme NF EN 13452 relative aux systèmes de freinage des transports publics urbains et suburbains sur les risques de chute des voyageurs, et à rechercher s'il existe des profils de décélération susceptibles de favoriser l'équilibre des passagers tout en respectant les valeurs de la norme précitée.

²¹ Lors des essais, l'accélération initiale était de l'ordre de 1 à 1,2 m/s^2 , les valeurs mentionnées représentent la variation maximale constatée au cours du freinage.

À cette fin, l'IFSTARR a conçu, à partir d'une représentation bio-mécanique d'un passager, un modèle informatique lui permettant de déterminer, au cours d'un freinage aux caractéristiques déterminées, le pourcentage d'utilisateurs qui n'arrivent pas à rétablir leur équilibre malgré des actions de rattrapage²².

L'IFSTARR en conclut notamment que²³ :

- le jerk a une influence importante sur le risque de chute de l'utilisateur. Ainsi, une réduction du jerk engendre une réduction notable de ce risque en contrepartie d'une augmentation des vitesses d'impact potentielles et d'une augmentation de la distance d'arrêt, qui reste cependant en deçà de la distance d'arrêt maximale exigée par la norme précitée. A contrario, un doublement du seuil de jerk fixé par la norme pour les modes « urgence 1 » et « urgence 2 » engendre un triplement du risque de chute pour des diminutions de distance d'arrêt relativement faibles ;
- à distance d'arrêt égale, il est possible de définir des profils de décélération qui minimisent le risque de chute : il convient en priorité de chercher à diminuer le jerk quitte à augmenter l'accélération maximale.

À titre d'illustration, le BEA-TT a ainsi extrait de cette étude le risque de chute d'un passager dans une rame effectuant un freinage d'urgence, selon que cette rame respecte les performances de freinage définie par la norme précitée en mode « urgence 1 » (déclenché par le dispositif de veille) ou en mode « urgence 3 » (déclenché par le manipulateur de traction-freinage)²¹ :

- en mode « urgence 1 », le risque de chute²¹ est de 29 % ;
- en mode « urgence 3 », ce risque²¹ est 3,3 fois plus élevé et atteint 97 %.

3.6 - Les investigations menées sur les dispositifs de maintien

La victime avait juste lâché, de sa main gauche, une barre de maintien et s'apprêtait à en saisir, de sa main droite, une autre située au-dessus d'un siège lorsqu'elle a été déséquilibrée par le freinage d'urgence. Elle a effectué deux pas en avant sans pouvoir se rattraper, avant de chuter. Sa tête a alors violemment heurté le bas d'une barre quadri-lobe. Le BEA-TT a donc examiné la répartition des dispositifs de maintien dans l'espace voyageurs.

Sur le tramway Citadis 402 de Montpellier, les différents dispositifs de maintien à disposition des utilisateurs, et leur répartition à l'intérieur de la rame, sont illustrés sur les deux photos ci-après.

22 L'IFSTARR précise que « les données expérimentales pertinentes permettant la validation de ce modèle restent peu nombreuses. Les résultats présentés [...] sont à prendre avec précaution, en particulier en ce qui concerne l'évaluation « absolue » du risque de chute dans une situation donnée. En revanche ils donnent une bonne indication quant à la sévérité relative d'une situation par rapport à une autre ».

23 D'autres conclusions sont également tirées sur l'influence de la décélération initiale et la comparaison entre les modes « urgence 2 » et « urgence 3 » de la norme précitée.



Fig. 14 : barres de maintien à disposition des usagers du tramway Citadis 402 de Montpellier

Les zones où un passager debout est à plus de 75 cm²⁴ d'au moins un de ces dispositifs ou d'une paroi verticale fixe sont peu étendues et peu nombreuses, localisées en rouge sur la figure ci-après.

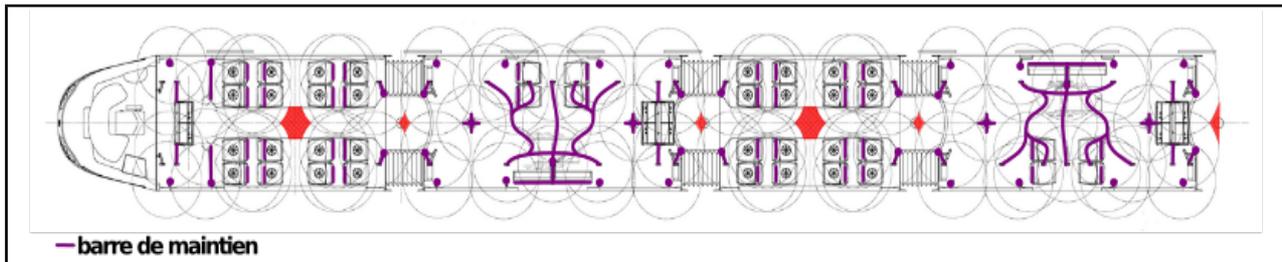


Fig. 15 : zones (en rouge) où un voyageur debout est à plus de 75 cm d'une barre de maintien (en violet) ou d'une paroi verticale fixe

Par ailleurs, comparé aux rames des tramways d'Angers et du Mans, relativement représentatives de celles des autres réseaux, les rames Citadis de Montpellier ont des dispositifs légèrement plus nombreux et plus densément répartis.

3.7 - Les retours d'expériences

3.7.1 - Les statistiques des freinages d'urgence à Montpellier en 2012

L'exploitant de Montpellier a recensé 400 freinages d'urgence sur les rames de son réseau entre avril et décembre 2012. Leur répartition selon leur origine est représentée sur le graphique ci-après.

Les freinages d'urgence à l'initiative du conducteur sont très largement majoritaires. Les autres freinages d'urgence représentent cependant 20 % du total, pour lesquels il n'y a pas de danger avéré devant la rame, et qui pourraient en conséquence se satisfaire de performances moindres, conformes à celles prévues en modes « urgence 1 » ou « urgence 2 » au sens de la norme NF EN 13452.

24 L'entreprise Alstom a retenu cette valeur de 75 cm considérant qu'elle représente l'encombrement moyen d'un homme, bras tendu, se tenant à une barre.

Par ailleurs, la répartition de ces freinages d'urgence selon le modèle des rames a été examinée. Elle est cohérente avec leur nombre en service, à l'exception de deux causes :

- les FU dus aux pannes sont survenus dans 65 % des cas sur des rames Citadis 402, ce qui s'explique par l'habituelle période de « déverminage » après la mise en service ;
- les FU dus à la VACMA sont survenus dans 60 % des cas sur des rames Citadis 402, ce qui s'explique possiblement par la sonorité et le volume de l'alarme différents des autres modèles²⁵.

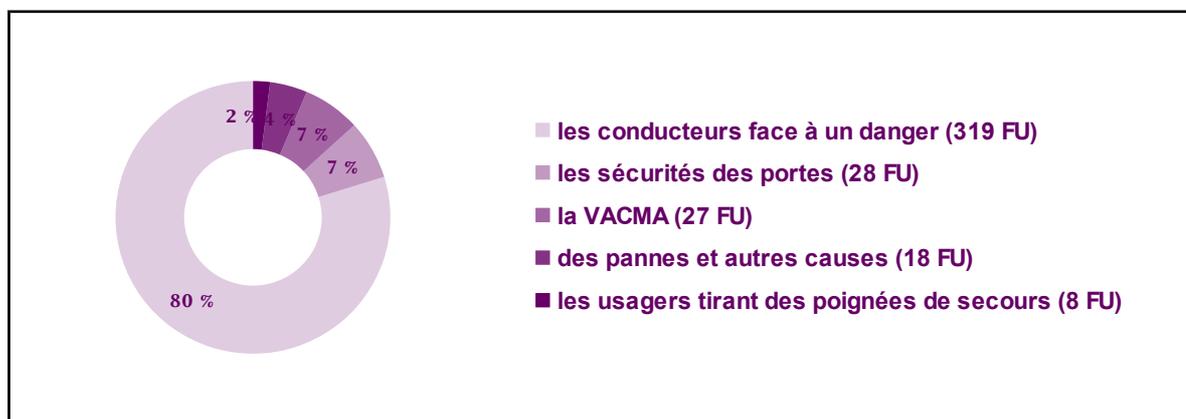


Fig. 16 : causes du déclenchement des 400 freinages d'urgence survenus sur le réseau de Montpellier entre avril et décembre 2012

Ces 400 freinages d'urgence ont occasionné, outre le décès objet du présent rapport, 30 blessés légers et aucun blessé grave parmi les passagers²⁶, ce qui représente en moyenne 1 victime tous les 13 freinages.

3.7.2 - Les statistiques nationales des victimes de freinages d'urgence

Le STRMTG recense depuis 2004 les événements survenant sur les réseaux de tramway français.

Entre 2004 et 2014, il a recensé 24 passagers décédés ou grièvement blessés²⁷ dans un événement au cours duquel le freinage d'urgence a été déclenché, se répartissant ainsi :

- 1 tué à la suite d'un freinage d'urgence déclenché par un dispositif de veille, dans l'accident objet du présent rapport ;
- 24 blessés graves, dont 20 à la suite d'un freinage d'urgence déclenché par les conducteurs, et 4 à la suite d'un freinage d'urgence déclenché par le dispositif de veille.

Les blessés légers sont, pour leur part, plus difficiles à recenser dans la mesure où les événements correspondants ne sont pas nécessairement remontés de manière homogène par les exploitants. Ils sont comptabilisés à hauteur de 3 696 dans cette base de données²⁸.

Pour mémoire, les tiers décédés ou grièvement blessés dans une collision avec une rame de tramway sont, sur la même période, au nombre de 270.

²⁵ Leurs temporisations sont identiques, leur dispositif d'actionnement sont cependant différents.

²⁶ Le nombre de victimes est issu de la base de données tenue par le STRMTG à partir des déclarations des exploitants. Il peut ne pas être exhaustif.

²⁷ Est considérée gravement blessée, toute personne qui a subi une hospitalisation de plus de 24h du fait de l'accident.

²⁸ Ce nombre correspond aux voyageurs légèrement blessés dans un événement au cours duquel un freinage d'urgence a été déclenché. Il peut notamment s'agir d'une collision d'une rame avec un véhicule routier, au cours de laquelle le conducteur a déclenché un freinage d'urgence. La seule décélération due au freinage d'urgence n'est pas nécessairement la cause de la blessure.

Par ailleurs, un deuxième décès d'un passager est survenu à Nice le 11 avril 2015 : ce voyageur venait de monter par la porte avant et marchait, aidé d'une béquille, dans le sens inverse de déplacement de la rame. Un freinage d'urgence déclenché par le dispositif de VACMA l'a déséquilibré et il a chuté en arrière sans pouvoir se rattraper. Une fois au sol, son corps, emporté par l'élan, a continué de glisser et sa tête a violemment heurté une barre de maintien.

3.8 - Les suites données à l'accident par l'exploitant

À la suite de cet accident, l'exploitant TaM :

- a augmenté le volume sonore de l'alarme VACMA sur ses rames Citadis 402 et en a homogénéisé la tonalité avec le reste de sa flotte ;
- a insisté, dans ses documents à destination des conducteurs, sur la nécessité de se déplacer auprès d'un passager blessé dès qu'ils en sont informés afin de pouvoir en rendre compte de manière fiable ;
- a modifié les consignes des régulateurs et les a sensibilisés à la gestion des situations comportant des voyageurs blessés à l'intérieur des rames ;
- a fait apposer dans toutes ses rames des autocollants attirant l'attention des voyageurs sur le freinage d'urgence « sec » et les incitant à se tenir aux barres durant le déplacement du tramway ;
- a testé sur la ligne 4 de son réseau de tramway une modification des réglages du dispositif de VACMA permettant au conducteur de n'avoir plus à relâcher le bouton correspondant du manipulateur de traction-freinage entre deux stations.

4 - Analyse du déroulement de l'accident et des secours

4.1 - La situation avant l'accident

Le jour de l'accident, le ciel était clair, la chaussée et les rails étaient secs. De retour d'un mois de congés, le conducteur a pris son service à 7h30 sur la rame Citadis 402 n° 2095, modèle en cours de déploiement sur le réseau de Montpellier et qu'il avait très peu conduit jusqu'alors.

4.2 - Le déroulement de l'accident

A 11 h 14, le conducteur démarre de la station « *Comédie* » après y avoir effectué un échange voyageurs. Durant les 15 secondes suivantes, il atteint la vitesse de 8 à 9 km/h et s'y maintient car deux amis cheminent de dos le long du site partagé, dont l'un est sur la trajectoire de la rame. Il actionne son gong afin de les alerter, et l'un des amis tire le second par le bras pour l'éloigner de la plate-forme.

Durant les 4 secondes suivantes, le conducteur accélère légèrement, passe devant les deux amis, puis ré-accélère plus fortement. Alors qu'il atteint la vitesse de 17 km/h, une alarme retentit, car il a actionné ou relâché trop longtemps le dispositif de VACMA. Il n'y réagit cependant pas, soit qu'il ne l'a pas entendue, soit qu'il ne l'a pas associée à une alarme demandant une réaction immédiate. Un freinage d'urgence se déclenche alors 2 secondes après et la rame, qui avait atteint 24 km/h, s'arrête en 4 à 6 mètres et 2 à 4 secondes.

Depuis le départ de la station « *Comédie* », la victime se déplaçait à l'intérieur de la rame, la remontant depuis l'arrière en se tenant aux différentes barres de maintien. Au moment où le freinage d'urgence se déclenche, alors qu'elle s'apprêtait à saisir une barre de maintien située au-dessus d'un siège, son corps est projeté en avant et elle chute en ayant sans succès tenté de retrouver son équilibre en faisant deux pas en avant. Sa tête heurte violemment le bas d'une barre de maintien et elle perd connaissance immédiatement.

Le conducteur repart environ 1 à 3 secondes après l'arrêt complet de la rame, et, 6 secondes plus tard, effectue un freinage de service après que des passagers ont actionné un signal d'alarme et que d'autres l'ont averti en frappant à la porte de sa cabine. Il s'est, en tout, passé 43 secondes depuis le départ de la station « *Comédie* ».

4.3 - La gestion de l'accident et l'intervention des secours

Informé par les voyageurs de la situation, le conducteur contacte le PCC, qui lui enjoint de se rendre à la station « *Beaux-arts* » où il demandera aux secours publics d'intervenir.

2 minutes 15 secondes après l'alerte des passagers, la rame arrive à la station « *Corum* ». Elle y stationne 2 minutes 20 secondes, le temps au conducteur de se rendre auprès de la victime et d'appeler le PCC pour lui confirmer la gravité de la situation. Si la plupart des voyageurs descendent de la rame, quelques rares y demeurent ou y accèdent.

5 minutes 51 secondes après l'alerte des passagers, le conducteur arrive à la station « *Beaux-Arts* », les pompiers puis le SAMU y arriveront respectivement environ 5 et 10 minutes après, et constateront le décès de la victime après avoir tenté de la réanimer.

Durant tout le temps entre le freinage d'urgence et l'arrivée des secours, la victime est prise en charge par des passagers qui, en relation téléphonique avec les pompiers, lui prodiguent un massage cardiaque.

5 - Analyse des causes et facteurs associés, orientations préventives

5.1 - Le schéma des causes et des facteurs associés

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

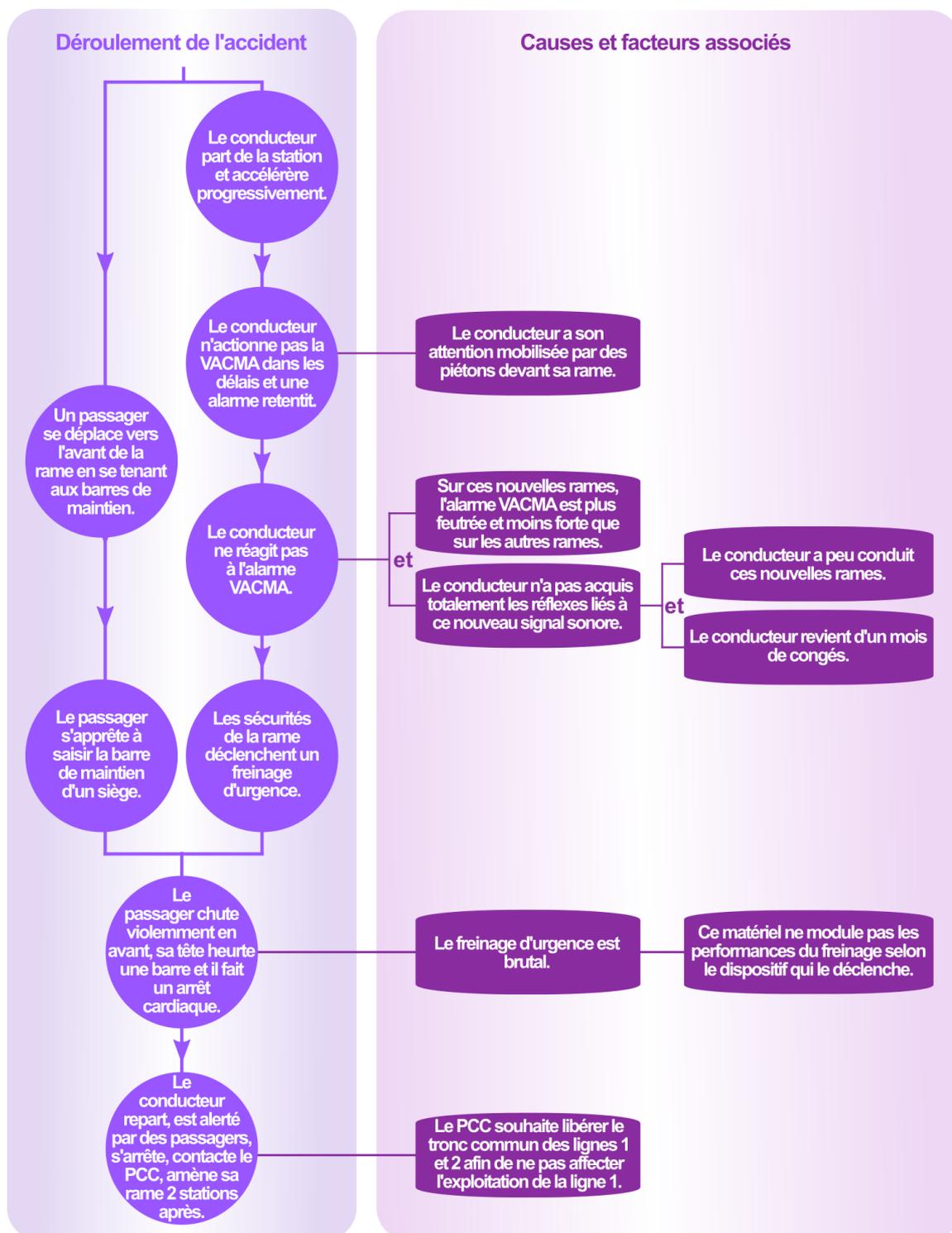


Fig. 17 : schéma du déroulement de l'accident, des causes et des facteurs associés

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

- l'ergonomie du dispositif de veille ;
- l'adaptation des performances du freinage d'urgence ;
- la gestion des situations accidentelles.

5.2 - L'ergonomie du dispositif de veille

Le conducteur n'a pas actionné son dispositif VACMA dans les délais, soit qu'il l'a maintenu appuyé plus de 10 secondes, soit qu'il l'a relâché plus de 3 secondes, vraisemblablement parce qu'il avait son attention mobilisée par des tiers à proximité de sa rame. Cette situation n'est, en soi, pas anormale : un oubli d'actionnement du dispositif VACMA dans les délais est toujours possible, et la présence de tiers sur une portion de plate-forme partagée avec les piétons n'a, par définition, rien d'inhabituel.

Le conducteur n'a cependant pas réagi à l'alarme qui s'est en conséquence déclenchée deux secondes plus tard. Il n'avait alors plus son attention mobilisée par des tiers. La sonorité de cette alarme moins forte et plus feutrée sur les rames Citadis 402 que sur les autres rames du réseau, conjuguée à la brève pratique qu'il avait de ce matériel et à son retour d'un mois de congés, expliquent qu'il ne l'a pas associée à un oubli d'actionnement du dispositif de veille.

L'exploitant TaM a, depuis, augmenté le volume de cette alarme sur les rames Citadis 402 et en a homogénéisé sa sonorité avec les autres rames de son parc. Il n'en demeure pas moins que le délai de réaction de deux secondes dont dispose le conducteur à l'audition de l'alarme avant qu'un freinage d'urgence irréversible se déclenche est particulièrement court.

Le BEA-TT émet en conséquence la recommandation suivante :

Recommandation R1 (STRMTG) :

Demander aux exploitants de tramway de s'assurer que le conducteur dispose d'un délai suffisant, et en tout état de cause supérieur à deux secondes, entre le moment où une alarme lui indiquant un défaut d'actionnement de son dispositif de veille se déclenche et celui où le freinage d'urgence correspondant agit.

En outre, le BEA-TT invite les exploitants des réseaux de tramway à s'assurer que les signaux sonores des alarmes indiquant aux conducteurs un défaut d'actionnement du dispositif technique de veille sont suffisamment homogènes et cohérents sur l'ensemble des rames qu'ils sont amenés à conduire.

On peut par ailleurs s'étonner des caractéristiques techniques des dispositifs actuels de veille de type VACMA équipant majoritairement les rames françaises de tramway, qui recourent à une action fréquemment répétée d'un conducteur à la seule fin que les automatismes ne le considèrent pas victime d'un malaise ou décédé. Ainsi, pour parcourir les 28 stations de la ligne 2 de Montpellier durant les 49 minutes que dure son trajet, ce conducteur devra actionner son dispositif au moins 183 fois²⁹. Celui impliqué dans l'accident, qui maintient son dispositif de veille pendant 3 à 5 secondes avant de le relâcher brièvement, l'actionne pour sa part entre 516 et 793 fois.

²⁹ Les conducteurs n'ayant pas besoin d'actionner leur veille lorsque leur rame est à l'arrêt, les calculs ont été effectués en considérant que la rame s'arrête 20 secondes à chaque station et que le dispositif de priorité du tramway aux carrefours n'entraîne aucun arrêt aux feux de signalisation.

Le BEA-TT invite les constructeurs à développer des dispositifs destinés à détecter le décès ou le malaise d'un conducteur plus ergonomiques et moins contraignants et encourage l'UTP à achever les réflexions du groupe de travail qu'il pilote sur les dispositifs de veille en vue de compléter le guide technique correspondant.

5.3 - L'adaptation des performances du freinage d'urgence

Le freinage d'urgence qui s'est automatiquement déclenché deux secondes après l'alarme suite au défaut d'actionnement du dispositif de veille a été particulièrement brutal : la rame, alors en accélération à 25 km/h, s'est arrêtée sur 4 à 6 mètres en 2 à 4 secondes. Les essais de reconstitution ont permis d'estimer sa décélération équivalente à environ 4 m/s², sa variation de décélération instantanée de l'ordre de 6 m/s² et son jerk de 6,5 m/s³. Ils ont également montré qu'ils provoquaient un déséquilibre des passagers fort à violent et une chute très probable sauf à se rattraper à un dispositif de maintien.

De telles valeurs résultent principalement du choix du constructeur de n'avoir, sur ses rames Citadis, qu'un unique freinage d'urgence aux performances élevées quels que soient les dispositifs qui le déclenchent³⁰. Ce choix ne permet pas de distinguer les situations où il est nécessaire d'avoir un freinage puissant, pour éviter un tiers ou un obstacle, des autres situations où il est préférable d'éviter les chutes des passagers en l'absence de danger avéré et imminent sur les voies.

Ce choix date des toutes premières générations des modèles de rames Citadis. Depuis décembre 2003, la norme NF EN 13452 *relative aux systèmes de freinage des transports publics urbains et suburbains*, prévoit de moduler les performances de freinage en fonction des dispositifs qui le déclenchent, et définit ainsi 4 modes : « urgence 1 » et « urgence 2 » privilégient l'équilibre des passagers, « urgence 3 » et « urgence 4 » garantissent un arrêt court.

Elle n'interdit pas de regrouper deux ou plusieurs modes afin d'optimiser la conception du matériel. Elle ne précise cependant nulle part qu'un tel regroupement peut s'effectuer au détriment du respect des seuils de performance qu'elle a définis pour chacun d'eux. Pour le cas particulier du tramway, il est ainsi possible de regrouper les modes « urgence 1 » et « urgence 2 », ainsi que les modes « urgence 3 » et « urgence 4 », mais il n'est pas possible de les regrouper tous³¹.

Le constructeur a interprété incorrectement cette possibilité de regroupement, et a conservé le seul mode de freinage « urgence 3 »³⁰, déjà présent sur ses précédents matériels, qui présente un risque de chute important même lorsqu'il n'y a pas de danger avéré et imminent.

Pour autant, les déséquilibres forts à violents constatés lors des essais de reconstitution de l'accident, l'étude sur les déséquilibres des voyageurs menée par l'IFSTTAR qui montre un risque de chute multiplié par plus de trois entre les modes « urgence 1 » et « urgence 3 » et le nombre élevé de blessés légers recensés lors de freinages d'urgence confirment l'importance du respect de tous les seuils de jerk et de décélération instantanée figurant dans la norme précitée.

En conséquence, le BEA-TT émet les recommandations suivantes :

30 À l'exception toutefois du freinage déclenché en sortie de quai, lorsqu'un voyageur actionne la poignée d'alarme. Celui-ci ne fait pas intervenir les patins magnétiques et est donc moins brutal.

31 Pour toutes les autres catégories de matériel roulant auxquelles s'applique la norme, il existe toujours une plage de valeurs qui permette de respecter simultanément tous seuils de performance exigés pour les quatre modes d'« urgence ».

Recommandation R2 (STRMTG) :

Vérifier que la norme NF EN 13452 est spécifiée dans les dossiers de sécurité des prochaines rames de tramway. En particulier, s'assurer que la conception du freinage d'urgence permet d'obtenir des performances différentes selon qu'il est déclenché par le conducteur ou par le dispositif de veille.

Recommandation R3 (Alstom) :

Examiner, en lien avec les exploitants et le STRMTG, dans quelle mesure la décélération instantanée et le jerk des rames existantes peuvent être diminués dans des conditions technico-économiques acceptables lorsqu'un freinage d'urgence est déclenché par le dispositif de veille ou par des sécurités techniques sans lien avec un danger avéré et imminent à l'extérieur de la rame.

Le BEA-TT a par ailleurs noté, lors de son examen des dossiers d'essais des rames Citadis 402 de Montpellier, que le constructeur n'a pas fait figurer les valeurs de décélération instantanée atteintes, alors que celles-ci étaient nécessairement proches des seuils de la norme sans que l'on puisse dire si elles les dépassaient ou non. En outre, le jerk excédait ces seuils bien que cela ait été justifié par la présence d'une rampe. Enfin, les essais ont été réalisés à deux vitesses de référence alors que la norme NF EN 13452 en demande au moins trois.

Le BEA-TT invite les constructeurs qui réalisent les essais de performance de freinage des rames, les EOQA qui les attestent, et le STRMTG, à porter une attention rigoureuse à leurs méthodes de réalisation et à la conformité de leurs résultats.

5.4 - La gestion de la situation accidentelle par l'exploitant

Les enregistrements des échanges entre la rame et le PCC font ressortir une gestion de la situation accidentelle essentiellement dictée par la gêne susceptible d'être occasionnée sur l'exploitation de la ligne.

Le manque de préparation du conducteur et du régulateur à une situation accidentelle à laquelle ils n'avaient jusqu'alors pas été confrontés est susceptible d'expliquer cette gestion. L'exploitant TaM a, depuis, modifié les consignes de ses conducteurs et de ses régulateurs et les a sensibilisés à la gestion de telles situations sur la base de cet accident.

Le BEA-TT en prend acte et invite la TaM à poursuivre la sensibilisation de ses agents dans la durée.

De manière similaire, le BEA-TT a précédemment constaté, lors de son enquête technique sur la chute d'un enfant sous une rame de tramway survenue le 28 avril 2013 à la station « René Cassin » à Nantes, que le PCC n'avait pas fait stopper immédiatement la rame concernée, cherchant préalablement à s'assurer de l'exactitude de l'alerte donnée par des tiers avant de prendre des mesures d'urgence. La victime avait été découverte plus de 4 minutes après sa chute, traînée par la rame sur environ 1,5 km. Le BEA-TT a recommandé à l'exploitant d'améliorer ses moyens et procédures opérationnelles de traitement des alertes.

Le BEA-TT invite en conséquence le STRMTG à s'assurer, à l'occasion des contrôles qu'il réalise auprès des exploitants de tramway, que ceux-ci dispensent à leurs conducteurs et leurs régulateurs des consignes et des formations leur permettant de gérer efficacement toute situation après un accident sans compromettre la sauvegarde de la victime.

6 - Conclusions et recommandations

6.1 - Les causes de l'accident

La chute de la victime est la conséquence directe du freinage d'urgence déclenché par le dispositif de veille automatique de type VACMA que le conducteur doit périodiquement actionner pour signifier qu'il n'est ni victime d'un malaise, ni décédé, et qu'il n'a pas activé dans les délais prévus.

Trois facteurs ont contribué à cet accident :

- la conception de la rame, qui ne module pas ses performances de freinage d'urgence en fonction du dispositif qui le déclenche, et qui applique un freinage brutal générant un très fort risque de chute lors d'un défaut d'actionnement du dispositif de veille, bien que, dans un tel cas, il n'y ait généralement pas de danger avéré et imminent de collision avec un tiers ;
- l'ergonomie de l'alarme du dispositif de veille, dont le son est moins fort et la tonalité plus feutrée que celle des autres matériels que le conducteur avait l'habitude de conduire, et dont le temps de réaction qu'elle laisse au conducteur avant de déclencher un freinage d'urgence est court ;
- l'attention du conducteur mobilisée par deux piétons cheminant sur la plate-forme, qui est vraisemblablement à l'origine du défaut d'actionnement dans les délais du dispositif de VACMA, dont la conception et les réglages sur les tramways français demandent une manipulation fréquente.

6.2 - Les recommandations

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

Recommandation R1 (STRMTG) :

Demander aux exploitants de tramway de s'assurer que le conducteur dispose d'un délai suffisant, et en tout état de cause supérieur à deux secondes, entre le moment où une alarme lui indiquant un défaut d'actionnement de son dispositif de veille se déclenche et celui où le freinage d'urgence correspondant agit.

Recommandation R2 (STRMTG) :

Vérifier que la norme NF EN 13452 est spécifiée dans les dossiers de sécurité des prochaines rames de tramway. En particulier, s'assurer que la conception du freinage d'urgence permet d'obtenir des performances différentes selon qu'il est déclenché par le conducteur ou par le dispositif de veille.

Recommandation R3 (Alstom) :

Examiner, en lien avec les exploitants et le STRMTG, dans quelle mesure la décélération instantanée et le jerk des rames existantes peuvent être diminués dans des conditions technico-économiques acceptables lorsqu'un freinage d'urgence est déclenché par le dispositif de veille ou par des sécurités techniques sans lien avec un danger avéré et imminent à l'extérieur de la rame.

En outre, le BEA-TT :

- engage les constructeurs à développer des dispositifs destinés à détecter le décès ou le malaise d'un conducteur plus ergonomiques et moins contraignants, et encourage l'UTP à achever les réflexions du groupe de travail qu'il pilote sur les dispositifs de veille en vue de compléter le guide technique correspondant ;*
- invite les constructeurs qui réalisent les essais de performance de freinage des rames, les EOQA qui les attestent et le STRMTG, à porter une attention rigoureuse à leurs méthodes de réalisation et à la conformité de leurs résultats ;*
- incite le STRMTG à s'assurer, à l'occasion des contrôles qu'il réalise auprès des exploitants de tramway, que ceux-ci dispensent à leurs conducteurs et leurs régulateurs des consignes et des formations leur permettant de gérer efficacement toute situation après un accident sans compromettre la sauvegarde de la victime.*

Pour mémoire, le dispositif de veille de type VACMA équipant la majorité des rames de tramway français fait actuellement l'objet d'analyses concernant les risques qu'il est susceptible de générer sur la santé des conducteurs. Cet aspect ne relève pas des compétences du BEA-TT et n'a donc pas été pris en compte dans le présent rapport d'enquête technique.

ANNEXES

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête



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

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

Le Directeur

La Défense, le 14 septembre 2012

DECISION **BEA-TT 2012 - 013**

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

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

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

Vu les circonstances de l'accident de personne survenu le 3 septembre 2012 dans une rame du réseau de tramway de l'agglomération de Montpellier (Hérault) et l'accord du ministre chargé des transports ;

décide

Article 1 : Une enquête technique est ouverte en application du titre II du livre VI de la 1^{re} partie du code des transports sur la chute mortelle d'un voyageur dans une rame de tramway effectuant un freinage d'urgence survenue le 3 septembre 2012 à Montpellier (34).

Le Directeur du BEA-TT

Claude AZAM



Bureau d'Enquêtes sur les Accidents de Transport Terrestre



Tour Pascal B

92055 La Défense cedex

Téléphone : 01 40 81 21 83

Télécopie : 01 40 81 21 50

bea-tt@developpement-durable.gouv.fr

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

