



HAL
open science

Évaluation de l'adhérence de pneumatiques sur pistes comme un paramètre de la sécurité des métros automatiques

Alex Coiret, Pierre-olivier Vandanjon, Hervé Montalva

► To cite this version:

Alex Coiret, Pierre-olivier Vandanjon, Hervé Montalva. Évaluation de l'adhérence de pneumatiques sur pistes comme un paramètre de la sécurité des métros automatiques. *RTS. Recherche, transports, sécurité*, 2017, 2017 (01-02), pp.23-29. <10.4074/S0761898017002023>. <hal-01670595>

HAL Id: hal-01670595

<https://hal.science/hal-01670595v1>

Submitted on 21 Dec 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Évaluation de l'adhérence de pneumatiques sur pistes comme un paramètre de la sécurité des métros automatiques

Evaluation of the adhesion of tires to tracks as a parameter of automatic metro safety

Alex Coiret · Pierre-Olivier Vandanjon · Hervé Montalva

© IFSTTAR et Éditions NecPlus 2017

Résumé Les métros automatiques, sans conducteurs, sont en déploiement important depuis des décennies et offrent de hauts niveaux de service et de sécurité. S'affranchir du facteur humain peut en effet augmenter ces niveaux en exploitation courante mais des protocoles robustes de commande sont alors requis pour pallier l'absence des qualités humaines d'anticipation et d'adaptation en situations exceptionnelles. De tels protocoles, dits d'anti-collision, sont généralement basés sur une performance minimale de freinage garantie associée à un découpage de l'infrastructure en cantons, fixes ou mobiles, assurant qu'il ne puisse y avoir simultanément plus d'un véhicule sur le même canton. En particulier, un système de métro automatique sur pneu est présenté dans cet article. Des résultats d'essais de freinage de rames montrent l'efficacité de traitements visant à améliorer l'adhérence pneumatique/piste de roulement. L'entretien des pistes pour maintenir un bon niveau de freinage est discuté pour les techniques courantes de striage et de grenailage des pistes. Enfin, une méthodologie pour permettre le suivi des pistes en temps et en espace est proposée. Elle inclut la sélection et l'emploi de matériels d'évaluation de l'adhérence issus du domaine routier.

Mots-clés métro automatique · pneumatique · freinage · adhérence · maintenance · sécurité.

Abstract Automated, driverless metros have been deployed extensively for decades and offer high levels of service and safety. Freeing the human factor can indeed increase these levels in current operation but robust control protocols are then required to compensate for the lack of human qualities

Alex Coiret (✉)

Lunam université, Ifsttar, CS 4, 44344 Bouguenais, France.
e-mail : alex.coiret@ifsttar.fr

Pierre-Olivier Vandanjon (✉)

Lunam université, Ifsttar, CS 4, 44344 Bouguenais, France.
e-mail : pierre-olivier.vandanjon@ifsttar.fr

Hervé Montalva (✉)

Tisséo, 4 Impasse Paul Mesple, 31100 Toulouse, France.
e-mail : herve.montalva@tisseo.fr

of anticipation and adaptation in exceptional situations. Such protocols, called anti-collision protocols, are generally based on a guaranteed minimum braking performance associated with a discretization of the infrastructure in fixed or mobile cantons, ensuring that there can not be more than one vehicle in a given zone at the same time. In particular, an automatic metro system is presented in this work. Results of train brake tests show the effectiveness of treatments to improve tire/track adhesion. Maintenance of the tracks to maintain a good level of braking is discussed for the common techniques of striping and blasting tracks. Finally, a methodology for monitoring tracks in time and space is proposed. It includes the selection and use of friction measuring equipment from the road sector.

Keywords unmanned metro · tire · braking · grip · maintenance · safety

Introduction

Les métros automatiques, sans conducteur à bord, sont en exploitation depuis plusieurs décennies. Le premier en a été le Véhicule automatique léger (VAL), qui a été développé dans les années 1970 [1-3] puis déployé par les constructeurs Matra puis Siemens pour la ville de Lille en 1983. Ce système s'est développé en France et à l'international : aéroport d'Orly (Orlyval ; 1991), aéroport de Chicago aux États-Unis (1993), Toulouse (1993), Taipei en république de Chine (1996), Rennes (2002), Turin en Italie (2006), Uijeongbu en Corée du Sud (2012).

Le déploiement des métros automatiques s'est aussi fait par exemple à Copenhague, Rome et Milan par Ansaldo STS, à Lausanne par Alstom ou encore à Londres par Bombardier pour la ligne Victoria, juste avant les jeux Olympiques de 2012. La ligne D du métro de Lyon a été la première ligne automatique, en 1991, à exploiter des cantons mobiles déformables, qui évoluent selon l'abscisse du train précédent au lieu d'être fixes sur l'infrastructure, grâce à l'automatisation de gestion informatique du Métro automatique à grand gabarit de l'agglomération lyonnaise (Maggaly) [4], et non plus seulement électromécanique comme pour le VAL.

Enfin, la ligne 14 du métro de Paris a été automatisée dès sa construction en 1998 en exploitant le Système informatique de Siemens d'automatisation de l'exploitation des trains (SAET) de Siemens de gestion informatique également (système). Ce système a innové en permettant la mixité des trains automatiques et manuels. Il a été transposé en 2011 à l'automatisation de la ligne 1 qui a une fréquentation sept fois supérieure à celle de la ligne 14.

Pour assurer la sécurité des métros automatiques, l'anti-collision est toujours construite autour du principe de cantons, fixes ou mobiles, dans lesquels il ne doit pas se trouver plus d'un véhicule. La communication est souvent de type centralisée, avec des possibilités de mise en attente de véhicules déterminés ou de coupure de courant sur toute la ligne en cas de difficulté majeure [5].

L'automatisation des métros visait, depuis les premiers développements dans les années 1970, à un haut niveau de service et de sécurité. Contrairement aux systèmes informatiques plus récents, dont la sécurité est probabiliste, la sécurité du VAL est basée sur le concept de sécurité intrinsèque, c'est-à-dire que l'énergie dans le système est toujours inférieure au niveau requis pour qu'un accident se produise. Dans la suite de cet article nous allons nous intéresser à ce système VAL. Cela a récemment été justifié par la mise en défaut partiel de sa sécurité intrinsèque face à la dégradation au long terme de l'adhérence pneumatique/pistes. Ce choix d'étude est aussi conforté par le rayonnement large du VAL.

Hors de ce contexte spécifique d'adhérence insuffisante, l'automatisation du VAL autorise des temps inter-rames de l'ordre de la minute et une sécurité renforcée par l'alignement et la synchronisation des portes des rames avec des portes vitrées séparant le quai des rames [5]. Les automatismes d'anti-collision incluent aussi des marges de sécurité importantes pour pallier les qualités de conducteurs tels que l'anticipation et la prise en compte d'événements d'environnement [6]. Ces marges de sécurité sont basées sur une décélération minimale en cas de freinage d'urgence. Cette décélération minimale est, en théorie, très en dessous des capacités de freinage, conformément au concept de la sécurité intrinsèque. L'architecture sans conducteur, autour d'un poste central, s'avère finalement être une solution sûre et compatible avec un transport à haute fréquence de service [7].

Cette architecture inclut la génération d'alertes par les véhicules vers le poste central de contrôle, en particulier pour des anomalies de rotation des roues comme des blocages ou patinages. Ces alertes jouent le rôle de précurseurs, la fréquence de leur occurrence en un point pouvant être rapprochée d'une dégradation locale du freinage ou de la traction et, donc, permettent de détecter des points de faiblesse du réseau vis-à-vis du système de freinage.

Le suivi de ces alertes est cohérent avec les travaux de Kyriakidis [8] qui montrent une corrélation positive, pour les accidents de métro, entre les bilans humains, les incidents et les événements précurseurs. Dans ce cas, l'application de la pyramide de sécurité d'Heinrich [9] a ainsi été montrée pour le domaine des métros, promouvant ainsi le suivi des événements précurseurs aux accidents, dans le but de réduire la probabilité d'incidents plus sérieux ou d'accidents [8].

Dans cet article, il va être montré que si ce suivi d'alerte est nécessaire il n'est pas suffisant, et qu'une évaluation régulière des paramètres de sécurité est nécessaire. La démonstration se base sur des expérimentations qui ont été imaginées à partir d'un incident réel. La première partie de cet article présente le contexte expérimental, c'est-à-dire, la description de cet incident ainsi qu'une description suffisante du système du métro automatique pour comprendre les expérimentations. Les expérimentations sont alors décrites : elles concernent des essais effectués avant et après le traitement des pistes. Cette partie comprend des résultats qui sont analysés dans la section suivante. Enfin, la dernière partie présente une méthodologie d'évaluation du niveau de sécurité intrinsèque.

Contexte expérimental

Après 20 ans d'exploitation sans problème majeur d'une ligne de métro automatique à pneumatiques sur piste métallique, de type VAL, un gestionnaire de métro a été confronté à une distance d'arrêt trop longue d'une rame, dépassant les spécifications du cahier des charges des automatismes. Ce freinage a été réalisé sur une section en aval d'une zone aérienne où il y avait de fortes pluies. Les roues ont subi une forte abrasion (Fig. 1) car elles ont été maintenues bloquées, en freinage d'urgence, sur une longue distance. Le retour d'expérience de métros de technologies différentes sur d'autres sites montre que ce problème n'est pas un cas isolé. Il est consécutif à une usure normale des pistes de roulement et à des conditions météorologiques défavorables. L'état des pistes doit donc être évalué régulièrement avec des moyens supplémentaires à celui du suivi des alertes. En effet, le suivi des alertes est un indicateur utile mais il oriente les actions de maintenance sur les lieux de freinage et de démarrage habituels, au détriment, en quelque sorte, de lieux de freinage occasionnels. Ce cas d'étude va être développé dans la suite de cet article.

Un système de métro automatique consiste en des parties physiques, de communication, de réseau et d'algorithmes décisionnels [7]. En exemple, la partie physique du système VAL est illustrée en Fig. 2a pour les pistes, les rails de guidage latéraux et les goulottes de programme filaires de vitesse, et en Fig. 2b pour une vue détaillée d'une piste striée, en surface de profil acier type IPN.



Fig. 1 Détérioration sur pneumatique freiné sans rotation

Les pneumatiques porteurs des rames roulent sur les pistes de roulement et les rames sont guidées par des pistes latérales en voie courante et par un rail central en zone d'appareil de voie. Pour améliorer les propriétés de contact les pistes peuvent être striées (Fig. 3 : exemple de stries en arc de cercle au moyen d'une machine de découpe à disque). Ces stries doivent être débouchantes sur l'extrémité de la piste pour permettre l'évacuation de l'eau. En entretien il est possible de grenailer la surface par projection sous haute pression de fines billes d'acier ou de contre-strier les pistes, avec des courbures de sens inverse.

La sécurité n'est pas complètement intrinsèque à l'infrastructure, puisqu'elle dépend d'une interaction avec les rames. Néanmoins, elle repose sur trois aspects principaux concernant surtout l'infrastructure :

- le découpage de la ligne en cantons, fixes ou mobiles, dans lesquels les automatismes doivent n'autoriser la présence que d'une rame au plus ;

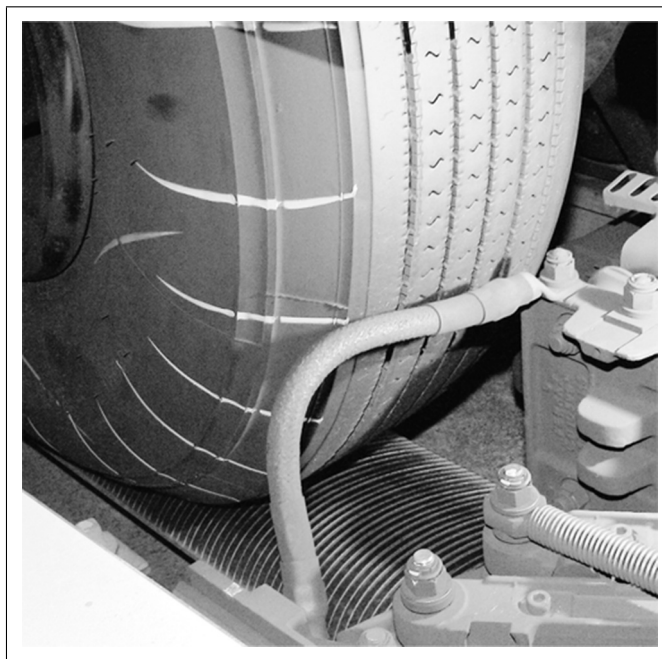


Fig. 3 Vue en situation d'un pneumatique en contact d'une surface striée de piste

- l'existence de programmes de vitesses sur ces cantons, souvent liés à l'infrastructure sous la forme de boucles ou d'indicateurs physiques (en Fig. 4 ; un freinage d'urgence est activé dès que l'on s'écarte trop du programme préconisé de vitesse) ;
- une décélération minimale garantie γ_{min} dont le niveau est choisi en hypothèse préalable à l'établissement des programmes de vitesse.

Dans la partie suivante, c'est ce système expérimental qui a été exploité pour évaluer sa conformité aux spécifications de sécurité intrinsèque ainsi que l'efficacité de techniques de maintenance.

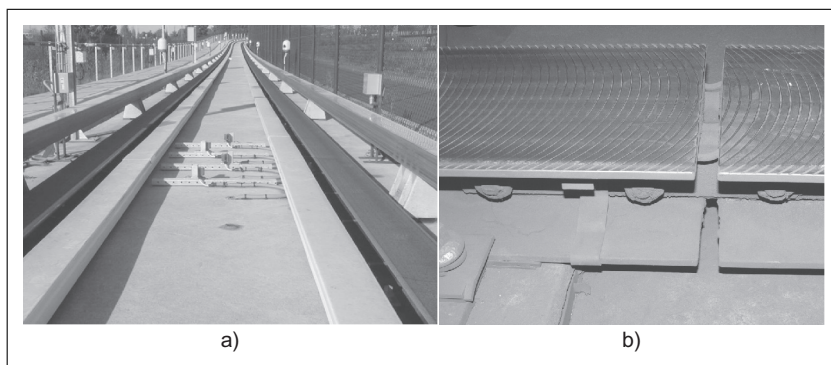


Fig. 2 a) vue générale d'une zone aérienne ; b) détail transversal d'un profilé de piste

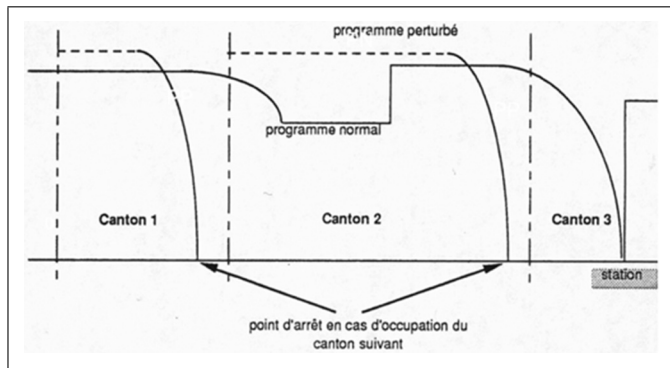


Fig. 4 Exemple de programmes de vitesse selon la discrétisation en canton fixe (source VAL)

Expérimentations

La sécurité intrinsèque du VAL repose sur une valeur de décélération minimale garantie γ_{\min} . Malgré le choix d'un seuil particulièrement bas pour cette valeur par le constructeur du métro concerné, de manière sécuritaire, il s'avère qu'après 20 ans d'exploitation la décélération a été inférieure à ce minimum garanti lors de l'événement précédemment présenté. Cela s'est produit en conditions météorologiques très défavorables avec de fortes pluies sur la section aérienne juste en amont de l'anomalie de freinage. Cet état de fait a conduit le gestionnaire à développer une méthodologie de sécurisation.

Avant une analyse plus poussée, le gestionnaire a assuré une mise en sécurité du réseau par l'adoption d'un mode dit de « précaution » lors des alertes météorologiques. Ce mode précaution consiste à n'autoriser une rame à quitter une station que lorsque l'inter-station et la station suivante sont libres. L'entrée et la sortie du mode précaution sont des phases longues et pénalisantes pour l'exploitation de la ligne, cependant l'occurrence de forts glissements dans ce mode n'est pas susceptible d'engendrer des collisions.

Dans un deuxième temps, des essais de freinage d'urgence de rames ont montré que des glissements importants pouvaient être reproduits de manière semblable à ceux qui ont conduit à l'anomalie de freinage initiale. Pour reproduire ces freinages de décélération insuffisante, des systèmes de mouillage de piste ont été installés sur plusieurs zones de la ligne de métro. Ils maintiennent un film d'eau d'environ 2 mm sur les pistes, semblable à ce qui avait été observé lors de l'incident. Deux types de rames ont été utilisés. Ces types sont notés par la suite T1 et T2 de manière générique car c'est la méthodologie qui est ici privilégiée. On peut noter cependant que ces rames ont des

différences notamment en termes de dimensions de roues et de motorisation.

La Table 1 synthétise les distances d'arrêt résultant de ces freinages. D'importantes distances d'arrêt sont relevées, particulièrement pour les rames de type T1, avec des dépassements de dizaines de mètres des points de fin de programme.

Ceci est une situation dangereuse, ce point étant localement le lieu limite d'arrêt prévu au programme de décélération en mode perturbé (voir aussi Fig. 4). Pour deux lieux avec cette rame T1, ce point est dépassé de 11 et 46 mètres. Les rames de type T2 sont moins impactées par l'état altéré des pistes, mais avec des dimensions de jante et des hauteurs de pneumatique différentes de celles des rames de types T1. (les inerties varient également).

L'origine des glissements est complexe, entre les rôles des pneumatiques, de la présence d'eau ou de grêle, de la dynamique de freinage des rames en descente, en dévers, en virage, et de celui des caractéristiques de surfaces des pistes.

Toutefois nous avons émis l'hypothèse que les caractéristiques de surfaces des pistes sont les facteurs principalement en cause. Il a été choisi de les remettre à niveau, par la réalisation de travaux de réfection. Les autres facteurs influents sont en cours d'évaluation dans une recherche de long terme.

Le retour d'expérience partagé de plusieurs gestionnaires de métro à pneumatiques sur pistes métalliques montre que des défauts d'adhérence liés à l'usage ont pu être supprimés par des techniques de grenailage des pistes à l'aide de billes d'acier et des techniques de contre-striage.

Pour le cas d'étude qui nous intéresse, le gestionnaire a choisi d'appliquer simultanément ces deux techniques de remise à niveau. Le grenailage a été réalisé avant le contre-striage pour éviter d'émousser les arrêtes des stries, qui participent à l'adhérence en permettant l'indentation hystérétique de la gomme des pneumatiques. La Fig. 5 présente l'état visuel de la surface traitée et non traitée.

La vérification de la mise en conformité selon la spécification de décélération minimale garantie γ_{\min} a été ensuite réalisée indirectement en vérifiant les distances d'arrêt de rames. Des essais ont été réalisés après traitements, toujours en conditions de mouillage important.

La Table 2 présente les résultats de distance d'arrêt pour les différents sites, pour les deux types de rames exploitées T1 et T2. Les distances calculées sont des moyennes de trois essais de freinage pour les surfaces traitées. Pour les surfaces initiales il n'y a eu qu'une répétition car les roues en situation bloquée sur de longues distances ont présenté des usures localisées fortes en « plat ».

Table 1 Distances d'arrêt expérimentées sur la ligne de métro après l'anomalie de freinage

Lieu d'essai	Type de rame	Distance d'arrêt (m)	
		Depuis le point de freinage	Relativement au point « fin de programme »
Pente 1	T1	211	46
Pente 2		191	11
Pente 3		205	-49
Pente 1	T2	149	-26
Pente 2		160	-24
Pente 3		106	-153

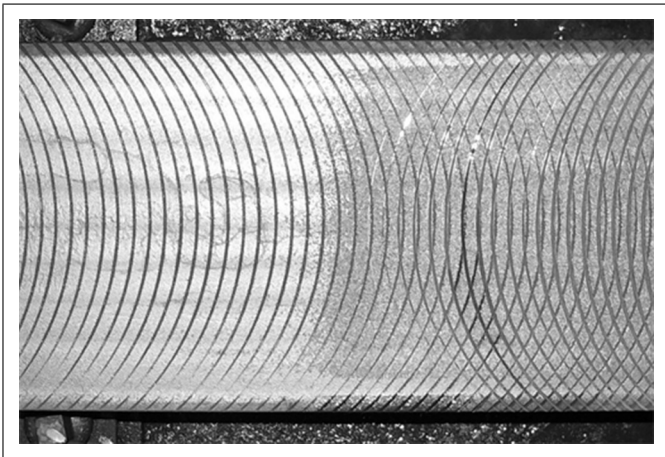


Fig. 5 Zone de transition : piste d'origine (partie de gauche), et piste traitée par grenailage et contre-striage (partie de droite)

Analyse

Ces résultats amènent l'analyse suivante :

- Les distances d'arrêt après travaux se révèlent satisfaisantes, en conformité avec les programmes de vitesse des automatismes. Ceci valide notre hypothèse initiale sur la dégradation des caractéristiques de surface des pistes.
- Avant travaux, le type de rame T1 a été particulièrement sensible à l'état initial dégradé des pistes, avec des distances d'arrêt comprises entre 191 et 211 mètres selon les sites ;
- Avant travaux, le type de rame T2 a présenté une meilleure performance, probablement en raison de ses systèmes de transmission et de freinage un peu plus évolués ;
- Après travaux, la distance d'arrêt du type T2 sur le lieu Pente 1 a cependant été anormalement élevée, mais il s'avère que la vitesse au point de freinage était excessive

pour les répétitions concernées. Il convient de ne pas prendre en compte ce cas de figure.

Méthodologie d'évaluation du niveau de sécurité intrinsèque

Dans ce cas d'étude, la remise à niveau des propriétés de surface est réalisée et vérifiée. Néanmoins, le maintien de ces propriétés nécessitera de suivre leurs évolutions dans le temps afin de réaliser les entretiens périodiques en temps utile. Il est aussi impératif de réaliser ce suivi en tout point de l'infrastructure puisqu'il peut être nécessaire, en exploitation normale, de réaliser un freinage d'urgence en tout lieu. Chaque point du réseau doit donc présenter des propriétés de surfaces suffisantes.

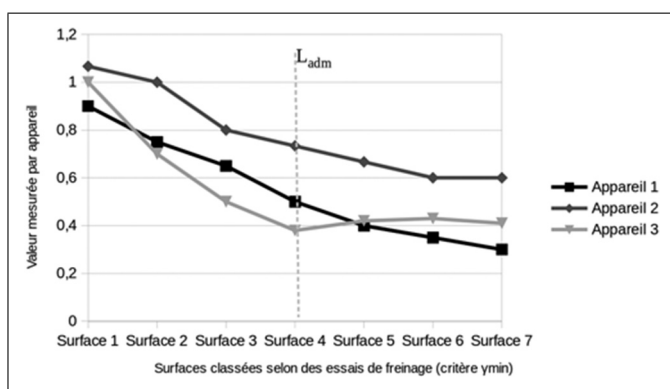
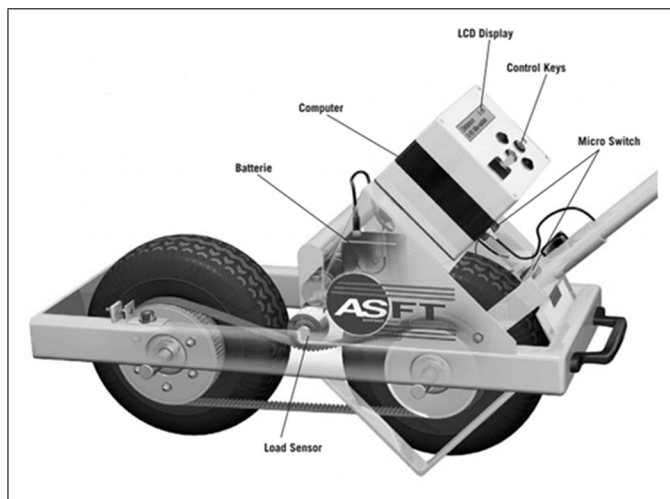
Il faut finalement disposer d'un outil de leur suivi dans le temps et sur l'étendue de l'infrastructure, en tant qu'aide au gestionnaire chargé de la maintenance et de l'exploitation.

Pour cela, on peut penser à des appareils de mesure de l'adhérence issus du domaine routier : le pendule SRT [10] de mesure ponctuelle ou les appareils de mesure continue mobiles tels que le *grip-tester* [11] ou le *Test To Go (T2GO)*, Fig. 7). Avant de penser à transposer l'un de tels appareils, il convient de s'assurer du caractère discriminant de leurs mesures face à des pistes ayant de nombreuses caractéristiques de surfaces. Compte tenu du contexte de sécurité intrinsèque des VAL, l'évaluation par un appareil de suivi doit être discriminante face à des décélérations moyennes réalisées lors d'essais de freinage d'une rame de référence.

Une méthodologie générique consisterait donc à sélectionner un appareil de mesure par classement puis à l'exploiter en suivi périodique sur l'ensemble du réseau à évaluer. La sélection par classement de trois appareils est illustrée en Figure 6. Sept surfaces y sont classées en fonction de la décélération moyenne qu'elles ont autorisée lors d'essais de freinage d'une rame. La Limite admissible de classement par surfaces, L_{adm} , partage les surfaces en

Table 2 Distances d'arrêt avant et après travaux de réfection

Lieu d'essai	Type de rame	Distance d'arrêt (m)	
		surface initiale	Surface traitée
Pente 1	T1	211	115
Pente 2	T1	191	98
Pente 3	T1	205	92
Pente 1	T2	149	158
Pente 2	T2	160	103
Pente 3	T2	106	85

**Fig. 6** Hypothèse de discrimination par différents appareils**Fig. 7** Appareil T2GO (© ASFT Swiss AG, ASFT Industries AB)

deux groupes dont les propriétés sont acceptables ou non. Sur la Fig. 6, les surfaces 1 à 4 représentent ainsi les surfaces compatibles avec la décélération minimale garantie γ_{min} , spécifiée pour la sécurité intrinsèque du système. Dans ce

cas de figure, les appareils 1 et 2 sont discriminants pour les surfaces selon la limite L_{adm} ; l'appareil 3 ne l'est pas puisqu'il n'autorise pas un classement relatif à la limite L_{adm} . En effet, une valeur mesurée de 0,42 par cet appareil peut à la fois correspondre à une surface de propriétés acceptables (classe de surface 3) et non acceptable (classe de surface 5).

En dernier point, un appareil de mesure sélectionné et exploité par une telle méthodologie devrait voir la pertinence de sa discrimination ré-évaluée face au groupe de surfaces si les propriétés de ces dernières venaient à changer significativement, en qualité ou en nature.

Conclusion

L'automatisation des métros a autorisé un haut niveau de service de ce moyen de transport, avec des temps inter-véhiculaires très courts de l'ordre de la minute, ce qui représenterait une tâche de conduite difficile pour un conducteur. L'exploitation sans incident notable de ce type de transport depuis des décennies montre la robustesse des stratégies de sécurité développées par les constructeurs.

Néanmoins, des essais de freinage d'urgence ont montré une insuffisance des propriétés de surfaces de certaines pistes particulièrement anciennes et ont incité le gestionnaire à étendre les moyens précédents d'évaluation de ces propriétés, après avoir mis en œuvre des techniques efficaces de réhabilitations. Ainsi le classique suivi des précurseurs gagnera à être complété de tests réguliers de freinage et de mesures ponctuelles ou continues de l'adhérence dont l'interprétation devra être reliée à la notion fondamentale de distance d'arrêt au moyen de matériels discriminants.

La sécurité intrinsèque de systèmes automatiques comme le VAL peut être mise en défaut par une évolution à long terme des propriétés de surface de pistes. Cela est

exceptionnel et le suivi périodique de ces propriétés tendrait à y remédier. Il est à noter en dernier lieu que le problème de décélération minimale insuffisante se pose autant pour une rame en conduite manuelle qu'en conduite automatique, puisque le défaut n'est pas prévisible ni appréhendable en situation de conduite.

Références

- Gabillard, R (1971) *Inventaire et analyse de solutions technologiques d'automatisme – Étude de systèmes pour un moyen de transport en commun discontinu en site propre*. document EPALE – annexe 1.
- Gabillard, R (1971) Procédé permettant l'exploitation d'un ensemble de véhicules circulant en ordre immuable sur une ligne propre en circuit fermé. Brevet déposé le 2 juillet 1971.
- Lestamps, JP (1974) *Étude et réalisation d'un pilote automatique destiné à la simulation des fonctions de conduite et de régulation d'un véhicule d'une ligne de transport en site propre*. Thèse Docteur-Ingénieur, Lille, France.
- SIEMENS, Transportation Systems (2006), *Trainguard MT CBTC, The Moving Block Communications-Based Train Control Solution*, Brochure Siemens, 7 sept. 2006, 12 pages.
- Hill, R (1995) The Toulouse Metro and the South Yorkshire Supertram: a cross cultural comparison of light rapid transit developments in France and England. *Transport Policy* 2(3): 203–216.
- Karvonen, H, Aaltonen, I, Wahlström, M *et al.* (2011) Hidden roles of the train driver: A challenge for metro automation. *Interacting with Computers* 23(4): 289–298.
- Uster, G, Heddebaut, M, Couvreur, G *et al.* (1990) Operation and evolution of the VAL in Lille. *Control, Computers, Communications in Transportation*, selected papers from Ifac symposium, pp. 167–175, Paris, France, 1989.
- Kyriakidis, M, Hirsch, R, Majumdar, A (2012) Metro railway safety: An analysis of accident precursors. *Safety Science* 50: 1535–1548.
- Heinrich, H-W (1931) *Industrial Accident Prevention: A Scientific Approach*. McGraw-Hill.
- Bassi, A-C (1965) Measurement of friction of elastomers by the skid resistance tester. *Wear* 8(2): 154
- Coiret, A (2005) Spectroscopic evaluation of pavement wetting states: Influence on tire/road friction. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées* 255: 137–155.

