

BEA-TT
Bureau d'enquêtes sur les Accidents
de transport terrestre
Les rapports

Rapport d'enquête technique
sur la collision entre un tramway
et une voiture particulière
survenue le 4 juin 2007
à Saint-Herblain (44)

décembre 2008

Ressources, territoires et habitats
Énergie et climat
Prévention des risques
Développement durable
Infrastructures, transports et mer

**Présent
pour
l'avenir**



Conseil Général des Ponts et Chaussées

Le 18 décembre 2008

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

Affaire n°BEATT-2007-008

**Rapport d'enquête technique
sur la collision entre un tramway
et une voiture particulière
survenue le 4 juin 2007
à Saint-Herblain (44)**

Bordereau documentaire

Organisme (s) commanditaire (s) : Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire ; MEEDDAT

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

Titre du document : Rapport d'enquête technique sur la collision entre un tramway et une voiture particulière survenue le 4 juin 2007 à Saint-Herblain (44)

N°ISRN : EQ-BEATT--08-13-FR

Proposition de mots-clés : accident, carrefour giratoire, implantation de la signalisation, gestion de la circulation, transport en commun urbain ...

Avertissement

L'enquête technique faisant l'objet du présent rapport est réalisée dans le cadre du titre III de la loi n°2002-3 du 3 janvier 2002, et du décret n°2004-85 du 26 janvier 2004, 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'évènement 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- Engagement de l'enquête.....	13
2- Constats immédiats et organisation de l'enquête.....	15
2.1- L'accident.....	15
2.2- Les secours.....	16
2.3- Le bilan.....	17
2.3.1- Corporel.....	17
2.3.2- Matériel.....	17
2.4- Organisation de l'enquête.....	17
3- Éléments de contexte.....	19
3.1- Le réseau nantais.....	19
3.2- L'exploitant.....	20
3.3- Le matériel roulant.....	20
3.3.1- Description générale du TFS (véhicule en cause dans l'accident).....	20
3.3.2- La maintenance du matériel roulant.....	21
3.4- Consignes de sécurité en exploitation des tramways de la SEMITAN.....	21
3.4.1- Sécurité des circulations des tramways.....	21
3.4.2- Intervention en cas d'accident grave.....	23
4- Compte-rendu des investigations effectuées.....	25
4.1- Résumé des témoignages.....	25
4.1.1- Témoignage du conducteur de la rame de tramway.....	25
4.1.2- Témoignage du conducteur du Renault Espace accidenté.....	26
4.1.3- Témoignage d'un passager de la rame de tramway.....	26
4.1.4- Témoignages de personnes se trouvant sur les lieux, piétons ou automobilistes.....	26
4.2- Constats concernant les véhicules accidentés.....	27
4.2.1- Les dégâts constatés sur la rame.....	27
4.2.2- Les dégâts constatés sur le véhicule routier.....	27
4.2.3- Les dégâts constatés sur les éléments fixes.....	28
4.3- Analyse des enregistrements et de la main courante du PCC.....	29
4.3.1- Analyse des données issues de la centrale tachymétrique.....	29
4.3.1.1- Parcours de la rame depuis la station « Schoelcher ».....	29
4.3.1.2- Parcours de la rame entre les deux chocs.....	31
4.3.2- Analyse de la vidéo.....	32
4.3.3- Analyse de la main courante du PCC.....	33
4.4- Éléments relatifs aux conducteurs.....	34
4.4.1- Le conducteur du tramway.....	34

4.4.2-	Le conducteur de la voiture particulière.....	34
4.5-	Éléments relatifs au freinage du tramway.....	34
4.5.1-	Le système de freinage du TFS.....	34
4.5.2-	Mise en perspective du système de freinage du TFS par rapport à celui de matériels plus modernes.....	38
4.5.3-	Performances requises pour le TFS de Nantes.....	38
4.5.4-	La capacité de freinage de la rame accidentée.....	38
4.5.5-	Les pratiques de l'exploitant lors de l'isolation de freins mécaniques sur un TFS.....	40
4.6-	L'aménagement et le fonctionnement du giratoire « Vasco de Gama ».....	40
4.6.1-	le guide CERTU/STRMTG.....	40
4.6.2-	Géométrie.....	41
4.6.3-	Équipements et signaux lumineux.....	42
4.6.4-	Fonctionnement du carrefour giratoire.....	45
4.6.5-	Les obstacles fixes.....	48
4.7-	Retour d'expérience sur les accidents de tramway en giratoire.....	49
4.7.1-	L'accidentologie du giratoire « Vasco de Gama ».....	49
4.7.2-	L'accidentologie sur les giratoires du réseau de tramway nantais.....	49
4.7.3-	Retour d'expérience sur des accidents similaires.....	51
4.7.4-	Bilan des expérimentations entreprises à Nantes.....	52
4.7.4.1-	Par le CETE du sud-ouest - la « ZELT ».....	52
4.7.4.2-	Par le STRMTG.....	53
4.7.5-	Etude accidentologique du STRMTG sur les giratoires traversés par des tramways.....	54
4.7.6-	Les questions ouvertes.....	54
4.8-	Mesures prises depuis l'accident.....	55
4.8.1-	Programme de remise à niveau des carrefours giratoires proposé par la SEMITAN.....	55
4.8.2-	Le programme de déplacement des poteaux de LAC.....	56

5- Déroulement reconstitué de l'évènement..... 57

5.1-	Parcours et conduite des véhicules impliqués.....	57
5.1.1-	La voiture particulière et son parcours avant l'accident.....	57
5.1.2-	Le tramway et sa conduite avant l'accident.....	58
5.2-	Les phases successives de la collision.....	59
5.2.1-	Reconstitution cinématique.....	59
5.2.2-	Le choc initial entre le tramway et la voiture.....	60
5.2.3-	Le choc contre le poteau support de LAC.....	61
5.3-	Les suites de l'accident et l'intervention des secours.....	61

6- Analyse des facteurs et orientation préventive..... 65

6.1-	L'aménagement et le fonctionnement du carrefour Vasco de Gama.....	65
6.1.1-	Géométrie du carrefour.....	65
6.1.2-	Signalisation du carrefour.....	66
6.1.2.1-	La signalisation en entrée de carrefour.....	66
6.1.2.2-	La signalisation en barrage.....	68
6.1.3-	Les obstacles.....	70
6.2-	Le déclenchement du frein d'urgence.....	70
6.3-	La conception du matériel et les équipements du tramway.....	71
6.3.1-	Avertisseur sonore.....	71

6.3.2- La conception des avants de tramway.....	71
6.3.3- Les moyens techniques d'information embarqués.....	72
Les moyens vidéo.....	72
La boîte noire.....	72
6.3.4- Capacité de freinage.....	73
6.4- L'organisation du travail et la conduite du tramway.....	73

7- Conclusions et recommandations..... 75

7.1- Identification des causes et facteurs associés ayant concouru à l'accident.....	75
7.1.1- Cause directe.....	75
7.1.2- Autres facteurs causaux.....	75
7.1.3- Autres facteurs ayant pu jouer un rôle dans l'accident.....	75
7.1.4- Facteurs ayant pénalisé l'analyse de l'accident.....	76
7.2- Recommandations émises.....	76

ANNEXES 79

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête	81
Annexe 2 : Les signaux routiers aux interfaces avec une ligne de tramway.....	82
Annexe 3 : Plan détaillé du giratoire Vasco de Gama – Ligne 1 de tramway.....	84
Annexe 4 : Rapport d'expertise sur la cinématique de l'accident réalisé par le laboratoire « Euro Crash » de l'Ecole centrale de NANTES.....	85
Annexe 5 : Retour d'expérience sur des événements similaires.....	103
Annexe 6 : Analyse accidentologique des giratoires.....	111

Glossaire

- **AOT** : Autorité Organisatrice des Transports
- **BHNS** : Autobus à Haut Niveau de Service (y/c trolleybus). Lignes satisfaisant à un ensemble de critères d'efficacité et de performance (circulation en site propre, priorité aux feux, fréquence, amplitude horaire ...)
- **BIRMTG** : Bureau Interdépartemental des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés
- **Brimon** : Engin mixte (roues/rail) de dépannage et de levage TW
- **CERTU** : Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques
- **CETE** : Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement
- **CHU** : Centre Hospitalier Universitaire
- **CUN** : Communauté Urbaine de Nantes
- **DDE** : Direction Départementale de l'Equipement
- **DGITM** : Direction Générale des Infrastructures des Transports et de la Mer
- **DSCR** : Direction de la Sécurité et de la Circulation Routière
- **FMS** : Freinage Maximal de Service
- **FNS** : Freinage Normal de Service
- **FS** : Freinage de sécurité
- **FU** : Freinage d'Urgence
- **GART** : Groupement des Autorités Responsables des Transports
- **GLO** : Gabarit Limite d'Obstacle
- **IISR** : Instruction Interministérielle sur la Signalisation Routière
- **LAC** : Ligne Aérienne de Contact
- **LF** : Ligne de feux
- **Manipulateur** : Manoeuvre de commande de l'avancement du TW, à déplacement linéaire
- **OPJ** : Officier de Police Judiciaire
- **PCC/PC** : Poste de Commandement et de Coordination
- **PIS** : Plan d'Intervention et de Secours
- **RSE** : Règlement de Sécurité et d'Exploitation
- **SAMU** : Service d'Aide Médicale Urgente
- **SEMITAN** : Société d'Economie Mixte des Transports en Commun de l'Agglomération Nantaise
- **STRMTG** : Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés
- **TFS** : Tramway Français Standard
- **TRANSDEV** : Opérateur de réseaux urbains et interurbains dans le monde
- **UTP** : Union des Transports Publics
- **VSAB** : Véhicule de Secours et d'Assistance aux Blessés
- **ZELT** : Zone Expérimentale et Laboratoire de Trafic, CETE du Sud-Ouest. Laboratoire national réalisant des travaux sur la gestion des déplacements en transport terrestre.

Résumé

Le 4 juin 2007, sur la ligne de tramway n°1 de Nantes à Saint-Herblain, une collision entre un tramway et une voiture particulière a causé la mort de la passagère de la voiture.

L'accident a eu lieu vers 12 h 15.

Un tramway, qui venait de quitter la station « Schoelcher », à Saint-Herblain, vers Nantes, a percuté une voiture, engagée sur le carrefour giratoire Vasco de Gama. L'automobiliste, qui cherchait son chemin, s'est engagé sur le giratoire sans bien percevoir le tramway ni les feux qui protégeaient le passage de celui-ci.

La rame de tramway a heurté la voiture sur le flanc droit de celle-ci (côté passager), puis l'a poussée sur une quarantaine de mètres, avant de heurter, encore violemment, un poteau, support de ligne aérienne de contact, contre lequel la voiture a été broyée.

La cause directe de l'accident réside dans l'inobservation et le non respect de la signalisation routière par le conducteur de la voiture accidentée.

Le retard dans le déclenchement du freinage d'urgence du tramway a été un facteur aggravant de l'accident et un facteur déterminant de la violence du deuxième choc contre le poteau.

L'aménagement du carrefour giratoire, pour y inscrire la plate-forme de tramway, présente des caractéristiques qui ne garantissent pas une sécurité optimale :

- la présence d'un obstacle fixe (le poteau, support de ligne aérienne de contact) à quelques dizaines de centimètres du « gabarit limite d'obstacle », et situé à proximité immédiate du bord de la chaussée de l'anneau, s'est révélé être un élément aggravant ;
- l'absence de pré-signalisation, à l'entrée du carrefour, a pu amoindrir la perception du contexte urbain et de ses contraintes.

D'autres facteurs, attachés à la conception du matériel roulant (conception ancienne de l'avant du tramway non optimisé en cas de choc, absence d'avertisseur sonore puissant) ou bien à la compréhension de la signalisation (ambiguïté feu rouge clignotant qui n'a manifestement pas été bien interprété), ont également pu jouer un rôle dans l'accident.

Enfin, l'analyse de l'accident aurait été facilitée par la présence à bord du tramway d'un dispositif plus complet de vidéo et d'enregistrement.

A l'occasion de cette enquête, il est apparu que la sécurité des carrefours giratoires traversés par des tramways pose des problèmes spécifiques complexes qui doivent être traités avec soin. En particulier, leur lisibilité constitue un enjeu de sécurité important, notamment pour des usagers routiers de passage ou non habitués des lieux.

Les recommandations appellent donc :

- à mettre en oeuvre, sur le réseau de tramway nantais, un programme de modification d'implantation des poteaux supports de LAC* sur les carrefours les plus préoccupants ;
- à achever le programme de renforcement de la sécurité des carrefours giratoires nantais dans le cadre d'un plan d'aménagement pluriannuel décidé par Nantes Métropole ;
- à faire mieux connaître aux usagers le caractère prescriptif du feu rouge clignotant ;
- à poursuivre l'expérimentation et l'optimisation des signalisations en barrage et en entrée de carrefour pour promouvoir celles qui présentent les meilleurs gages de sécurité et d'optimisation des trafics ;

* Terme figurant dans le glossaire

- à étudier des aménagements, sur le matériel roulant nantais, susceptibles d'améliorer la sécurité, (dispositif d'annonce sonore, notamment) ;
- à améliorer les dispositifs d'enregistrement, en équipant les rames de tramways d'un matériel vidéo orienté vers l'avant, sur l'espace à franchir, et en augmentant le contenu paramétrique des boîtes noires selon la liste prônée par le STRMTG*.

* Terme figurant dans le glossaire

1- Engagement de l'enquête

Le 4 juin 2007, sur la ligne de tramway n°1 de Nantes à Saint-Herblain, une collision entre un tramway et une voiture particulière a causé la mort de la passagère de la voiture.

L'accident a eu lieu vers 12 h 15. Un tramway, qui venait de quitter la station « Schoelcher », à Saint-Herblain, vers Nantes, a percuté une voiture, engagée sur le carrefour giratoire Vasco de Gama.

Compte tenu des circonstances de l'accident et de l'accord du ministre chargé des Transports, le directeur du Bureau d'enquêtes sur les accidents de transport terrestre (BEA-TT) a pris la décision de lancer une enquête technique.

Cette enquête est réalisée dans le cadre du titre III de la loi n° 2002-3 du 3 janvier 2002, et du décret n° 2004-85 du 26 janvier 2004, relatifs aux enquêtes techniques après accident ou incident de transport terrestre.

Elle a pour seul objet de prévenir de futurs accidents, en déterminant les circonstances et les causes de l'évènement analysé, et en établissant les recommandations de sécurité utiles.

2- Constats immédiats et organisation de l'enquête

2.1- L'accident

Le 4 juin 2007, à 12 h 15, la rame de tramway ALSTOM n° 345 circulait sur la ligne n°1, de Saint-Herblain vers Nantes.

Schéma 1 : Plan de la ligne de tramway n°1 du réseau nantais



Schéma 2 : Aperçu de l'itinéraire du tramway entre les stations « Tourmaline » et « Frachon »

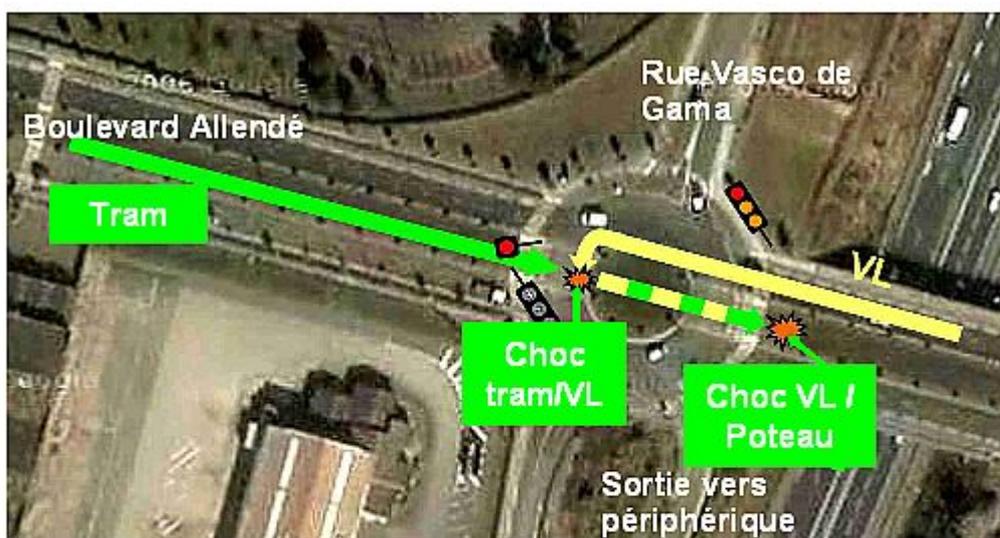


Source Google map

Le conducteur d'une voiture, immatriculée dans le Finistère et cherchant apparemment sa route, a abordé le carrefour giratoire en n'observant pas l'obligation d'arrêt qui lui était ordonné par la signalisation : d'abord les signaux R22j en entrée de carrefour, puis les signaux R24 en barrage (en position de rouge clignotant).

La rame de tramway est entrée en collision avec la voiture, sur son flanc droit (côté passager), sur la première branche de l'anneau du giratoire, puis l'a poussée sur une quarantaine de mètres, avant de heurter, encore violemment, un poteau, support de ligne aérienne de contact (LAC), sur lequel la voiture a été broyée.

Schéma 3 : Le lieu de l'accident : le giratoire « Vasco de Gama »



Source *Google map*

-  Progression du tramway avant le choc
-  Progression du VL avant le choc
-  Progression de l'ensemble tram + voiture après premier choc

L'arrêt du tramway a été observé au droit du poteau, support de ligne aérienne de contact (LAC), lors de ce deuxième choc.

2.2- Les secours

L'alerte a été déclenchée en utilisant la procédure normale, le conducteur du tramway ayant alerté le poste de commandement et de coordination (PCC), avant que celui-ci n'appelle les secours.

L'officier de police judiciaire en résidence à Nantes a été informé, par la salle de commandement, de l'accident : la présence de l'identité judiciaire du service local de police technique a été requise. Un équipage du Commissariat de Saint-Herblain a également été dépêché sur place.

La consignation de la LAC a été demandée par les secours à leur arrivée.

La police municipale, également présente, a procédé à la déviation de la circulation aux abords du carrefour giratoire.

Les pompiers de Saint-Herblain et d'Orvault, intervenus très peu de temps après l'accident (vers 12 h 24), et le SAMU*, sur place vers 12 h 45, se sont rapidement appliqués à procéder aux premiers éléments de sauvetage :

- le conducteur de la voiture a pu être dégagé rapidement et transporté au CHU* de Nantes par les pompiers,
- la passagère de la voiture (une Renault Espace), qui se trouvait coincée sous l'avant du tramway, était soignée pendant que les sauveteurs tentaient de la désincarcarer.

La désincarcération s'est achevée vers 14 h 20, soit deux heures, environ, après l'accident : elle a nécessité le levage de la rame à l'aide de vérins hydrauliques répartis de chaque côté du tramway. La victime a, alors, été déposée sur un brancard, au sol, afin de subir d'autres soins et des massages cardiaques.

Le médecin du SAMU, qui venait de placer la victime dans un véhicule des pompiers (un VSAB*), n'a pu que constater le décès de la passagère.

2.3- Le bilan

2.3.1- Corporel

La passagère de la voiture est décédée.

Le conducteur de la voiture a été blessé et soigné au CHU de Nantes.

Le conducteur de la rame de tramway n'a pas été blessé.

Les passagers, apparemment une cinquantaine (chiffre estimé par le conducteur du tramway), n'ont pas été blessés ni, d'ailleurs, des tiers, piétons ou autres automobilistes.

2.3.2- Matériel

La voiture est entièrement détruite : le premier choc a enfoncé le côté droit du véhicule tandis que le deuxième, sur le poteau support de LAC, a provoqué le broyage du véhicule.

La rame de tramway a son carénage avant arraché, des équipements sous caisse endommagés et le pare brise touché.

Le poteau support de LAC, sur lequel la voiture a été broyée, est déformé.

2.4- Organisation de l'enquête

Le BIRMTG*/Nord-Ouest s'est rendu sur place le 7 juin 2007.

A la suite de la décision d'engagement de l'enquête, une équipe d'enquête du BEA-TT a été constituée avec le renfort d'un enquêteur non permanent du STRMTG.

Par la suite, les enquêteurs en charge de l'enquête se sont rendus sur place pour examiner les lieux de l'accident et rencontrer les principaux acteurs locaux : l'exploitant (la SEMITAN*), et l'autorité organisatrice des transports (Nantes Métropole). Une documentation technique concernant le système de freinage sur le matériel tramway ALSTOM de type « tramway français standard » (TFS) leur a été communiquée.

* Terme figurant dans le glossaire

Un bureau d'étude spécialisé, Eurocrash, à l'Ecole Centrale de Nantes, a été sollicité par le BEA-TT pour reconstituer la cinématique de l'accident.

Les enquêteurs techniques ont eu accès aux résultats de l'enquête et des expertises diligentées par l'autorité judiciaire ; ils ont également pu étudier les enregistrements de la boîte noire et de la bande vidéo embarquée dans la rame de tramway, ainsi que la documentation technique sur le matériel de tramway ALSTOM.

3- Éléments de contexte

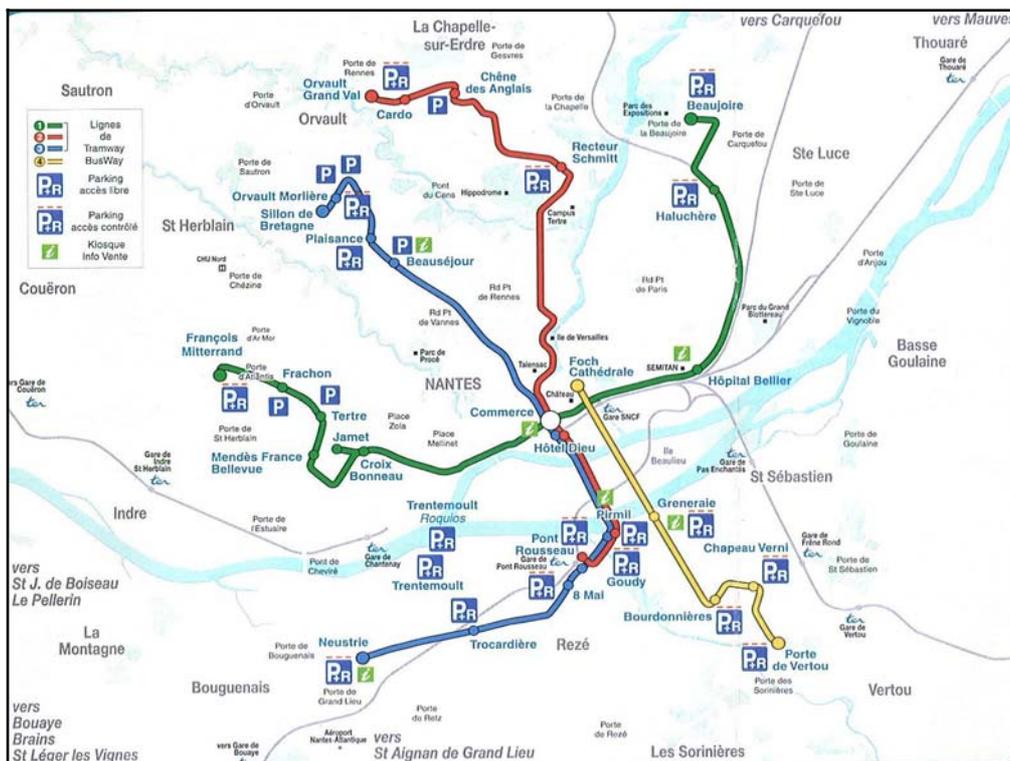
3.1- Le réseau nantais

Le tramway de Nantes est le premier réseau moderne de tramway fer à être implanté en France en 1985. Avec un total de 40 km répartis sur 3 lignes et desservant 81 stations, c'est le plus important réseau de tramway en France. Il transporte quotidiennement plus de 260 000 personnes dans toute l'agglomération nantaise.

La ligne 1 est la première ligne à avoir été mise en service en janvier 1985. Elle reliait alors le quartier de Bellevue (à l'ouest) à celui de la Haluchère (à l'est), via le centre ville où elle dessert, notamment, la place du Commerce et la gare SNCF Nord. Elle a été prolongée une première fois, à l'est, en 1989, pour desservir le stade et le parc des expositions de la Beaujoire. Le second prolongement, à l'ouest, dessert la zone Atlantis à Saint-Herblain (terminus François Mitterrand) depuis 2000 (voir plan du réseau ci-après).

C'est sur ce second prolongement que se situe le giratoire Vasco de Gama.

***Schéma 4 : Organisation des transports collectifs lourds du réseau nantais
(Tramways, « Busway » et Parcs relais)***



(Source SEMITAN)

Ce réseau est également remarquable par le nombre de carrefours giratoires présents sur l'ensemble de ses lignes : 54 carrefours giratoires pour 222 intersections soit un ratio de 24 % (source : Base de données « accidents » du STRMTG).

3.2- L'exploitant

La SEMITAN (Société d'économie mixte des transports en commun de l'agglomération nantaise) est la société d'économie mixte qui exploite le réseau de transport public de Nantes Métropole, dont le réseau de tramway. Les principaux actionnaires sont la Communauté Urbaine de Nantes (CUN) et le groupe TRANSDEV*.

Elle est mandatée par la CUN* pour les études et la réalisation des investissements pour le compte de la communauté urbaine et est également le délégataire de l'exploitation des transports urbains de l'agglomération nantaise.

3.3- Le matériel roulant

Le matériel roulant utilisé sur la ligne 1 est de deux types :

- Tramway Français Standard - TFS (rames ALSTOM) au nombre de 46 : ce sont les premières rames commandées par la SEMITAN pour la première ligne ;
- Incentro (rames ADTRANZ devenu BOMBARDIER) au nombre de 43.

3.3.1- Description générale du TFS (véhicule en cause dans l'accident)

Le TFS est un véhicule articulé sur rails à traction électrique. Il se compose de deux motrices articulées et d'une remorque intermédiaire. Il repose sur 4 bogies : un bogie avant, moteur, deux bogies médians, porteurs, et un bogie arrière, moteur (voir diagramme ci-après, schéma 6).

Schéma 5 : Face avant de tramway TFS



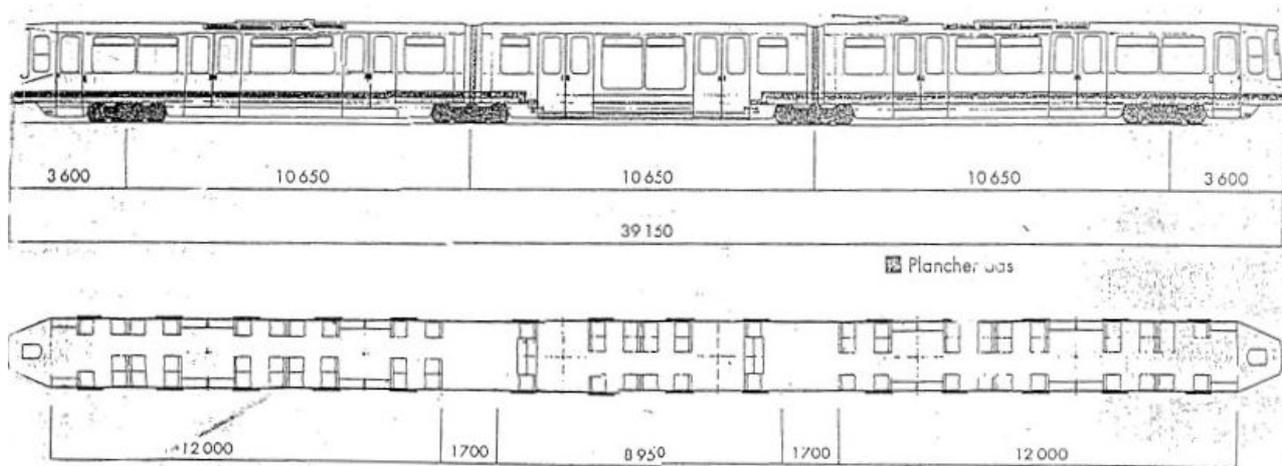
Les premières rames TFS* ont été livrées dès 1984 (le tramway nantais a été inauguré en 1985). La rame n°345, la rame accidentée, l'a été en 1994.

Au vu de la fréquentation très élevée du tramway nantais, la SEMITAN a demandé au constructeur, ALSTOM, de rallonger les rames du TFS pour les porter à 3 caisses, ce qui s'est fait progressivement à partir de 1992 : dès 1994, l'ensemble du matériel livré était donc composé de rames à 3 caisses. Lorsque la caisse à plancher bas a été ajoutée en partie centrale des rames originelles, 4 freins mécaniques ont été ajoutés à l'ensemble des rames concernées : après des essais effectués par l'exploitant, ALSTOM a validé la possibilité de circuler avec un frein mécanique de plus en isolement (deux au lieu d'un). Le procès verbal de réception de la rame n°345 a alors été transmis à la préfecture pour l'obtention de l'autorisation d'exploiter.

Aucune autre modification, concernant le système de freinage, n'a été entreprise sur les rames de ce modèle de tramway, notamment sur la rame n° 345.

* Terme figurant dans le glossaire

Schéma 6 : Rame de tramway « ALSTOM » circulant sur le réseau nantais (TFS)



La capacité de transport en charge normale d'une rame TFS est de 236 personnes, 74 étant assises et 162 debout. En charge maximale, elle s'élève à 317 personnes, à raison de 6 personnes par mètre carré. La rame TFS est équipée de moteurs de traction électriques, alimentés en courant continu 750 volts, l'alimentation se faisant par une ligne aérienne.

3.3.2- La maintenance du matériel roulant

L'entretien du matériel roulant, effectué dans les ateliers de l'exploitant, est basé en priorité sur des actions préventives avec des fréquences d'entretien définies :

- contrôle visuel quotidien ;
- entretien courant des rames à 5 000, 15 000 et 30 000 km ;
- gros entretien à 60 000-70 000 km, 250 000 km, 500 000 km et 750 000 km ;
- test annuel des performances de freinage,
- entretien des différents organes par permutation et remise en état de ceux-ci dans les ateliers de l'exploitant.

L'entretien est réalisé par des techniciens qualifiés, avec l'aide d'une gestion de maintenance assistée par ordinateur qui assure la traçabilité de toutes les opérations réalisées.

3.4- Consignes de sécurité en exploitation des tramways de la SEMITAN

3.4.1- Sécurité des circulations des tramways

La sécurité des circulations repose globalement, hors points singuliers, sur le principe de la conduite à vue. Les conducteurs adaptent leur vitesse et conditionnent leur rythme de conduite par rapport à ce qu'ils voient.

Les conducteurs doivent également respecter :

- les consignes de sécurité fixées dans le règlement de sécurité et d'exploitation (RSE) du réseau de tramway de Nantes et élaboré par l'exploitant ;
- les instructions d'exploitation pendant les phases de conduite.

Le RSE* définit, notamment, les principes et règles de circulation, ainsi que les règles d'exploitation en situation normale et dégradée dont on peut retenir les mesures principales suivantes (extrait du RSE – octobre 2003) :

- Circulation en ligne

« Le tramway circulant à vue, le conducteur doit concentrer toute son attention sur la voie, la circulation parallèle, les mouvements des piétons, l'observation des signaux et des feux de circulation. S'agissant des signaux et des feux de circulation, il doit s'efforcer de les reconnaître du plus loin possible et de ne pas se désintéresser de leur observation tant qu'il ne les a pas franchis, leur aspect pouvant changer à tout moment.

En circulation en ligne, le conducteur doit toujours vérifier que l'aiguillage qu'il va aborder est en bonne position par rapport à l'itinéraire qui est tracé.

En cas de mauvaise visibilité (pluie, brouillard, fumée, etc...), il ne doit pas hésiter à ralentir son allure afin de bien observer les signaux et les abords immédiats de la voie. »

- Freinage d'urgence (FU)

« La procédure de freinage d'urgence (FU) déclenche la mise en oeuvre simultanée du débit des sablières et des trois systèmes de freinage : électrique, mécanique et électromagnétique, et ce jusqu'à l'arrêt complet du tramway. Cette procédure n'est utilisée qu'en cas d'extrême urgence car sa mise en oeuvre, surtout à grande vitesse, peut générer la chute de passagers ainsi que la projection d'objet dans la rame. A la suite d'un FU, le conducteur prévient le PCC* en indiquant la cause, la vitesse à laquelle il a été déclenché, la présence éventuelle de blessés et les dégâts matériels résultants. »

- Limitations de vitesse

« Le conducteur est tenu de respecter les vitesses maximales spécifiques à la ligne. Ces limitations sont indiquées sur des panneaux répartis le long de la voie. »

- Utilisation du gong

« Les conducteurs doivent utiliser l'avertisseur sonore (gong) pour prévenir de la présence du tramway ainsi que de tout danger immédiat. Son utilisation est obligatoire, notamment :

- ✓ à chaque mise en mouvement de la rame, quel que soit le lieu où elle se trouve,
- ✓ pour la présence de piétons, sur ou à proximité de la voie,
- ✓ sur traversée routière,
- ✓ à chaque arrivée en station,
- ✓ à chaque départ de station,
- ✓ au croisement avec une autre rame, soit à l'arrêt, soit en mouvement, et ce, à partir de la moitié de la rame et jusqu'à la fin de croisement,
- ✓ lors du franchissement d'une traversée routière avec feux en dérangement ou au noir,
- ✓ 30 secondes avant le départ du terminus. »

Les chefs de lignes ou contrôleurs de sorties vérifient que les véhicules roulent bien en conformité avec les affectations prévues pour les conducteurs.

Lorsque les rames sont sorties, le PCC et les agents d'intervention (régulateurs ou chefs de ligne) s'assurent du bon déroulement de l'exploitation et procèdent aux ajustements nécessaires : régulation, remplacements de conducteurs, etc.

* Terme figurant dans le glossaire

La gestion de l'alimentation en énergie du réseau est également assurée par les régulateurs à partir du PCC.

3.4.2- Intervention en cas d'accident grave

Un agent d'intervention est systématiquement affecté à la surveillance du réseau, afin d'intervenir rapidement lorsqu'un accident est signalé. Il a en charge l'organisation de la gestion de l'incident sur le terrain ainsi que les relations opérationnelles avec les secours.

Parallèlement, le PCC, en cas d'accident grave, alerte l'inspecteur de permanence qui est habilité à prendre les décisions nécessaires. Il a également en charge l'information des membres du comité de direction et du responsable de l'unité de production concernée.

En fonction de la gravité de l'évènement, le responsable de l'unité de production a en charge l'information, par téléphone ou par e-mail, du président de la SEMITAN, du cabinet du Maire, du cabinet du Président de la CUN, de la DDE*. Lorsqu'un accident grave se produit le week-end, l'inspecteur de permanence est chargé d'informer le cadre d'astreinte (représentant délégué de la direction), qui lui-même jugera de l'opportunité d'alerter le directeur général. En cas d'accident grave, le rôle du PCC vis-à-vis des services extérieurs à la SEMITAN (services de secours, police ou gendarmerie,...) est décrit dans le Plan d'Intervention et de Secours (PIS) dans lequel figure le schéma d'alerte suivant :

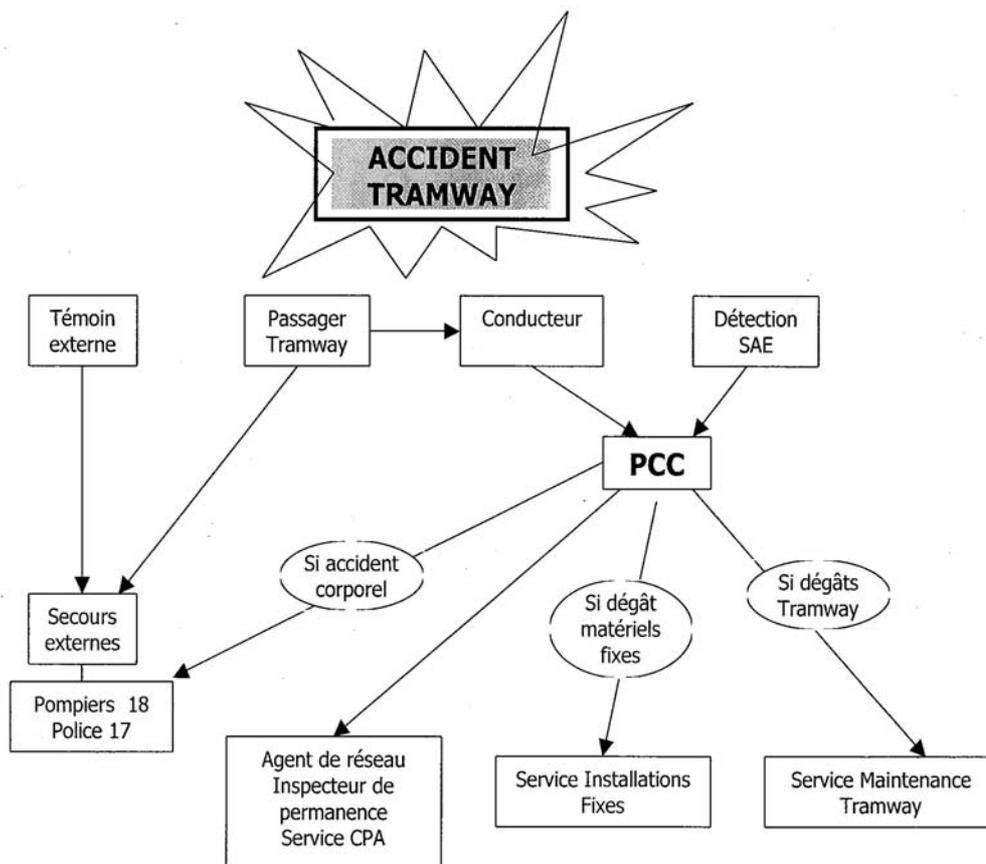


Schéma 7 : Schéma d'alerte du PIS (Source SEMITAN)

* Terme figurant dans le glossaire

4- Compte-rendu des investigations effectuées

4.1- Résumé des témoignages

Les résumés présentés ci-dessous sont établis par les enquêteurs techniques sur la base des déclarations des agents et personnes dont ils ont eu connaissance, notamment à travers les déclarations recueillies par les enquêteurs judiciaires. Ils retiennent les éléments exposés par ceux-ci qui paraissent utiles pour éclairer l'action des acteurs et leur perception du déroulement des événements. Il peut donc y avoir des divergences entre les différentes déclarations ou avec des constats présentés par ailleurs. Lorsque ces divergences appellent une prise de position des enquêteurs, celle-ci est formulée dans le déroulement reconstitué (voir chapitre 5).

4.1.1- Témoignage du conducteur de la rame de tramway

L'audition du conducteur du tramway s'est faite en deux fois : l'une, quelques instants après l'accident, l'autre, quelques jours plus tard.

Le conducteur précise qu'il conduit régulièrement les tramways sur les lignes 1 et 3. Il a pris son service à 5 h 05, le matin, sur la ligne d'autobus 85, a fini ce service à 9 h 00 et a repris la conduite du tramway n° 345 à 9 h 51. Le service devait se terminer à 13 h 20.

Après la station « Schoelcher », il dit avoir tractionné pour reprendre de la vitesse et gravir la pente, sans toutefois dépasser la vitesse limite autorisée de 50 km/h en inter-station. Puis, ayant constaté que les feux tricolores d'entrée sur le giratoire se mettaient au rouge et que les signaux R24 de barrage clignotaient, il a mis son manipulateur* « au neutre » pour continuer sa progression. A l'approche du carrefour Vasco de Gama / Salvador Allende, le signal R17, réservé au tramway, lui ayant donné l'autorisation de le franchir, et la pente lui ayant fait perdre de la vitesse, il a remis en traction pour assurer sa progression.

Il a alors vu une Renault Espace venant sur sa gauche sans ralentir ; elle n'allait pas vite. Le conducteur du tramway a « gongué », puis, constatant que l'automobiliste ne le voyait pas et que celui-ci poursuivait sa route, il a tiré le manipulateur à fond vers lui pour déclencher le frein d'urgence. Il explique, alors, que les sablières se sont mises en fonctionnement afin d'arroser les rails et ralentir la rame.

Il a, ensuite, percuté de plein fouet le Renault Espace et l'a « traînée face à lui ». Ne voyant plus la voiture, il pensait qu'elle avait été repoussée sur le côté, les projections de débris et d'herbe étant attribuées au carénage du tramway raclant le sol que le conducteur pensait avoir endommagé et déformé lors du premier choc.

Ayant vu des tôles monter le long du poteau support de LAC, juste avant l'immobilisation de la rame, le conducteur du tramway a constaté que la voiture percutée était toujours là, coincée entre la rame et le poteau ; il a, alors, appuyé sur la pédale d'appel d'urgence afin de prévenir le poste de commandement (PCC) et l'aviser de l'accident.

Encore dans la cabine de conduite, et communiquant avec le PCC, il a vu le conducteur de la Renault Espace sortir de l'habitacle et se tenir debout sur la pelouse, la tête ensanglantée. Il a fait évacuer les passagers restants dans la rame par la porte avant droite, contiguë à la cabine (certains voyageurs étaient déjà sortis par des portes qu'ils avaient déverrouillées), et a appris qu'une passagère était coincée à l'intérieur de l'habitacle, apparemment encore consciente.

Les pompiers et le SAMU sont arrivés rapidement. Des policiers l'ont fait souffler dans un alcootest (test qui s'est révélé négatif), et des collègues de la SEMITAN l'ont raccompagné au siège de l'entreprise pour établir le rapport d'accident interne à la maîtrise.

* Terme figurant dans le glossaire

En outre, le conducteur de tramway a rempli une déclaration interne à l'entreprise, la SEMITAN, deux jours après l'accident. Il y fait état d'une voiture roulant dans le même sens que le tramway, « voiture où la musique y était forte et qui ne respectait pas la signalisation R24 » : l'attention du conducteur du tramway a été attirée au point qu'il a déployé les rétroviseurs.

La suite de la déclaration interne à l'entreprise reprend les termes de ce qui a été relaté ci-avant.

4.1.2- Témoignage du conducteur du Renault Espace accidenté

Le conducteur de la voiture Renault Espace roulait sur le périphérique nantais et voulait sortir pour prendre la route de Vannes (voir schéma n°22, paragraphe 5.1.1). Étant sorti une porte trop tôt, à la porte ATLANTIS, le conducteur de la voiture a suivi la route de Saint-Herblain via le boulevard Salvador Allende pour retrouver la porte d'Armor et son chemin. Son attention était portée sur les panneaux de signalisation ; celle de la passagère l'était sur une carte routière pour retrouver un itinéraire. Ayant remarqué une voie descendante, en franchissant le périphérique, voie qu'il a pensé être un accès au périphérique, le conducteur de la voiture a décidé de contourner le giratoire Vasco de Gama / Salvador Allende pour s'y engager.

Le conducteur ne connaissait pas le territoire nantais et ignorait, notamment, la présence d'un tramway en exploitation : arrivé sur le giratoire, il a aperçu des feux qui lui ont semblé être des feux orange clignotants et pensait avoir aperçu un autobus de couleur verte venant sur sa droite, tout en considérant, qu'en étant sur l'anneau, il devait être prioritaire. Il s'est engagé dans la traversée de la ligne de tramway.

La voiture a, alors, été percutée sur son côté droit, a été poussée sur sa gauche et, après un choc ressenti comme violent, « tout s'est immobilisé ». Étant conscient, mais voyant que son épouse ne l'était apparemment pas, le conducteur de la voiture a demandé de l'aide aux personnes situées à l'extérieur pour s'extraire de l'habitacle. Une personne est entrée dans l'habitacle pour porter secours à son épouse et les pompiers l'ont, par la suite, pris en charge.

4.1.3- Témoignage d'un passager de la rame de tramway

Ce passager était assis, dans le sens de la marche, derrière la cabine du conducteur. Il a vu la voiture Renault Espace arriver sur la gauche de la rame et poursuivre le contournement du giratoire, sans ralentir, jusqu'aux feux rouges clignotants, en fonctionnement.

Pressentant l'imminence du choc, le passager s'est cramponné, il a entendu le « gong » du tramway plusieurs fois et n'a pas ressenti de freinage brusque du tramway. Il a vu, par la fenêtre, des objets voler en l'air, sur le côté gauche du tramway, dont une roue et le pot d'échappement.

Le grand choc fut ressenti lorsque la voiture a percuté le poteau support de LAC, poussée par le tramway. Par la suite, le passager a entendu le conducteur du tramway signaler l'accident à son PCC avant de descendre de la rame où il a pris connaissance des faits relatés ci-avant par les témoins précédents. Il signale, par ailleurs, que les secours sont arrivés très rapidement.

4.1.4- Témoignages de personnes se trouvant sur les lieux, piétons ou automobilistes

- Un témoin a vu la voiture, venant de la rue Vasco de Gama, être percutée par le tramway. Portant secours au conducteur de la voiture, ce dernier s'est entendu dire, par le conducteur, « qu'il n'avait pas vu le feu rouge ».

- Un deuxième témoin a vu le tramway percuter la voiture à pleine vitesse et la traîner sur plusieurs mètres. Il a également vu les bagages éclatés et entendu des gens hurler. Puis il a fait le 112 et alerté le PC « sécurité » d'ATLANTIS, centre commercial desservi par le boulevard périphérique, proche du lieu de l'accident. Pour ce témoin, il n'y a pas eu de freinage brusque du tramway.
- Par téléphone, un troisième témoin a confirmé que le signal de barrage était bien au rouge clignotant.
- Un quatrième témoin roulait boulevard Salvador Allende sur la voie de gauche et a vu la voiture percutée, poussée dans sa direction, avant que le convoi ne s'arrête sur le poteau support de LAC. Il a appelé les pompiers qui sont intervenus très rapidement. La police était déjà en place, en même temps que des jeunes collégiens ou lycéens.
- Venant du boulevard Salvador Allende, un cinquième témoin s'était arrêté au signal R24 de barrage en fonctionnement (rouge clignotant) ; il a vu arriver, sur sa gauche, le tramway à une vitesse qui lui a paru élevée. Puis, presque simultanément, il a entendu le « gong » et le bruit du premier choc du tramway contre la voiture. Puis, il a vu passer la voiture, coincée sur le devant de la rame, poussée par le tramway, avant que cet « attelage » ne soit arrêté par le poteau support de LAC. Pendant qu'il portait assistance aux passagers de la voiture, il a entendu plusieurs personnes aviser les secours.

4.2- Constats concernant les véhicules accidentés

4.2.1- Les dégâts constatés sur la rame

Le matériel en cause dans l'accident est la rame n°345 réceptionnée en janvier 1994 (voir son descriptif au paragraphe 3.3).

Les dégâts sur la rame de tramway ont été relativement importants. Elle a son carénage avant arraché et des équipements sous caisse endommagés. Le pare-brise est également touché. Les travaux de remise en état ont notamment porté sur :

- la caisse et les éléments avants du tramway, nécessitant le démontage du moteur et de l'essieu ainsi que celui des bogies ;
- l'échange des suspensions primaires et des tuyaux d'air ;
- le remplacement de divers équipements comme le chasse-pierres et son support, les sablières, le gong, les pare-brise (latéraux et frontal), les pare-chocs latéraux et frontal de cabine... .

4.2.2- Les dégâts constatés sur le véhicule routier

Les dégâts constatés sur la voiture Renault Espace sont très importants.

L'habitacle du véhicule a relativement résisté au premier choc de la rame de tramway, côté passager : les six impacts successifs subis par la voiture (voir l'étude Eurocrash en annexe 4, pages 4, 5 et 6) ont provoqué un enfoncement des tôles d'un peu plus de 20 cm.

Au deuxième choc contre le poteau support de LAC, la voiture s'est retrouvée broyée entre le poteau et le tramway (annexe 4, pages 7 à 13) : le côté droit de la voiture est resté coincé, partiellement, sous l'avant de la motrice de tramway, tandis que l'arrière gauche a été écrasé par le poteau support de LAC qui se trouve encastré au niveau de l'arrière gauche du véhicule.

La voiture est détruite (voir les photos suivantes).

4.2.3- Les dégâts constatés sur les éléments fixes

Le poteau de LAC s'est incliné sous la violence du choc ; sa base en béton est cassée.
Le sol engazonné du site propre a été labouré par les roues de la voiture.



Source SEMITAN



Source SEMITAN

Photos 1 et 2 : choc entre la voiture particulière et le tramway

Photos 3 et 4 : Traces du choc sur le gazon et sur la rame de tramway



Source SEMITAN



Source SEMITAN

4.3- Analyse des enregistrements et de la main courante du PCC

4.3.1- Analyse des données issues de la centrale tachymétrique

L'exploitant a transmis le relevé de la centrale tachymétrique (ou boîte noire) datant du jour de l'accident.

Les données apparaissant sur ce relevé sont les suivantes :

- la date ;
- l'heure ;
- la vitesse ;
- la distance parcourue ;
- activation du FU* manipulateur/coup de poing ;
- activation de l'alarme voyageur ;
- activation des patins magnétiques ;
- veille conducteur ;
- tiroir frein remorque ;
- ouverture de porte de plus de 5 cm si vitesse > 3 km/h.

Aucune indication concernant l'activation du gong et les positions du manipulateur (traction, neutre, freinage) n'apparaît sur ce relevé. Ces éléments auraient été utiles pour analyser plus finement le comportement de conduite du conducteur.

Des représentations graphiques des paramètres enregistrés dans la boîte noire sont présentées ci-après (schémas 8, 9 et 10) ;

La zone d'impact entre le tramway et la voiture, a été positionnée sur la base de l'étude cinématique réalisée par « Euro-crash » de l'Ecole Centrale de Nantes (voir annexe 4).

4.3.1.1- Parcours de la rame depuis la station « Schoelcher »

Le schéma n°8, qui suit, montre le profil de vitesse du tramway à partir de la sortie de la station « Schoelcher », située à environ 300 mètres en amont du giratoire « Vasco de Gama », jusqu'au poteau support de LAC.

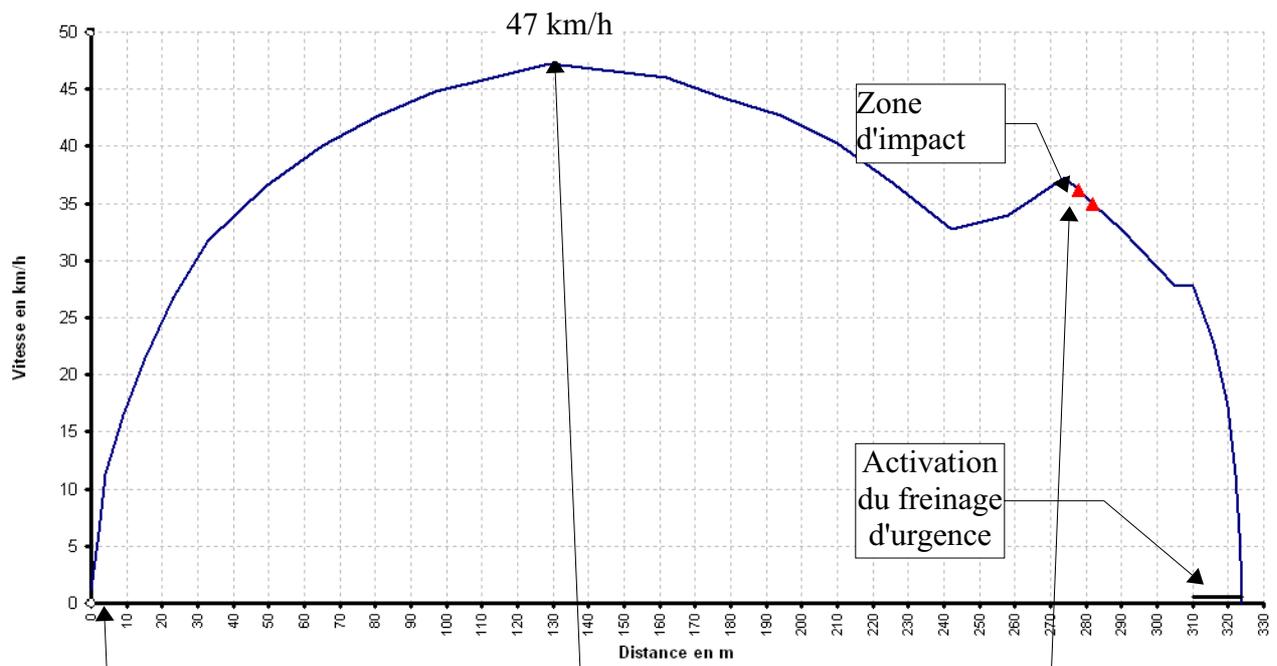
On observe :

- une accélération du tramway jusqu'à atteindre une vitesse d'environ 47 km/h ;
- puis une décélération à l'abord du giratoire « Vasco de Gama » (jusqu'à, environ, 30m de celui-ci) pour atteindre alors une vitesse d'environ 32 km/h.

Le conducteur a ensuite procédé à une dernière accélération pour traverser le giratoire, accélération probablement liée à la rampe de 2,4 % (rampe moyenne entre la station Schoelcher et le giratoire « Vasco de Gama ») à l'abord du giratoire, lui permettant ainsi de passer le carrefour « sur l'erre » comme le corrobore son témoignage.

Ce point n'a, toutefois, pas pu être techniquement vérifié, en l'absence d'information concernant la position du manipulateur dans le relevé de la centrale tachymétrique.

* Terme figurant dans le glossaire



Lieu de l'accident

Schéma 8 : Vitesse de la rame (km/h) en fonction de distance (m) depuis la station Schoelcher jusqu' au point d'arrêt contre le poteau support de LAC

4.3.1.2- Parcours de la rame entre les deux chocs

Les schémas n°9 et n°10 présentent l'évolution de la vitesse de la rame selon les distances parcourues (schéma 9) ou le temps écoulé (schéma 10).

On observe que :

- le tramway est en légère décélération au moment du choc ; la vitesse observée au moment de l'impact est un peu supérieure à 35 km/h ;
- par la suite, la décélération est pratiquement constante et n'indique pas de freinage d'urgence ;
- la vitesse tombe aux environs de 27/28 km/h ;
- le freinage d'urgence (FU) est enregistré par la centrale tachymétrique au moins 3 secondes après le premier choc (cf. schéma 10), environ une trentaine de mètres après le point d'impact ;
- les 14 derniers mètres, effectués en 3 secondes environ, permettent de passer de 27/28 km/h à l'arrêt brutal, contre le poteau support de LAC ;
- la décélération moyenne durant le temps d'actionnement du FU, calculée après interpolation des données en fin de course, est de $2,57 \text{ m/s}^2$, valeur qui correspond aux différents essais effectués avant ou après l'accident.

Schéma 9 : Vitesse de la rame (km/h) en fonction de la distance (m) jusqu' au point d'arrêt contre le poteau LAC

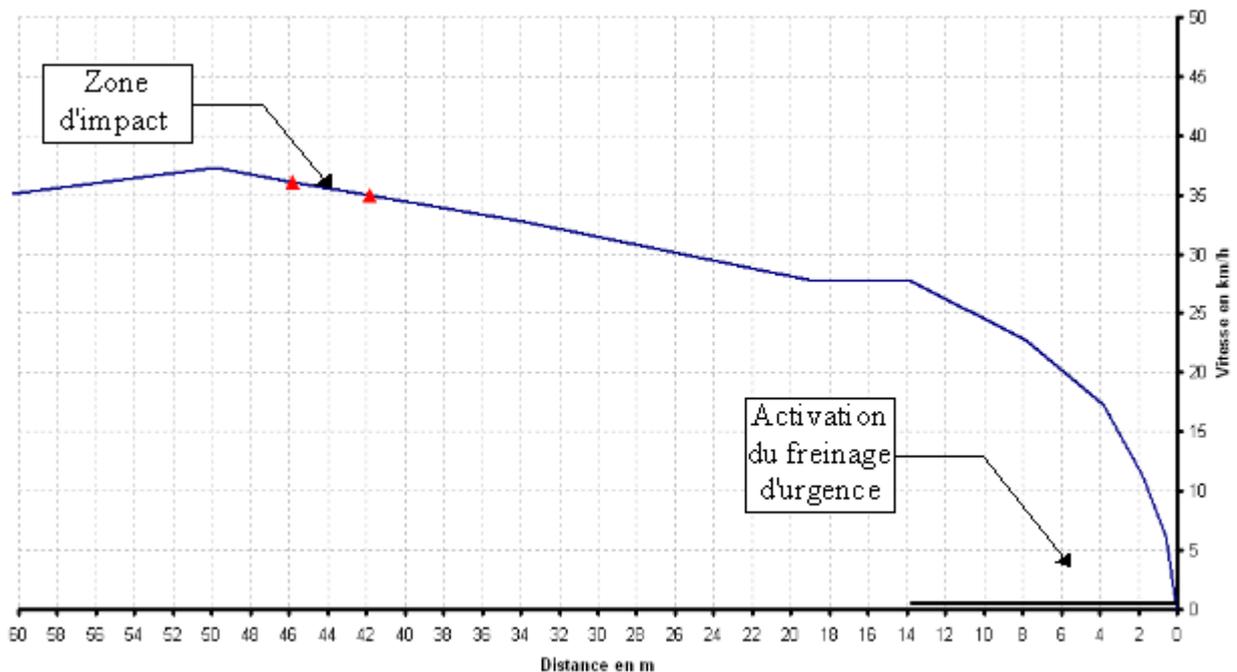
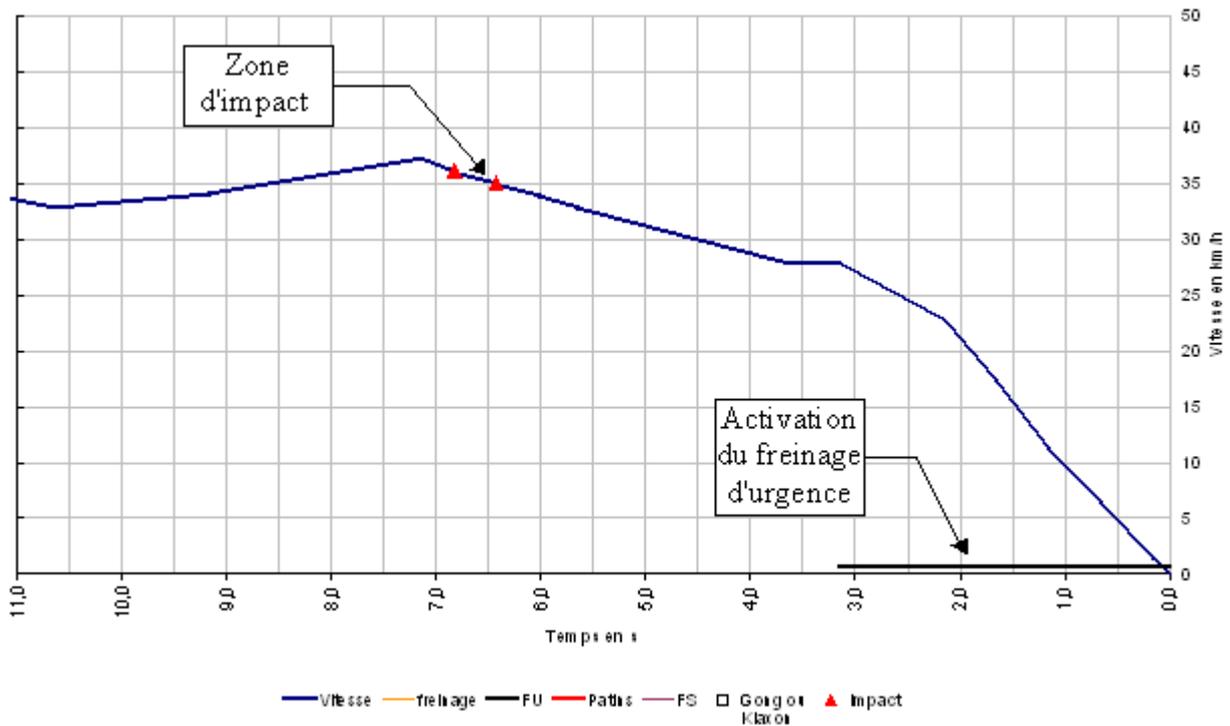


Schéma 10 : Vitesse de la rame (km/h) en fonction du temps (s)



4.3.2- Analyse de la vidéo

Un relevé vidéo, issu d'une caméra intérieure à la rame, a été fourni par la SEMITAN. Cette vidéo relate les événements qui se sont produits entre 12h15mn et 12h27mn. Une analyse fine n'a pu être réalisée dans la mesure où l'application fournie par la SEMITAN n'a permis de visualiser les images qu'en régime accéléré. Par ailleurs, le décompte du temps se fait seulement toutes les deux secondes.

Une description chronologique du déroulement des événements peut toutefois être réalisée.

- 12h15mn 02s : la rame se situe au niveau du giratoire précédent (giratoire Schoelcher) et se dirige vers le giratoire Vasco de Gama ;
- 12h15mn 26s : premier choc entre le véhicule routier et le tramway. On observe que certains passagers sont ballottés ;
- 12h15mn 30s : début du deuxième choc contre le poteau de LAC entraînant l'écrasement du véhicule routier. Certains passagers sont, apparemment, ballottés plus fortement que lors du premier choc.

Entre les deux chocs, on observe que la voiture concernée par l'accident est traînée par la rame : en effet, on aperçoit le coffre du véhicule grand ouvert, puis l'arrière du véhicule coincé contre la rame. Il n'est pas certain que, de son poste de conduite, le conducteur du tramway ait pu discerner la présence de la voiture coincée sur le devant de la rame, ni, par ailleurs, l'éjection des bagages évoquée par plusieurs témoins, placés à l'intérieur ou à l'extérieur de la rame.

- 12h15mn 52s : le conducteur semble procéder aux premiers appels d'urgence depuis la cabine de la rame, ce qui est en cohérence avec son témoignage et conforme à la procédure du RSE. On retrouvera également cette information dans l'analyse de la main courante au paragraphe suivant mais avec un décalage dans l'horodatage des événements;
- 12h17mn 54s : le conducteur du tramway procède au déverrouillage mécanique de la porte avant droite et fait descendre les passagers (19 passagers observés sur la vidéo), tandis que d'autres déverrouillent d'autres portes (une ou deux selon le conducteur) pour quitter la rame. Le nombre total de passagers est estimé à 50 ;
- 12h24mn 08s : arrivée des pompiers sur le site. On constate que l'intervention des pompiers a été très rapide (moins de 10 minutes).

4.3.3- Analyse de la main courante du PCC

La main courante fait état d'un appel de la part du conducteur signalant une collision avec une voiture et demandant l'intervention des secours qui a généré la création d'une fiche accident à 12h22mn. On constate, au vu de l'analyse de la vidéo (heure d'appel du conducteur supposé 12h15mn52s), que l'horodatage ne coïncide pas entre vidéo et PCC.

La main courante précise également :

- toutes les données nécessaires à la localisation de l'accident (ligne, sens de circulation, nom de la station la plus proche, et l'adresse précise) ;
- les personnes de permanence au PCC ;
- le nom du conducteur impliqué ;
- le numéro de la rame impliquée ;
- les personnes contactées lors du déroulement de l'évènement.

A la lecture du déroulement des opérations, suite à l'appel du conducteur, l'agent de régulation du PCC a bien mis en oeuvre les consignes prévues dans le Plan d'intervention et de secours (PIS) et reprises dans le RSE à savoir :

- envoyer l'agent de régulation sur le site ;
- contacter les services de secours ;
- contacter l'inspecteur de permanence ;
- envoyer le service technique pour les dégâts causés sur la rame ;
- envoyer le service « installations fixes » pour les dégâts concernant le poteau support de LAC.

Toutefois, la main courante ne permet pas de déterminer quelle a été, précisément, la chronologie des événements, notamment pour l'information aux différents acteurs concernés.

La main courante précise également qu'un service autobus de substitution a été mis en place.

Le retour à la normale est indiqué à 18 h 32. Le temps d'interruption de circulation sur la ligne a donc été un peu supérieur à 6 heures.

4.4- Éléments relatifs aux conducteurs

4.4.1- Le conducteur du tramway

Le conducteur du tramway est habilité à la conduite des tramways sur les trois lignes du réseau nantais depuis le 30 avril 1992. Il conduit, également des autobus.

Ayant pris son service à 5 h 05, le 4 juin 2007, jour de l'accident, sur la ligne d'autobus n°85, le conducteur de tramway a arrêté ce service à 9 h 00 pour prendre la conduite de la rame de tramway n°345 à 9 h 51, sur la ligne n°1.

Le conducteur n'a pas d'antécédent qui mettrait en évidence une conduite dangereuse, dans le passé.

Le test d'alcoolémie et le dépistage urinaire pour rechercher la présence d'éventuels produits stupéfiants pratiqué au CHU de Nantes, se sont révélés négatifs.

Immédiatement après l'accident, le conducteur a appliqué la procédure prévue dans le RSE lorsqu'un FU est activé, en appelant immédiatement le PCC pour une demande d'intervention des services de secours.

4.4.2- Le conducteur de la voiture particulière

Le conducteur de la voiture accidentée est un homme âgé de 63 ans, au moment de l'accident : il détient son permis de conduire depuis 1964.

Revenant de vacances et ne connaissant pas bien le territoire traversé, à savoir le périphérique nantais, le conducteur et la passagère, son épouse, étaient distraits par la recherche de leur itinéraire au moment d'aborder le carrefour giratoire « Vasco de Gama ».

Les tests d'alcoolémie et de recherche de produits stupéfiants se sont révélés négatifs et, au CHU de Nantes, le conducteur de la voiture a reçu des soins liés aux coupures à la tête, aux côtes cassées et aux éclats de verre reçus.

4.5- Éléments relatifs au freinage du tramway

Le matériel en cause dans l'accident est la rame ALSTOM/TFS n° 345 réceptionnée en 1994 (voir le descriptif de ce type de matériel au paragraphe 3).

4.5.1- Le système de freinage du TFS

Le système de freinage du TFS est composé de trois type de freins (voir schéma 11) :

- la force contre électromotrice des 2 moteurs de traction ;
- les 8 patins magnétiques qui se collent aux rails, à la demande ;
- les 12 blocs de freins mécaniques qui serrent des plaquettes sur des disques ventilés.

Leur fonctionnement est sécuritaire puisqu'en absence de commande électrique, ils sont nécessairement en serrage. Une commande d'isolement mécanique est disponible sur chaque bloc afin de desserrer les pinces en cas d'avarie.

L'emplacement des différents systèmes de freinage, la localisation des deux freins isolés et le détail des freins sur bogie sont exprimés dans les schémas ci-après.

Schéma 11 : Localisation longitudinale des différents types de freins sur une rame TFS

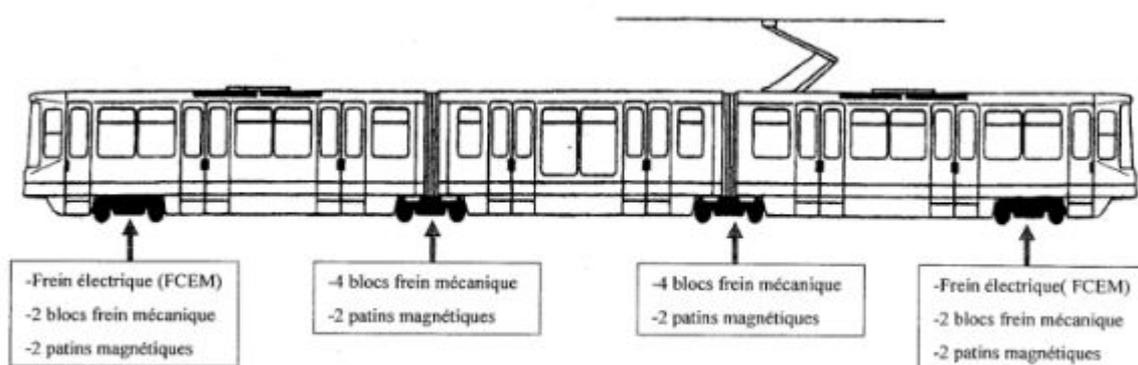


Schéma 12 : Localisation des freins mécaniques sur une rame TFS

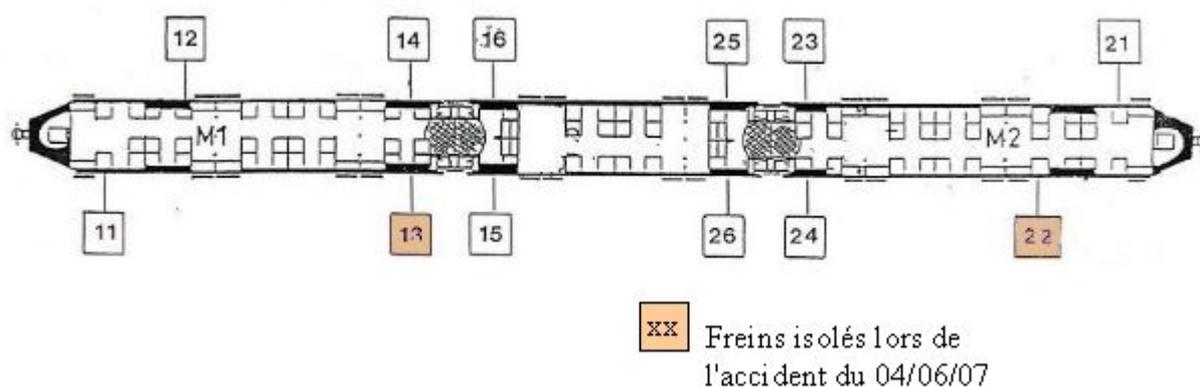
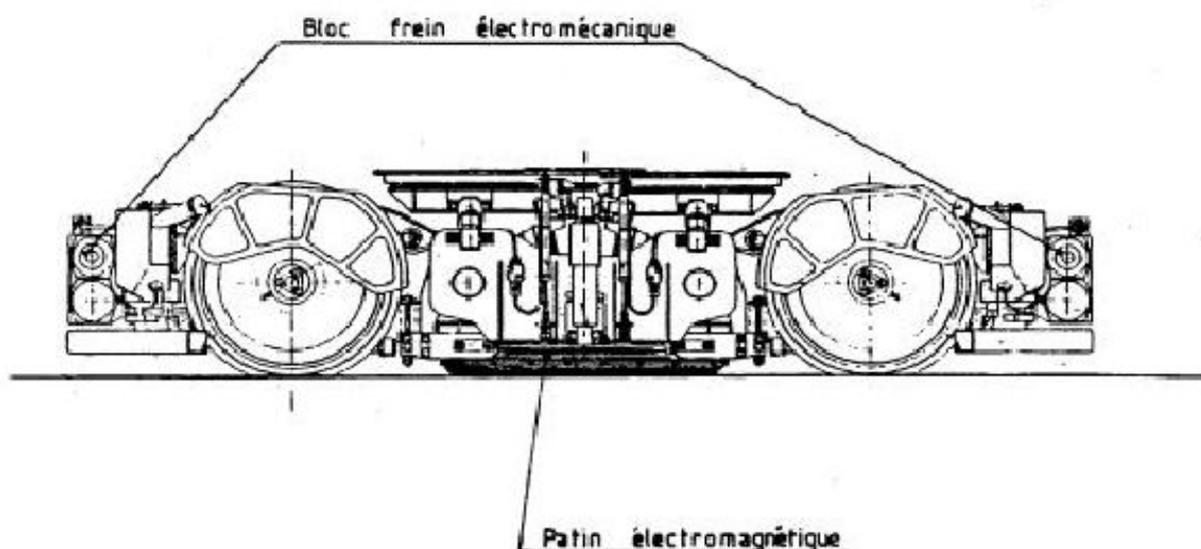


Schéma 13 : Positionnement des freins sur un bogie (matériel TFS)



Les schémas 14 et 15, ci-dessous, illustrent la position relative des freins électromécaniques et des freins électromagnétiques.

Schéma 14 : Vue d'un bloc-frein électromécanique et du dispositif de déverrouillage

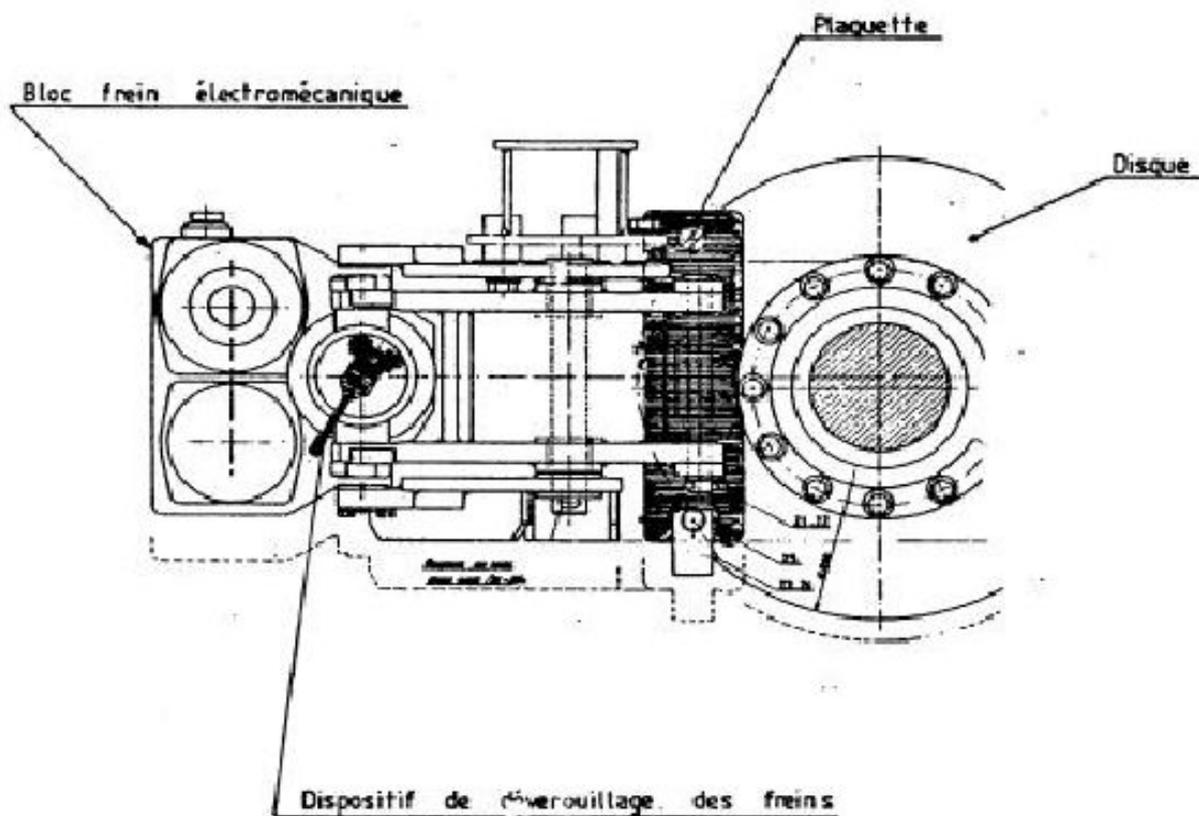
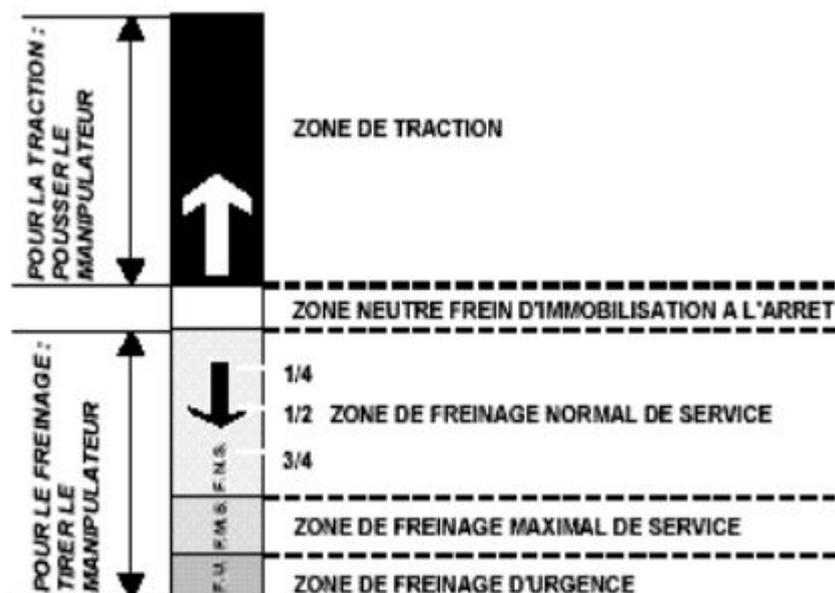


Photo 5 : Manipulateur de tramway

Source SEMITAN



Schéma 15 : Diagramme de fonctionnement du manipulateur



Le manipulateur a une action qui varie en fonction de sa position selon une course linéaire. (voir photo 5 et schéma 15)

- la position neutre, actionnée en ligne pour profiter de l'élan et poursuivre la progression sans « tractionner », et qui actionne les freins d'immobilisation de la rame à l'arrêt ;
- la position dans la zone de traction pour adapter la vitesse de progression ;
- la position dans la zone de freinage qui permet d'adapter progressivement le ralentissement de vitesse en partant du neutre :
 - ✓ une zone qui correspond au freinage normal de service (FNS), et qui assure un freinage progressif selon la position du manipulateur (jusqu'à $1,31\text{m/s}^2$),
 - ✓ une zone qui correspond au freinage maximal de service (FMS), soit environ $1,45$ à $1,53\text{m/s}^2$,
 - ✓ et la position extrême correspondant au freinage d'urgence (FU), soit $2,60\text{m/s}^2$ à $2,70\text{m/s}^2$.

Un bouton coup de poing, placé sur le tableau de bord, peut également déclencher le freinage d'urgence : le temps de réponse du FU est de l'ordre de la seconde (de 0,8 à 1 seconde). Le freinage d'urgence a une gestion électronique et un asservissement à certains paramètres (par exemple, la charge du tramway) : il déclenche l'ensemble des moyens de freinage, mécanique, électromagnétique et électrique.

On peut noter, qu'aujourd'hui, la plupart des boutons coup de poing sur les tramways français de construction plus récente déclenchent un freinage de sécurité (FS) et non un freinage d'urgence. Le freinage de sécurité utilise des circuits de commande distincts des circuits commandés par le manipulateur agissant sur le freinage d'urgence : la disjonction électrique simultanée assure le serrage positif des freins mécaniques et l'isolement électrique des coffres traction évite les mises en traction intempestives. Le FS* n'agit que sur les freins mécanique et électro-magnétique.

* Terme figurant dans le glossaire

4.5.2- Mise en perspective du système de freinage du TFS par rapport à celui de matériels plus modernes

Tous les tramways ont un système de freinage assis sur une combinaison de trois types d'action :

- un freinage mécanique ;
- un freinage électrique, le frein « moteur », agissant par la force contre électromotrice ;
- un freinage électromagnétique agissant par l'intermédiaire de patins venant se plaquer sur le rail.

Un système anti enrayage vient compléter le dispositif : il s'agit d'un système de régulation de l'effort de freinage permettant d'éviter le blocage des roues et, donc, d'éviter leur glissement sur les rails.

De plus, pour augmenter l'adhérence des rames, les sablières se mettent en service automatiquement lorsqu'il y a déclenchement du FU.

C'est sur le freinage mécanique que se situe une des évolutions sensibles du système puisque, aussi bien, déjà, sur le TFS de Grenoble et le nouveau matériel ALSTOM, CITADIS, que sur celui de BOMBARDIER, les freins mécaniques ont abandonné leur asservissement strictement électrique pour la technologie hydraulique, plus fiable.

Concernant la maintenance, les nouveaux matériels disposent d'un relayage informatique dans la surveillance du système de freinage : les défauts, localisés, sont signalés au conducteur sur un écran de contrôle et par une alarme sonore, facilitant, ainsi, les opérations de maintenance.

4.5.3- Performances requises pour le TFS de Nantes

Les performances opérationnelles pour le freinage d'un tramway moderne indiquent, d'après la norme NF EN 13452-1 « Freinage – Systèmes de freinage des transports publics urbains et suburbains » (exigences de performances émises en décembre 2003), une décélération minimale, en freinage d'urgence, de $2,8 \text{ m/s}^2$:

Pour le TFS nantais, plus ancien, cette norme n'est pas applicable. Ce sont les performances du matériel, à la livraison, qui font référence, soit environ $2,60$ à $2,70 \text{ m/s}^2$. Ces valeurs peuvent baisser en cas d'isolement de frein(s) mécaniques.

Il est utile de rappeler que les valeurs minimum ne proviennent pas de réglementations techniques et ne traduisent, en réalité, qu'un référentiel, un « état de l'art », vers lequel il convient de converger pour des raisons liées à l'amélioration de la sécurité sur les réseaux français.

Sur les rames BOMBARDIER et ALSTOM de nouvelle génération, les systèmes de freinage mécanique ont, par ailleurs, un temps de réaction plus court que sur les rames du TFS nantais ($0,5$ seconde contre $0,8$ à 1 seconde pour le TFS nantais).

4.5.4- La capacité de freinage de la rame accidentée

La rame n°345 a fait l'objet d'une vérification, par l'exploitant, de ses performances dynamiques de freinage en août 2006 dont les résultats affichaient une décélération de $2,58 \text{ m/s}^2$ pour un FU réalisé à 20 km/h .

Lors de l'accident du 4 juin 2007, cette rame avait deux freins mécaniquement isolés : le frein n° 22 depuis le 22 mai et le frein n° 13 depuis le 23 mai.

En juin 2007, l'exploitant a procédé à des essais de freinage de la rame n°345, comparant ainsi les valeurs de décélération obtenues en août 2006 (aucun frein isolé) à celles obtenues dans les mêmes conditions (vitesse de 20 km/h) avec les freins n°22 et 13 isolés.

L'objectif de la SEMITAN a été de vérifier les conditions de freinage de la rame, d'évaluer l'impact de l'isolement mécanique de deux blocs freins et de statuer sur le retour de la rame en exploitation.

Les valeurs obtenues sont les suivantes :

	<i>Valeurs août 2006</i>	<i>Valeurs juin 2007 sans frein isolé sans correction de pente (*)</i>	<i>Valeurs juin 2007 deux freins isolés avec correctif de pente</i>	<i>Ecart deux freins isolés / tous freins juin 2007</i>
<i>Valeurs de la décélération moyenne (en m/s²)</i>	2,58	2,73 2,66	2,45 2,62 2,6 2,54 2,5 2,48	
<i>Valeur moyenne (m/s²)</i>	2,58	2,695	2,53	- 6,2 %
<i>Distance d'arrêt (m)</i>				
<i>V=20 km/h</i>		10,45	10,84	+ 3,7%
<i>V=30 km/h</i>		19,93	20,79	+ 4,3%
<i>V=40 km/h</i>		32,3	33,84	+ 4,8%

(*) valeurs issues directement de la centrale d'enregistrement externe. Cependant, la correction de pente modulera tout au plus de +/- 0,1.

Tableau 1 : Valeurs de décélération et de distances de freinage d'urgence - essais de l'exploitant

Les essais réalisés sur la rame accidentée par la SEMITAN, suite à l'accident, en juin 2007, ont montré des valeurs légèrement inférieures à la valeur minimale de 2,80m/s² désormais recommandée, mais applicable, seulement, sur les nouveaux matériels : la valeur recensée pour le FU a été de l'ordre de 2,7 m/s², sans freins isolés. Cette valeur a été de l'ordre de 2,53m/s² (moyenne) avec deux freins isolés (voir tableau 1 ci-dessus).

Par la suite, des valeurs situées au delà du minimum requis, pour la décélération, ont été observées lors des essais effectués à la demande du BEA-TT, à l'automne 2007.

Les différents résultats concernant le FMS* et le FU (pour les deux essais) nous amènent à conclure que les conséquences de l'accident n'auraient pas été très différentes si la rame avait eu tous ses blocs freins en état de fonctionnement.

* Terme figurant dans le glossaire

En effet le conducteur a engagé son FU à moins de 15 mètres du poteau caténaire à une vitesse d'environ 27,5 km/h. Les distances d'arrêt relevées pour une vitesse de 30 km/h avoisinent les 20 m, quel que soit l'état des freins (cf. tableau 1). La collision avec le poteau support de LAC, avec tous les freins actifs, aurait eu lieu, de la même manière, à une vitesse qui n'aurait guère été réduite.

4.5.5- Les pratiques de l'exploitant lors de l'isolation de freins mécaniques sur un TFS

La technologie développée par Alstom pour le système de freinage du TFS de Nantes est basée sur des systèmes électromécaniques complexes qui sont la source de difficultés et de mise en défaut des freins assez fréquentes (notamment en période d'humidité importante).

L'exploitant a donc été amené à gérer ces problèmes de fiabilité et à mettre en place des mesures d'exploitation lui permettant de ne pas immobiliser trop de rames tout en garantissant des performances de freinage acceptables du point de vue de la sécurité. Actuellement trois personnes de la SEMITAN sont affectées à l'entretien préventif et curatif des blocs freins.

Par ailleurs, les rames TFS, notamment celles de Nantes qui ont été mises en service à compter de 1985, ne sont pas munies de logiciels d'aide au diagnostic comme le sont les véhicules récents. La recherche de panne se fait donc par tâtonnement et permutation d'organes dans la chaîne de freinage : commande ⇒ relayage ⇒ connectique ⇒ bloc mécanique ⇒ signalisation de défaut.

Les défauts signalés au tableau de commande du poste de conduite apparaissent de manière imprévisible et sont souvent non reproductibles ; ce qui rend les diagnostics difficiles. La conjugaison de ces facteurs entraîne des temps de diagnostic important d'autant que, le taux de réserve étant faible, les véhicules sont peu disponibles.

Ainsi certains défaut de freins peuvent rester présent jusqu'à 4 semaines avant qu'ils puissent être corrigés.

Plus généralement, il peut se déclarer jusqu'à 50 défauts de frein en un mois sur l'ensemble du parc, pour les 46 rames du TFS en service à Nantes.

La tolérance, approuvée par le constructeur, d'un régime dégradé pouvant aller jusqu'à l'isolement de deux blocs freins mécaniques, au maximum, avec une limitation de vitesse à 50 km/h, permet, notamment, au service maintenance de garantir un taux de disponibilité véhicule conforme aux besoins du service commercial sans dégrader la sécurité du freinage des rames.

Cette tolérance n'est jamais dépassée et l'apparition d'un troisième défaut provoque la rentrée immédiate de la rame au centre d'exploitation.

Suite aux difficultés de gestion de ce type de pannes sur ces matériels, ALSTOM est revenu sur un système de freinage plus classique, le système électro-hydraulique ; c'est ce système qui équipe les tramways du réseau de Grenoble à partir de 1988.

4.6- L'aménagement et le fonctionnement du giratoire « Vasco de Gama »

4.6.1- le guide CERTU/STRMTG

Le guide « Giratoires et tramways – Franchissement d'un carrefour giratoire traversé par une ligne de tramway », corédigé par le CERTU* et le STRMTG, est un guide de conception à destination de toute la profession intervenant dans les projets d'implantation de tramway en ville.

* Terme figurant dans le glossaire

Le retour d'expérience, acquis ces dernières années, montre que la traversée d'un carrefour giratoire par une ligne de tramway pose des difficultés liées, notamment, au conflit de priorité qu'induit ce type d'aménagement (la priorité à l'anneau est remise en cause par la priorité donnée aux tramways par le code de la route).

Ce guide vise donc à orienter les concepteurs vers des aménagements adaptés dont l'utilisateur routier percevra le fonctionnement qui s'impose à lui sans ambiguïté ni confusion.

Il définit ainsi des règles visant à réduire la vitesse des véhicules routiers en approche d'un carrefour giratoire traversé par une ligne de tramway et à rendre lisible un tel aménagement.

Les principes essentiels à retenir sont listés ci-dessous :

- la plate-forme doit franchir le giratoire en quasi ligne droite en traversant l'îlot au plus près de son centre, en prohibant une plate-forme implantée côté entrée des véhicules sur le giratoire ;
- le rayon extérieur du giratoire doit être compris entre 14m et 22m (giratoires dits « moyens ») ;
- l'entrée sur l'anneau doit se faire, lorsque c'est possible, sur une seule file, et la largeur de l'anneau, constante, ne favorisera pas la circulation de deux véhicules de front ;
- une bande franchissable pouvant aller jusqu'à deux mètres est aménagée sur le pourtour de l'îlot central ;
- la sortie sur une seule voie est également préconisée ;
- les aménagements pour les piétons sont précisés ;
- en amont du carrefour, et pour annoncer le franchissement, on associe les panneaux A9 et AB25 et, en barrage, on peut mettre des signaux R24 ou R11v associés à des panneaux C20c ; le signal R11j est prohibé. La ligne d'effet des feux est implantée à 1,5 m, en amont du gabarit limite d'obstacle (GLO).

On retiendra de ce guide qu'une géométrie adaptée (taille moyenne avec une seule voie de circulation routière en entrée de giratoire) est essentielle dans la conception d'un giratoire traversé par une ligne de tramway pour s'assurer de la réduction des vitesses des usagers. A cela s'ajoute une signalisation adaptée permettant d'améliorer la lisibilité et la compréhension du carrefour, à savoir, une signalisation verticale statique composée des panneaux A9 et AB25 en entrée de carrefour, un signal lumineux, par exemple le signal R24 associé aux panneaux C20c et M9z en barrage.

Le guide est consultable sur les sites du STRMTG (<http://www.strmtg.developpement-durable.gouv.fr>) et du CERTU (<http://certu.developpement-durable.gouv.fr>).

4.6.2- Géométrie

L'accident s'est produit sur le carrefour giratoire « Vasco de Gama », entre les stations « Schoelcher » et « Frachon », au sud de la zone commerciale « ATLANTIS ».

Le giratoire est bien dégagé et la visibilité pour les usagers de la route, bonne.

Le carrefour giratoire est un carrefour à 5 branches dont une d'entre elles est uniquement sortante vers le périphérique. Sur les deux branches du boulevard Salvador Allende, la voirie routière est à 2x2 voies et le tramway, en site axial. Les entrées au carrefour se font, soit sur une file (rue Vasco de Gama), soit sur deux files de circulation (boulevard Salvador Allende). Il y a également, de part et d'autre, une bande cyclable et un trottoir.

Un plan détaillé du carrefour est joint en annexe 3.

Le STRMTG et le CERTU viennent de publier le guide (voir chapitre 4.6.1) sur les carrefours giratoires traversés par une ligne de tramway pour orienter les concepteurs vers des aménagements adaptés dans lesquels l'usager routier perçoit le fonctionnement qui s'impose à lui, sans ambiguïté ni confusion, dans l'objectif d'accroître la sécurité.

Il s'avère que le giratoire Vasco de Gama, réalisé antérieurement à l'édition de ce guide, comme l'ensemble des giratoires de l'itinéraire suivi par la ligne n°1 de tramway, respecte certaines dispositions, comme la traversée en axial de la voie de tramway, une bonne visibilité et la valeur maximale du rayon extérieur (inférieur à 22 m).

Par contre, la largeur de la chaussée annulaire (de l'ordre de 9 m) permet à deux véhicules de se présenter de front au niveau de la plate-forme, alors que le guide recommande de limiter la largeur utile de l'anneau à une file de circulation.

Outre des vitesses excessives induites, une telle configuration facilite les dépassements dans l'anneau, les deux véhicules devenant alors, réciproquement, des masques visuels, tant vis-à-vis du tramway que de la signalisation en place.

4.6.3- Équipements et signaux lumineux

- ***La signalisation lumineuse*** (voir schéma 16 et photos suivantes)

Le giratoire est équipé d'un signal R22j de contrôle d'accès (jaune clignotant, jaune, rouge), en entrée de carrefour, et de signaux d'arrêt R24 (rouge clignotant), en barrage (au niveau de la traversée de plate-forme).

Cependant, la mise en place de signaux routiers R22j, en entrée de carrefour, est susceptible de nuire à la lisibilité du giratoire (redondance avec le signal R24 en barrage), d'autant que la présence concomitante de feux jaune clignotant et rouge clignotant favorise la confusion dans la lecture de ces deux signaux.

Il est utile de rappeler, en effet, que l'Instruction Interministérielle sur la Signalisation Routière (IISR) (article 110-1 paragraphe 4) déconseille l'emploi des signaux R22j en entrée de carrefour, dans ce cas. Le guide propose une signalisation verticale statique, rappelant notamment l'obligation de céder la priorité aux véhicules circulant sur le giratoire (panneaux AB25 et AB3a) ainsi que la présence d'un tramway (panneau A9). (voir annexe 2)

Les signaux R24 ne sont pas équipés d'un panneau du type M9z portant la mention « rouge clignotant – arrêt absolu » comme sur certains signaux R24 du réseau nantais, d'installation plus récente. Ce panneau n'est pas réglementairement obligatoire mais permet de préciser la signification du signal R24. Les signaux R24 sont toutefois accompagnés de panneaux C20c, des pictogrammes placés en dessous et précisant le type de matériel en circulation sur la ligne traversée. (voir annexe 2)

Pour la conduite des tramways, on trouve également un signal R17. Ce signal est placé à l'attention des conducteurs de tramway et porte les mêmes indications qu'un signal tricolore pour les voitures : barre verticale (pour l'autorisation de passer), disque central blanc (pour l'annonce de la barre horizontale) et barre horizontale (pour l'arrêt).

- ***La signalisation statique*** (voir schéma 16 et photos suivantes)

Les panneaux de position de franchissement d'une plate-forme tramway (C20c) sont correctement implantés. Les panneaux d'indication pour céder le passage (AB3a) sont également présents. (voir les différents panneaux illustrés en annexe 2)

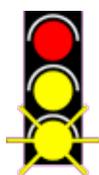
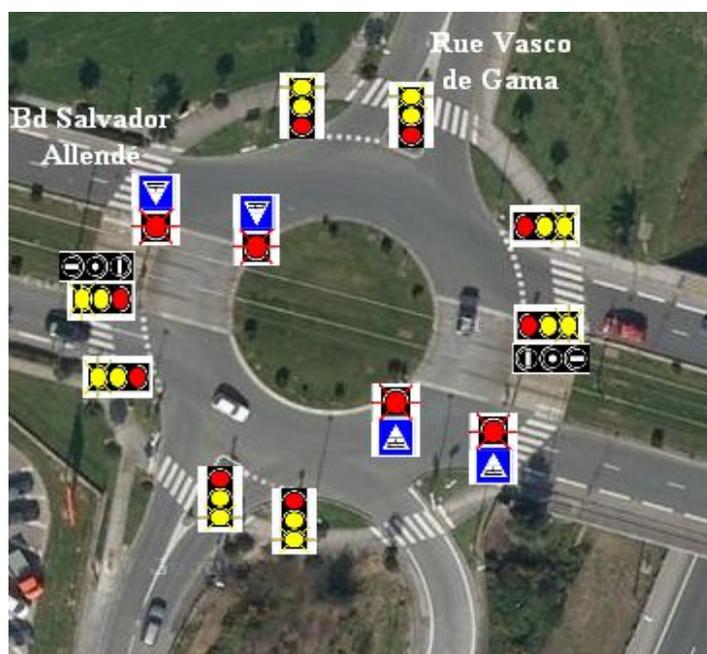
L'existence de signaux R24 impose, dans la réglementation actuelle, la mise en place d'une signalisation avancée de franchissement d'une plate-forme tramway (panneaux A9), qui n'est pas présente sur le site du giratoire Vasco de Gama.

Certaines expérimentations menées par le CERTU, à Nantes, ont montré, qu'en milieu urbain, la présence du panneau A9 n'avait généralement pas d'influence sur le respect des signaux R24 : une évolution de la réglementation n'imposant plus systématiquement l'implantation du panneau A9, en accompagnement du signal R24, a été validée par la DSCR* (novembre 2008). L'IISR* a donc été modifiée en conséquence.

Cela dit, le giratoire Vasco de Gama se situant dans une zone commerciale régionale importante, en bordure du périphérique, donc en zone péri-urbaine, on peut penser que le trafic routier n'est pas uniquement constitué de trafic local. Ce contexte particulier pourrait donc confirmer l'utilité du panneau A9 et du panneau M9z (en dessous du signal R24), pour l'information et la sécurité des usagers, notamment ceux qui ne sont pas habitués des lieux.

Schéma 16 : Implantation de la signalisation sur le carrefour giratoire « Vasco de Gama »

(Fond photographique Google Map)



R22j
en entrée de carrefour
pour les voitures



R24
en barrage
pour les voitures



R17
en entrée de carrefour
pour les tramways

* Terme figurant dans le glossaire

Photo 6 : Signalisation sur l'anneau, pour le tramway et pour les véhicules routiers



(Source SEMITAN)

***Photo 7 : Vue d'une entrée sur l'anneau.
Pas de tramway annoncé, pas de signalisation lumineuse activée***



(Source SEMITAN)

Photo 8 : Vue de l'anneau lors du passage d'un tramway.

La signalisation en barrage est activée (R24)

ainsi que celle située à l'entrée sur le giratoire

Le panneau C20c renseigne sur le type de matériel en circulation



(Source SEMITAN)

4.6.4- Fonctionnement du carrefour giratoire

Le fonctionnement du carrefour est le suivant :

- lorsqu'il n'y a pas de tramway à l'approche, ou, à fortiori, dans le carrefour, les signaux R24 sont éteints et les signaux R22j présentent le jaune du bas en mode clignotant (cf. photo n°7) ;
- à l'approche d'un tramway, tous les signaux R22j passent au jaune fixe. Cinq secondes plus tard, ceux-ci passent au rouge et simultanément tous les signaux R24 en barrage passent au rouge clignotant (photo n°6 et 8). Une signalisation spécifique au tramway, le signal R17, gère le franchissement du carrefour pour la rame (photo 6, feux accrochés à gauche du poteau, côté du tramway).

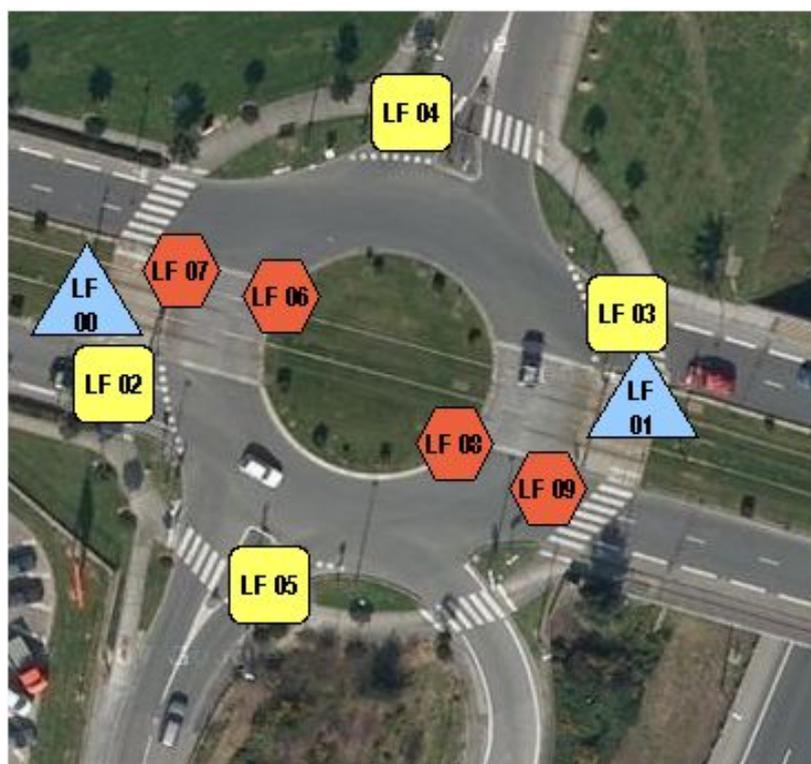
La matrice des temps de dégagement minimum est située page suivante.

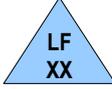
**Tableau 2 : Les temps de dégagement minimum au carrefour giratoire « Vasco de Gama »
et schéma de positionnement des ligne de feux (LF)**

LF	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09
LF 00 : feux R17 tram bld Allendé (voie 1) branche Ouest	00						05	05	08	08
LF 01 : feux R17 tram bld Allendé (voie 2) branche Est	01						08	08	05	05
LF 02 : feux R22j bld Allendé branche Ouest	02									
LF 03 : feux R22j bld Allendé branche Est	03									
LF 04 : feux R22j rue Vasco de Gama branche Nord	04									
LF 05 : feux R22j rue Vigneau branche Sud	05									
LF 06 et LF 07 : signal R24 au 1/2 anneau Nord	06	07	05							
LF 08 et LF 09 : signal R24 au 1/2 anneau Sud	08	07	05							
	09	05	07							

05 signifie qu'après l'activation au rouge clignotant du R24 situé côté sud (LF 09) arrêtant les véhicules au niveau de la plate-forme côté sud, il se passera 5 secondes avant l'ouverture du signal R17 situé branche Ouest (LF 00) (autorisant le passage des tramways côté ouest)

Schéma associé au tableau 2



-  LF XX Ligne de feux signaux R17 (pour le tramway)
-  LF XX Ligne de feux signaux R24 (feux de barrage)
-  LF XX Ligne de feux signaux R22j (feux d'entrée sur carrefour)

(Fond photographique Google Map)

Le tableau 2 (page précédente), indique des temps minimaux en-dessous desquels on ne peut descendre. Un dépassement de ces minimums met le carrefour en sécurité. Ce tableau montre que :

- les signaux R24 (LF* 06 et 07) clignotent pendant, au minimum, 7 secondes avant le passage du signal R17 (LF 00) au vertical ouvrant le passage au tramway (5 secondes dans l'autre sens). Cela apparaît cohérent dans la mesure où l'on considère qu'il faut, a minima, 3 secondes de clignotement du signal R24 pour être perçu par l'utilisateur « automobiliste ». En dessous de ce seuil, on observe des franchissements transgressifs « non volontaires ».
- le signal R17 (LF 00) a un temps garanti de 5 secondes « d'horizontal » (passage interdit pour les tramways) avant que les signaux R24 (LF 06 et LF 07) ne s'éteignent (8 secondes dans l'autre sens).
- un tramway passant à la dernière seconde de vertical du signal R17 a dégagé la traversée routière lorsque le signal R24 s'éteint. En général, tous les signaux R24 s'éteignent en même temps.
- les signaux R22j (LF 02 à 05) ne sont pas concernés par les minima à observer pour les temps de rouge. Ces signaux contrôlent les flux de voitures en entrée de carrefour : un défaut dans leur fonctionnement n'a aucune conséquence sur les minima exprimés plus haut, ni sur le déclenchement de la mise en sécurité du carrefour.

Au moment de l'accident, ce carrefour fonctionnait avec des temps de rouge nettement supérieurs aux temps de rouge minimums exprimés dans le tableau 3 (7 et 5 secondes), comme exposé ci-après dans le chapitre réservé à l'expertise du BIRMTG.

Le BIRMTG Nord-Ouest a procédé à des mesures des temps d'allumage des différents signaux. Il s'avère que le temps entre le début du clignotement des signaux R24 et l'arrivée de la rame à la ligne de feux du signal R17 est de 11 à 13 secondes.

L'extinction des feux du signal R24 se produit, ensuite, immédiatement après le passage de la rame sur la boucle au sol en sortie de carrefour, afin de réduire la durée du barrage. L'utilisateur routier peut cependant être en situation d'attente pendant un laps de temps (de 15 à 20 secondes) qu'il peut juger trop long avant l'arrivée d'un tramway, ce qui peut, ainsi, nuire à la crédibilité du signal.

Des réflexions ont donc été engagées par la SEMITAN pour diminuer le temps de rouge sans altérer la sécurité, réflexions évoquées dans le chapitre concernant le fonctionnement et l'équipement du giratoire et détaillées dans le chapitre 4.8.1.

Certains autres exploitants ont été amenés à modifier les temps d'allumage des signaux R24, suite au constat de franchissements transgressifs nombreux de ce signal par les usagers routiers. Ils ont pu, ensuite, observer des améliorations qualitatives significatives sur ce point. Cela a notamment été le cas sur le réseau de Bordeaux.

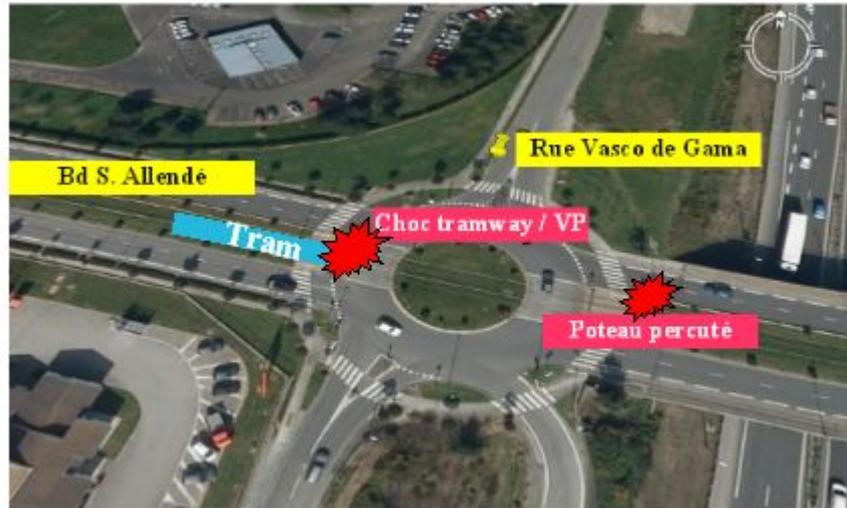
Enfin, le gestionnaire de la voirie n'a pas constaté d'évènement particulier enregistré dans le contrôleur de carrefour, au moment de l'accident : deux autres éléments confirment, en effet, le bon fonctionnement de la signalisation :

- l'analyse de la vidéo, qui témoigne de véhicules arrêtés aux feux ;
- les témoignages des personnes présentes sur le site qui confirment qu'il n'y a pas eu de dysfonctionnement de la signalisation routière.

* Terme figurant dans le glossaire

4.6.5- Les obstacles fixes

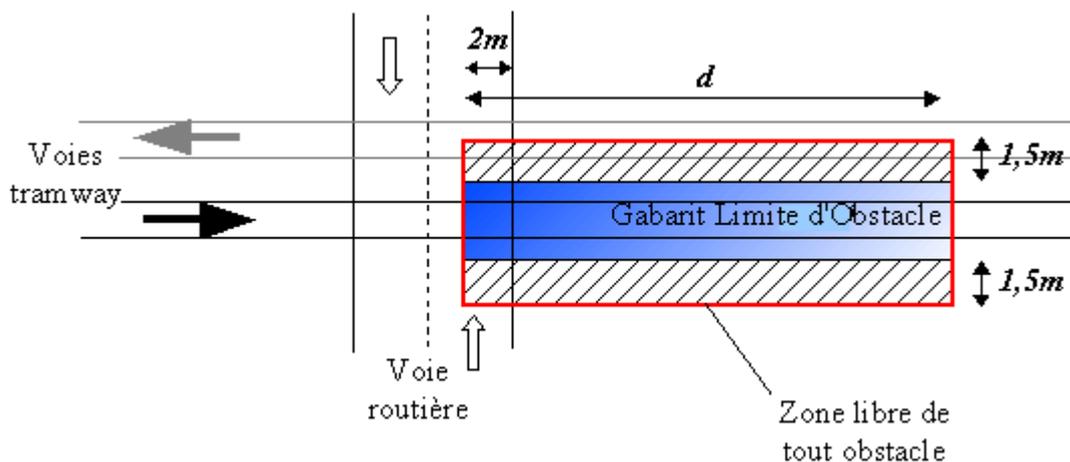
Schéma 17 : Les lieux de choc dans la géographie du carrefour giratoire



(Source Google Map)

Le guide « obstacles fixes » du STRMTG, consultable sur le site du service (<http://www.strmtg.developpement-durable.gouv.fr>), définit les zones devant être libres de tout obstacle fixe : le schéma 18, ci-dessous, en exprime la synthèse.

Schéma 18 : Distances minimales à observer pour l'implantation d'obstacles fixes au voisinage des carrefours routiers, le long d'un tramway (extrait du guide « obstacles fixes » STRMTG)



Le gabarit limite d'obstacle (GLO), représenté en bleu sur le schéma précédent, exprime, en largeur, l'espace nécessaire à l'évolution du tramway. La largeur du GLO tient compte de la largeur du matériel roulant, augmentée d'une certaine largeur pour tenir compte de suggestions particulières telle que le balancement des caisses en situation de roulage. Le guide préconise une largeur supplémentaire de 1,50 mètre, de part et d'autre du GLO, pour éviter l'aggravation d'un évènement par l'écrasement d'un véhicule entre le tramway et un obstacle fixe.

Le schéma 18 illustre donc la zone devant être libre de tout obstacle. Pour une vitesse de traversée du carrefour de 40 km/h, la distance « d » doit être égale à 31,5 m, comptés au delà du point de conflit potentiel avec un véhicule routier.

Le poteau support de LAC n°1825, situé à une dizaine de mètres de l'anneau routier, n'est donc pas conforme au guide et représente un facteur potentiellement aggravant, comme le montre l'étude Eurocrash (voir annexe 4).

On peut noter, par ailleurs, que, par rapport au raisonnement présenté dans le guide, la collision survenue apparaît atypique. En effet, la première collision a eu lieu sur la partie « est » du giratoire, à 42 mètres du poteau support de LAC percuté ; selon le raisonnement présenté dans le guide, cette distance aurait dû être suffisante pour arrêter le tramway, étant supérieure à la distance « d » de 31,50 m évoquée ci-dessus.

4.7- Retour d'expérience sur les accidents de tramway en giratoire

4.7.1- L'accidentologie du giratoire « Vasco de Gama »

L'accidentologie du giratoire Vasco de Gama est la suivante :

Giratoire	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Vasco de Gama	0	0	0	2	2	1

Les accidents qui se sont produits ont fait 2 voyageurs blessés lors d'un seul accident. Les autres accidents n'ont causés que des dégâts matériels mineurs. Tous se sont déroulés suite à un non respect de la signalisation lumineuse par les véhicules concernés.

4.7.2- L'accidentologie sur les giratoires du réseau de tramway nantais

Le réseau de tramway de Nantes compte 54 giratoires répartis sur les trois lignes de la façon suivante : 12 giratoires sur la ligne 1, 27 giratoires sur la ligne 2 et 15 giratoires sur la ligne 3.

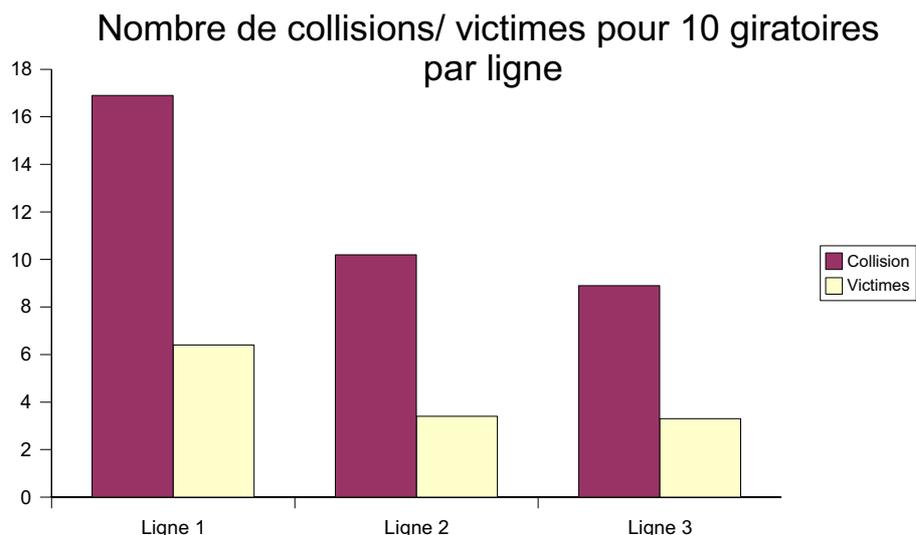


Schéma 19 : Les collisions / victimes sur le réseau nantais de tramway par ligne

(Source : base de données « Accidents » du STRMTG – rapport annuel 2005 de la SEMITAN)

On constate que la ligne 1, ligne historique, est plus accidentogène que les deux autres lignes. Certains carrefours giratoires, qui ont notamment deux voies de circulation en entrée de giratoire, sont plus concernés que d'autres, par exemple le giratoire Coty / Egalité. Cette configuration peut induire des vitesses élevées augmentant ainsi le risque d'accident.

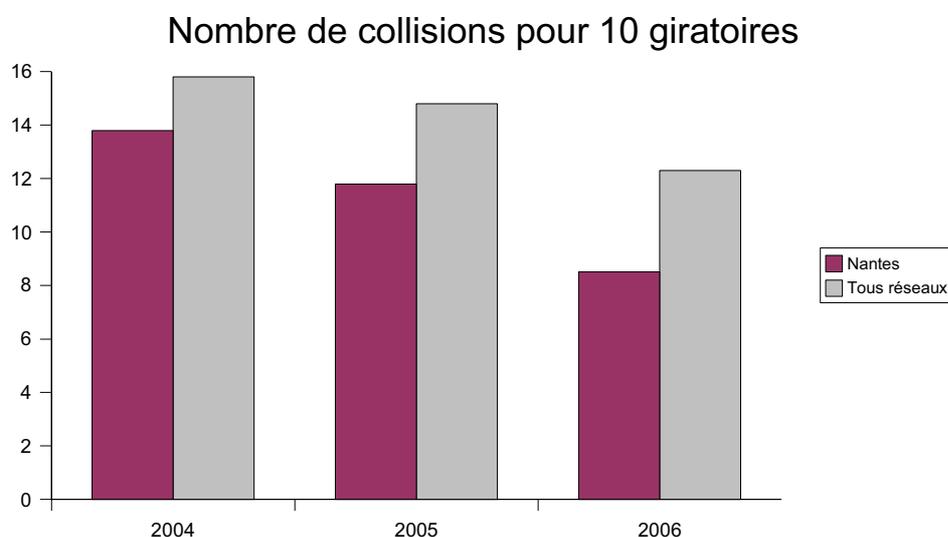


Schéma 20 : Les collisions sur le réseau nantais de tramway

(Source : base de données « Accidents » du STRMTG – rapport annuel 2005 de la SEMITAN)

On constate que le nombre de collisions pour 10 giratoires est en baisse sur le réseau de Nantes entre 2004 et 2006, comme pour les autres réseaux.

Par ailleurs, le nombre de collisions pour 10 giratoires sur le réseau de Nantes est inférieur à celui concernant l'ensemble des carrefours giratoires de tous les réseaux de France, en exploitation.

Nombre de victimes pour 10 giratoires

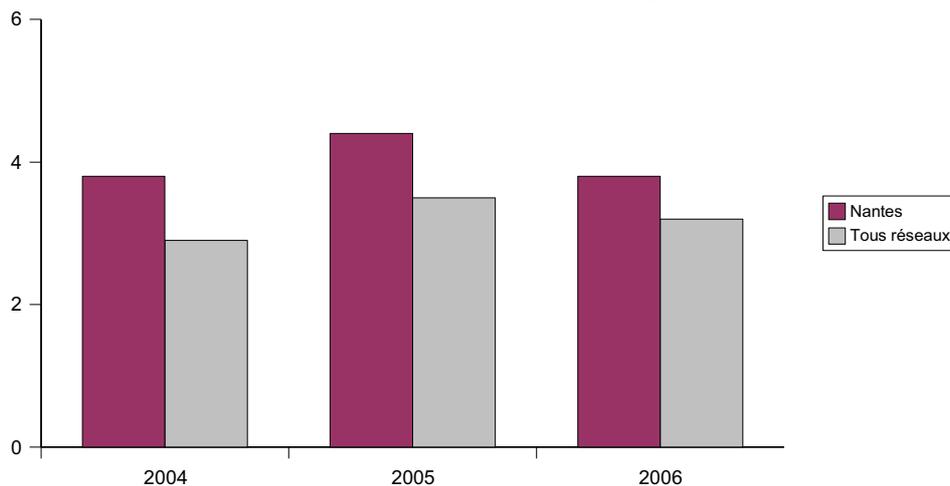


Schéma 21 : Les Victimes sur le réseau nantais de tramway

(Source : base de données « Accidents » du STRMTG – rapport annuel 2005 de la SEMITAN)

S'agissant du nombre de victimes pour 10 giratoires, il n'y a pas d'évolution notable entre 2004 et 2006. On constate seulement que le nombre de victimes pour 10 giratoires sur le réseau de Nantes est légèrement supérieur à celui constaté sur l'ensemble des réseaux de France en exploitation. Ce point est à modérer par le fait que le ratio du nombre de victimes pour 10 intersections provient d'un petit nombre d'accidents.

4.7.3- Retour d'expérience sur des accidents similaires

Les événements retenus pour la présente étude portent sur des accidents qui se sont déroulés en carrefours giratoires traversés par une ligne de tramway pour lesquels il y a eu choc contre un obstacle fixe.

De mémoire d'exploitant, 5 événements peuvent être pris en compte, 3 à Nantes et 2 à Lyon.

Trois accidents sur le réseau de tramway de Nantes, sur la ligne 2,

- Deux accidents sur le giratoire « Cardo Rue du Printemps » qui est localisé sur la commune d'Orvault, sur la ligne 2 du tramway de Nantes. Ce giratoire se situe dans une zone commerciale à proximité de la route de Rennes, axe routier important d'entrée dans Nantes.

Les poteaux supportant la LAC sont implantés en axial.

Deux entrées du giratoire (Esplanade du Cardo et rue du Printemps) sont équipées de signalisation lumineuse, R22j, et les traversées de plate-forme sont équipées de signaux R24.

Les accidents du 15 octobre 2004 et du 14 décembre 2007 se sont déroulés d'une manière voisine puisque, dans les deux cas, le tramway a percuté une voiture franchissant le signal R24 au rouge venant de la rue du Printemps avant de la traîner contre un poteau support de LAC et de la broyer, entraînant le décès du conducteur du véhicule lors de l'accident du 15/10/04.

- Un accident sur le giratoire « Cassin Bout des Landes » qui est localisé sur la commune de Nantes, sur la ligne 2 du tramway nantais.

Les poteaux supportant la LAC sont implantés en axial.

Les entrées du giratoire sont équipées de signalisation lumineuse (R22j) et les traversées de plate-forme sont équipées de signaux R24 depuis 2003, en lieu et place de signaux R11j.

L'accident du 6 octobre 1994 s'est déroulé d'une manière similaire aux deux accidents présentés précédemment, le tramway ayant percuté une voiture franchissant le signal R11j au rouge avant de la traîner contre un poteau support de LAC et de la broyer, entraînant le décès du conducteur du véhicule.

Deux accidents sur le réseau de Lyon, au niveau du giratoire Bron/Parilly sur la ligne T2

Le giratoire « Bron Parilly » est localisé sur la commune de Bron, sur la ligne T2 du tramway de Lyon. Il est situé à proximité de l'autoroute A 43, dans une zone très fréquentée, car à proximité de l'hippodrome de « Lyon Parilly » et du centre commercial de « Porte des Alpes »

Chaque entrée est équipée de signalisation lumineuse R11j et les traversées de plate-forme sont équipées de signaux lumineux tricolores « classiques », des R11v (vert-jaune-rouge). En 2001, les traversées de plate-forme étaient également équipées de signaux R11j.

L'accident du 18 juillet 2006 s'est déroulé dans les mêmes conditions que les trois accidents précédemment cités puisque le tramway a, d'abord, percuté une voiture franchissant le signal R11v au rouge, puis l'a poussée, l'a faite pivoter avant de la coincer entre la rame de tramway et le poteau support de LAC.

L'accident du 21 novembre 2001 a été différent, au final, dans la mesure où la camionnette percutée par le tramway n'a pas heurté le poteau support de LAC du fait du déraillement du tramway.

Les cinq cas présentés confirment l'utilité et la nécessité de définir des zones devant être libres de tout obstacle fixe dans les intersections car nous constatons, à la lumière de ce retour d'expérience, que les obstacles de type « poteaux, supports de LAC », dont la localisation est non conforme au guide du STRMTG paru en avril 2007, ont été des facteurs aggravants.

Les exploitants des réseaux concernés par ces accidents mènent actuellement des réflexions pour traiter ces zones et doivent proposer, courant 2008, des solutions.

Nous remarquons également que, pour les cinq accidents présentés, le choc sur l'obstacle fixe (effectif pour 4 accidents) a eu lieu immédiatement après le premier choc, sans que la voiture ait été poussée durant la traversée du giratoire, après un premier choc, comme cela s'est produit sur l'accident du 4 juin 2007, sur le giratoire « Vasco de Gama » de Saint-Herblain.

4.7.4- Bilan des expérimentations entreprises à Nantes

4.7.4.1- Par le CETE* du sud-ouest - la « ZELT »

Une expérimentation portant sur « l'évaluation du respect du « rouge clignotant » lié au signal R24 sur un carrefour giratoire traversé par le tramway, à Nantes », dont une conclusion a été éditée en décembre 2006, a été menée par la « ZELT* ».

Cette étude semble valider le signal R24 en barrage à condition d'en multiplier le nombre ; il s'agissait, ainsi, de faire passer de deux à six le nombre de signaux sur un même barrage.

La méthodologie suivie a été de comptabiliser les franchissements des signaux en distinguant le moment de la transgression : il s'agissait donc de mettre en évidence le taux de respect (ou de violation) du « rouge ». Différentes situations d'implantation des signaux R24, en hauteur et en nombre, ont été testées sur un seul carrefour, durant des périodes successives.

* Terme figurant dans le glossaire

Pour être mieux perçus, on a introduit une alternance dans le fonctionnement des feux.

La réduction du nombre de franchissements tardifs (franchissements à plus de deux secondes du début et de la fin du rouge) est de 39%. Celle liée à l'ensemble des franchissements est de l'ordre de 19%.

Ces gains ne sont toutefois pas à mettre exclusivement au profit du renforcement de la signalisation lumineuse, car d'autres aménagements participaient, également, à une meilleure lecture de l'environnement du carrefour, telles les bandes rugueuses proches du centre de l'anneau, pour en limiter le nombre de file, et ayant pour effet de rendre plus orthogonal le franchissement du barrage.

L'expérimentation, menée par la « ZELT », prévoyait également un bilan de l'utilisation des signaux R24 sous cette configuration, à faire par la SEMITAN, sur un an d'exploitation, en comparant le fonctionnement des carrefours selon qu'ils étaient traversés par des tramways ou par des autobus : cette expérimentation a donc été réalisée sur la ligne 4, mise en service le 6 novembre 2006 et dévolue à la circulation de Bus à Haut Niveau de Service (BHNS*), ainsi que sur les 3 lignes de tramway, 1, 2 et 3 (un carrefour par ligne).

« La comparaison des franchissements du R24 entre les carrefours traversés par le BHNS et ceux traversés par un tramway, comparables en terme de configurations géométriques et de trafic, ne fait pas apparaître de différence flagrante dans les indicateurs de mesures utilisés. Il apparaît également que les franchissements ont lieu plus tôt après le début du rouge clignotant dans les carrefours tramway et que, par conséquent, la part des franchissements tardifs est plus importante pour les carrefours traversés par le BHNS ». (source rapport de la ZELT d'octobre 2007).

L'expérimentation est reconduite par la DSCR.

4.7.4.2- Par le STRMTG

Dans le cadre d'un groupe de travail sur la signalisation des giratoires de tramways, une expérimentation, menée fin 2002 à Nantes, a tenté d'évaluer la pertinence de l'utilisation comparée des signaux R24 et R11j en tant que signaux de barrage sur un giratoire traversé en axial par une plate-forme tramway. Il s'agissait également d'évaluer la pertinence du retrait des signaux R22j en entrée de giratoire, dans des carrefours équipés de signaux R24 en barrage, du même type que celui sur lequel s'est produit l'accident.

Dans le premier cas, il s'agissait, sur un même carrefour, de mesurer la variation du nombre d'automobilistes transgressant le rouge lié aux deux signaux installés successivement, dans le temps (l'un en remplacement de l'autre), tandis que dans le deuxième cas, il s'agissait, sur un autre carrefour du même type, de retirer progressivement les signaux R22j en entrée de giratoire et de mesurer la variation des transgressions des signaux de barrage.

Cette expérimentation a permis de dégager les enseignements suivants.

Concernant l'utilisation du signal R24 en barrage à la place du R11j :

- le signal R24 est mieux respecté que le signal R11j ; on notera, cependant, que sa perception était forcément meilleure du fait d'une implantation sur giratoire plus basse que celle du signal R11j, à hauteur des yeux des conducteurs ;
- en fonctionnement nominal (absence de tramway), le giratoire est plus lisible car les signaux de barrage sont éteints.

* Terme figurant dans le glossaire

Concernant la suppression des signaux R22j aux entrées de giratoire :

- le giratoire devient plus lisible en l'absence de tramway (plus aucune signalisation lumineuse n'est en fonctionnement) et les signaux de barrage en sont, dès lors, mieux respectés lorsqu'ils sont activés.

Des restrictions doivent toutefois être apportées pour les giratoires de petite dimension (R extérieur < 12 à 14m) où la taille de l'îlot central ne permet pas l'implantation de signalisation et où la suppression des signaux R22j en entrée de carrefour risquerait de provoquer une congestion de l'anneau.

Cette réflexion a permis d'alimenter le groupe de travail chargé de l'élaboration du guide « Giratoires et Tramways – Franchissement d'un carrefour giratoire par une ligne de tramway ».

Celle-ci doit être poursuivie, notamment, au vu du retour d'expérience.

4.7.5- Etude accidentologique du STRMTG sur les giratoires traversés par des tramways

Les années prises en compte sont les années 2004 à 2006.

Les réseaux pris en compte dans l'étude sont ceux des agglomérations françaises où circulent des tramways, à l'exception de Strasbourg qui ne possède pas de giratoires traversés par des tramways, ainsi que de Rouen, ville pour laquelle les données suffisantes n'étaient pas disponibles au moment de la rédaction de cette analyse. Nice, de réalisation récente, ne figure pas, non plus, dans la liste.

Par souci d'homogénéité, seuls les réseaux de tramway « fer » ont été pris en compte (mêmes capacités de freinage et même type de guidage).

Cette étude a permis de constater les tendances suivantes :

- le nombre de collisions de tramways avec des tiers, en giratoire, est environ 2 fois supérieur à celui observé pour l'ensemble des intersections ;
- malgré un échantillonnage limité en nombre, ce qui affaiblit la démonstration, on perçoit un nombre de victimes, lors de collisions de tramways avec tiers, en giratoire, environ 2 fois supérieur à celui observé pour l'ensemble des intersections ;
- les giratoires de grande taille sont particulièrement accidentogènes du fait, notamment, des vitesses élevées qui peuvent y être exercées ;
- les taux de collisions et de victimes dans les giratoires avec une seule voie de circulation en entrée de carrefour sont très largement inférieurs à ceux constatés pour l'ensemble des giratoires ;
- la présence d'une ligne de feux en entrée de giratoire semble avoir des effets positifs sur l'accidentologie des tramways, au moins au niveau du nombre de collisions.
-

L'étude est consultable en annexe 6.

4.7.6- Les questions ouvertes

L'aménagement d'un carrefour giratoire traversé par un tramway est délicat : des guides ont été publiés récemment, bien après la mise en place du tramway dans les villes, comme à Nantes/Saint-Herblain, mais le retour d'expérience continue de se construire, notamment par le fait que certaines dispositions du guide ont été arrêtées avant la stabilisation des observations. De ce fait, certaines questions déjà traitées dans le guide sont encore susceptibles d'évoluer.

Les réflexions menées durant l'enquête ont donc permis de pointer quelques questions ouvertes :

- Le guide « giratoires et tramway » du STRMTG évite de recommander une signalisation lumineuse tricolore en entrée de carrefour, tandis qu'une étude récente du STRMTG, de mai 2008, sur l'accidentologie dans les carrefours giratoires traversés par un tramway, en démontrerait l'utilité. Quelle utilité confère-t-on à une signalisation lumineuse en entrée de carrefour giratoire, et éventuellement, quel type de signalisation adopter ?
- L'ambiguïté du signal R24 semble suggérer des expérimentations complémentaires visant à évaluer les comportements des usagers de la route face à d'autres signaux, notamment des feux tricolores ordinaires, par ailleurs actuellement autorisés. Quelle signalisation adopter en barrage ?
- Faut-il chercher à homogénéiser la signalisation routière au contact du tramway dans l'ensemble des agglomérations françaises concernées pour éviter de dérouter des usagers ne connaissant pas les agglomérations qu'ils traversent ?

4.8- Mesures prises depuis l'accident

Cet accident confirme l'intérêt des aménagements engagés par la SEMITAN au titre des différents programmes pluriannuels décidés auparavant.

4.8.1- Programme de remise à niveau des carrefours giratoires proposé par la SEMITAN

Dans le cadre d'un mandat pluriannuel 2005-2007, Nantes Métropole a confié à la SEMITAN la mise en sécurité du réseau tramway : la sécurité est, dès lors, identifiée comme un enjeu prioritaire.

Au delà de l'expérimentation portant sur la signalisation en barrage dans les carrefours giratoires traversés par des tramway (cf. celle menée par la ZELT), la SEMITAN a étendu la réflexion à un ensemble de mesures susceptibles d'améliorer la sécurité dans ce type de carrefours. A l'origine, les mesures issues de cette réflexion étaient destinées à être appliquées sur la ligne n°3 ; l'accident du 4 juin 2007 a réorienté l'urgence d'une intervention portant sur la sécurité sur la ligne n° 1.

Les mesures proposées par l'exploitant concernent des actions sur la signalisation lumineuse ainsi que d'autres ayant un impact sur la vitesse, la visibilité ou la résistance aux chocs des poteaux de signalisation.

- Concernant la signalisation, il s'agit :
 - ✓ de renforcer la visibilité de la prescription, par la réalisation d'une ligne de feux (6 signaux R24 [4 à gauche, 2 à droite] en barrage au lieu de 2) et par l'utilisation de diodes électro-luminescentes,
 - ✓ de repositionner les boucles de détection pour optimiser les réglages de feux et éteindre les feux en barrage sitôt le passage du tramway (en expérimentation sur la ligne 4),
 - ✓ de supprimer les signaux (R11j ou R22j) en entrée de carrefour giratoire. Le programme ne comporte pas le positionnement de panneaux A9 en entrée de carrefour, notamment dans les secteurs fréquentés par des populations non locales : la pertinence d'un tel choix technique et sa mise en oeuvre dépendront des suites qui seront apportées à la recommandation R1.

- Concernant les mesures destinées à diminuer la vitesse sur l'anneau, il s'agit :
 - ✓ de réduire la partie circulée du giratoire par la mise en place de barrettes en résine,
 - ✓ de réduire à une voie l'entrée sur les giratoires, ce type de réduction étant également retenu pour les sorties.
- Concernant les mesures destinées à accroître la visibilité, il s'agit :
 - ✓ de positionner, au sol, une texture et une couleur de matériaux pour améliorer les contrastes,
 - ✓ de prolonger l'emprise de la plate-forme tramway par une continuité de bordures afin d'assurer « l'écriture » du site tramway,
 - ✓ de s'assurer des conditions de visibilité en entrée de carrefour.
- Concernant les dispositions portant sur la limitation des conséquences directes d'un impact sur obstacle fixe, en cas d'accident, il s'agit :
 - ✓ de mettre en place des poteaux fusibles pour supporter la signalisation, lumineuse ou non.

La grande majorité des aménagements proposés vont dans le sens de l'avancement des réflexions menées au niveau national sur la conception des carrefours giratoires traversés par des tramway. Une première tranche de travaux, comprenant la ligne 1 « ouest », est en cours par la SEMITAN.

4.8.2- Le programme de déplacement des poteaux de LAC

LA SEMITAN a lancé un programme de déplacement des poteaux support de LAC sur l'ensemble de son réseau. Ce programme, annoncé par la SEMITAN dans son rapport du 12 juin 2007 relatif à l'accident du 4 juin 2007, prévoit dans un premier temps de lister les poteaux se situant dans les zones à risques, au sens du guide du STRMTG (31,5 mètres, en distance longitudinale pour une vitesse de 40 km/h, cf. le schéma 18 pour caler les extrémités), puis de définir les actions à lancer par ordre de priorité sur la base de 3 critères :

- ✓ la gravité (énergie cinétique au point d'impact) ,
- ✓ l'accidentologie des carrefours concernés ;
- ✓ la complexité des travaux à réaliser (notion de coût).

L'objectif de la SEMITAN est de pouvoir disposer d'un programme afin de le présenter à Nantes Métropole courant 2008.

A ce sujet, Nantes Métropole a voté, en décembre 2007, un programme de sécurité concernant le réseau tramway portant sur 5 M€ TTC : il s'agit, principalement, de réaliser le déplacement de certains poteaux supports de LAC, de poursuivre le renforcement du programme d'amélioration de la signalisation et de réaliser diverses autres interventions.

5- Déroulement reconstitué de l'évènement

5.1- Parcours et conduite des véhicules impliqués

5.1.1- La voiture particulière et son parcours avant l'accident

Le conducteur de la voiture et son épouse, la passagère, revenaient de vacances à l'Ile de Ré et remontaient sur Quimper afin de regagner leur domicile de Pluguffan, à l'ouest de Quimper. Etant partis à 10 h 00 et arrivant à Nantes, ils ont pris le périphérique et souhaitaient prendre la sortie n°32, « porte d'Armor », pour récupérer la route de Vannes. Étant sorti à la « porte Atlantis », une sortie trop tôt, le conducteur de la voiture a cherché à revenir sur le boulevard périphérique pour retrouver sa route et sortir à la porte d'Armor (voir schéma 22 ci-dessous).

Il est donc revenu vers le périphérique par le boulevard Salvador Allende, en ignorant qu'il côtoyait un site propre tramway, son attention étant totalement focalisée sur les panneaux routiers pour redescendre sur le périphérique. Son épouse cherchait également la route sur une carte routière.

Cependant, aucune bretelle ne permet de reprendre le périphérique vers la porte d'Armor depuis le boulevard Salvador Allende. Le conducteur a donc dû traverser le pont enjambant le périphérique pour retrouver son chemin, son attention étant toujours retenue par les panneaux de direction, et celle de son épouse, par la lecture de la carte routière.

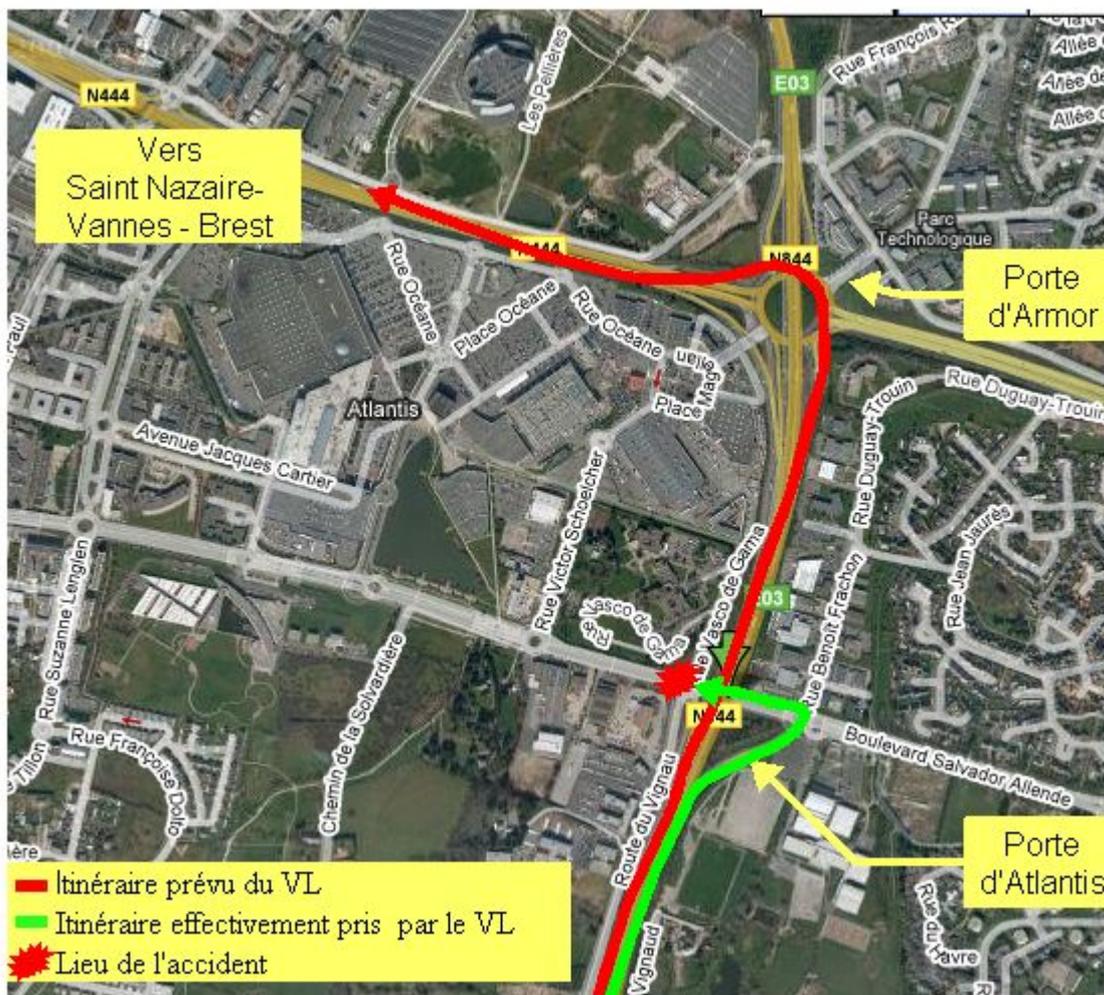
Arrivé au giratoire « Vasco de Gama », il n'a pas vu le feu d'entrée de carrefour qu'il a vraisemblablement franchi au rouge. Il a bien aperçu le clignotement des feux rouges en barrage (celui des signaux R24), mais il ne l'a pas interprété comme étant le signal d'un arrêt absolu, et l'aurait confondu avec celui d'un feu routier de couleur orange, non porteur d'obligation d'arrêt.

Puis, il a cru apercevoir un véhicule perçu comme un autobus, alors qu'il s'agissait du tramway, venant sur sa droite, vers le giratoire, véhicule sur lequel il lui a semblé avoir priorité, car il était lui-même sur l'anneau. Il ne savait pas qu'il y avait un tramway qui circulait dans le secteur, et sa mauvaise perception de la signalisation ne lui a pas, par ailleurs, permis de lire correctement le contexte nouveau dans lequel il circulait.

Le fait que lui-même et la passagère aient eu leur attention captivée par la recherche d'un itinéraire de « récupération » pour pallier leur erreur, a sans doute ajouté à l'incompréhension du contexte urbain dans lequel ils évoluaient. La présence des panneaux C20c, rencontrés en barrage, n'a pas suffi à rétablir une bonne lecture de ce contexte routier.

Le choc a été soudain et les réactions du conducteur de la voiture, telles qu'il les relate, dénotent une surprise totale.

Schéma 22 : Itinéraire suivi par la voiture, avant l'accident



(Source Fond photographique Google Map)

5.1.2- Le tramway et sa conduite avant l'accident

Peu de temps avant l'accident, la rame de tramway remontait de la station « Schoelcher » en direction de la Beaujoire et de la station suivante, « Frachon » (voir schéma 2, page15) ; il restait, au conducteur un retour « la Beaujoire » - « Belier » avant de terminer son service et d'être relevé à 13 h 20.

Après la station « Schoelcher », la pente s'accroît ; le conducteur a donc agi sur le manipulateur pour relever la vitesse à 47 km/h. La vitesse est limitée à 50 km/h en ligne et à 40 km/h dans la traversée des carrefours.

Le conducteur a aperçu, sur sa droite, la signalisation tricolore passer de l'orange clignotant au rouge pour les voitures : il a mis le « manipulateur » au neutre de manière à laisser le tramway continuer sur sa lancée, « sur l'erre ».

En s'approchant du carrefour « Vasco de Gama », il a vu que le signal spécifique au tramway, R17, s'est mis en position verticale, l'autorisant à franchir le carrefour. Ayant perdu de la vitesse, à cause de la pente, le conducteur a donné « un léger coup de manipulateur » pour continuer sa progression.

Au même moment, lorsqu'il abordait le carrefour, il a vu un véhicule Renault « Espace » venir sur sa gauche ; ne percevant pas les intentions du conducteur de la voiture, il a « gongué » pour le prévenir de son arrivée sur le carrefour.

Pour le conducteur du tramway, les signaux R24 fonctionnaient (ils clignotaient) ; ce fonctionnement est d'ailleurs également confirmé par des témoins extérieurs. Cela dit, « la voiture poursuivait sa route sans ralentir : elle ne roulait pas vite, manifestement comme si son conducteur n'avait pas vu arriver le tramway ».

Dès qu'il a vu que la voiture ne s'arrêterait pas et qu'elle franchissait la ligne de feux de barrage, le conducteur du tramway dit avoir tiré le manipulateur, à fond, pour déclencher le freinage d'urgence.

Cependant, l'analyse de la boîte noire montre que l'activation du FU « manipulateur » n'a eu lieu, environ, que 3 secondes après le choc initial contre la voiture et que le manipulateur n'a vraisemblablement pas été positionné, non plus, sur la position du FMS, positionnement qui aurait dû avoir un impact plus sensible sur la distance d'arrêt du tramway, eu égard aux caractéristiques de décélération encore fortes du frein maximum de service (1,45 à 1,53 m/s²).

Le conducteur du tramway évoque, dans son rapport interne à l'entreprise, une voiture roulant dans le même sens que lui qui aurait attiré son attention par le très important volume sonore qu'elle dégageait et par le non respect de la signalisation de son conducteur. Ces deux facteurs l'ont précisément porté à déployer le rétroviseur extérieur pour améliorer la perception du comportement du conducteur de ce véhicule sur sa droite.

L'attention portée sur la droite, par le conducteur du tramway, a peut-être handicapé son temps de réaction à l'évènement qui surgissait sur sa gauche ; la voiture a donc été heurtée sans que la rame ait sensiblement modifié sa vitesse nominale.

5.2- Les phases successives de la collision

5.2.1- Reconstitution cinématique

Le laboratoire « Euro Crash » a été sollicité pour reconstituer la cinématique du/des chocs, en intégrant les paramètres connus de l'accident. Ce laboratoire est situé à l'Ecole centrale de Nantes, au Département de la Recherche.

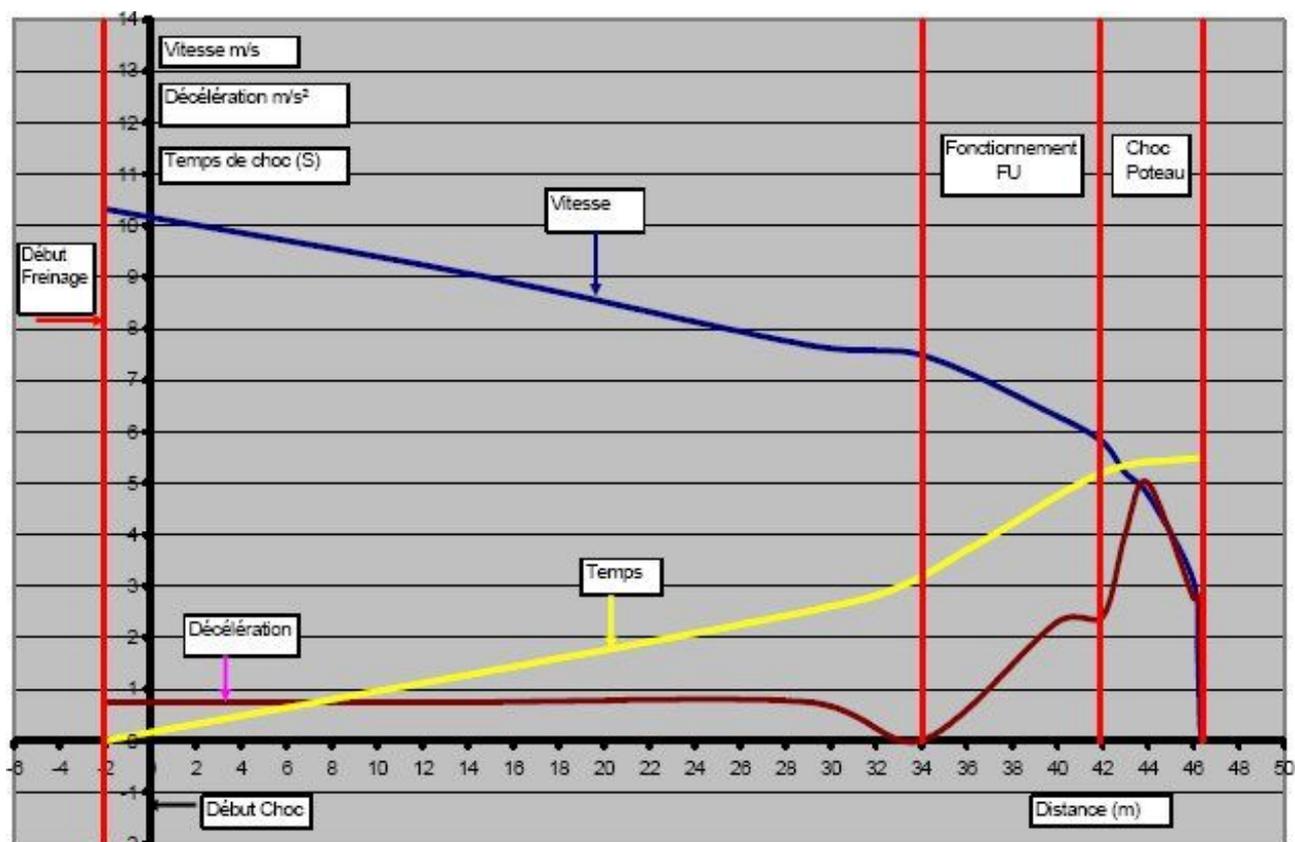
Malgré l'insuffisance des données à notre disposition due, notamment, à la carence des renseignements stockés dans la boîte noire et aux fréquences d'enregistrement trop faibles (par exemple, 0,5 seconde par point), une modélisation a tout de même permis d'expliquer les conséquences des différents chocs subis par le tramway et la voiture (voir annexe 4).

La simulation a retenu les données suivantes :

- la voiture pèse 1,6 tonnes, et le tramway pèse 56 tonnes, y compris la cinquantaine de passagers présents dans la rame au moment de l'accident ;
- les coefficients de frottement de la voiture, au sol, et du tramway sont, respectivement, de 0,5 et 0,2 ;
- la vitesse initiale d'impact est de 10,32 m/s.

La reconstitution de l'accident permet de définir le diagramme du choc suivant.

Schéma 23 : Diagramme du choc côté tramway – variation de la vitesse, de la décélération et du temps de choc en fonction de la distance parcourue



(Source rapport d'expertise « Eurocrash »)

Comme le montre le schéma 23, ci-dessus, un ralentissement ou un début de freinage, assurément pas un freinage d'urgence (FU), a eu lieu avant le premier choc, 2 mètres avant, environ.

- Lors du premier choc, la vitesse est légèrement supérieure à 10 m/s et la décélération constante à, environ, 0,65m/s² (un FNS* peut entraîner une décélération atteignant 1,31m/s²).
- Le FU a lieu, environ, à 34 mètres du premier choc, soit 3 secondes plus tard. La décélération augmente jusqu'au niveau nominal de 2,2m/s².
- 42 mètres après le premier choc, et 2 secondes après avoir enclenché le FU, l'ensemble « tramway + voiture » heurte le poteau support de LAC : la vitesse chute et la décélération monte rapidement à 5m/s².
- 4 mètres plus loin, la voiture est broyée entre le poteau support de LAC et la rame de tramway.

Moins de 6 secondes après le choc initial et 46 mètres plus loin, le crash est fini.

L'énergie totale dissipée dans le crash est d'environ 3 000 KJ

5.2.2- Le choc initial entre le tramway et la voiture

Le conducteur du tramway a percuté « de plein fouet » la voiture sur son côté droit, l'inertie du tramway ayant favorisé, ensuite, le poussage de la voiture sur plus de 40 mètres.

* Terme figurant dans le glossaire

L'analyse de la boîte noire et la reconstitution de l'enchaînement des événements montrent qu'il y a eu un ralentissement ou un début de freinage, environ 2 mètres avant le choc initial, et que le freinage d'urgence n'a été déclenché que trois secondes après ce premier choc.

Les essais de freinage sur cette rame de tramway montrent, effectivement, qu'à 40 km/h, le déclenchement du FU provoque l'arrêt de la rame en 31,50 mètres, environ : le « poussage » de la voiture sur plus de 40 mètres corrobore le déclenchement tardif du FU.

La simulation sur le choc initial a montré que la voiture a subi une succession de chocs, 6 chocs pendant 3 secondes, avant que celle-ci n'acquière la vitesse de la rame de tramway (voir annexe 4 chapitre IV-1). Le premier choc a propulsé la voiture à 12 m/s ; freinée par ses roues (la voiture était poussée en travers), la voiture a été rattrapée par le tramway qui l'a percutée une deuxième fois, en faisant croître sa vitesse de 7 m/s, et ainsi de suite jusqu'à ce que les deux structures, « voiture + tramway », se déplacent à la même vitesse, c'est-à-dire autour de 10 m/s.

La succession de ces chocs a provoqué un enfoncement latéral droit de la voiture d'environ 220 mm.

5.2.3- Le choc contre le poteau support de LAC

Le FU a été déclenché 3 secondes, environ, après le choc initial, soit après avoir parcouru plus de 30 mètres. La vitesse a chuté de 27 km/h, environ, à une vingtaine de km/h : c'est à cette vitesse, soit 8 à 10 mètres après le déclenchement du FU, que la voiture a heurté le poteau support de LAC, puis, a été écrasée entre la rame et le poteau support de LAC.

Le choc a été ressenti assez violemment par le conducteur de la voiture. Le témoignage d'un voyageur atteste, également, de la brutalité de l'arrêt contre le poteau support de LAC, violence confirmée par les résultats de l'étude « Euro-crash ».

La voiture a, en effet, été broyée entre la rame de tramway et le poteau support de LAC qui s'est incliné d'une vingtaine de degrés sous l'effort. L'écrasement de la structure a duré, environ, une demi seconde : il est effectué par compression, rotation et chevauchement. C'est ce second choc qui a vraisemblablement causé les blessures les plus graves à la passagère décédée.

Un freinage d'urgence actionné au niveau du premier impact aurait permis d'éviter le deuxième choc sur le poteau support de LAC.

5.3- Les suites de l'accident et l'intervention des secours

A l'extérieur de la rame de tramway, des témoins ont immédiatement porté assistance selon divers processus :

- plusieurs témoins ont porté assistance au conducteur de la voiture, tout de suite après le choc ;
- un autre témoin a appelé les pompiers.

Le conducteur du tramway a appuyé sur la pédale d'urgence pour aviser son PCC de l'accident afin que celui-ci appelle les secours. Alors que le conducteur du tramway était toujours en liaison avec son PCC, il a vu le conducteur de la voiture accidentée sortir de l'habitacle.

Il a commandé l'ouverture de la petite porte se trouvant à l'arrière droite de la cabine de conduite pour que les passagers descendent de la rame ; d'autres passagers, situés dans la partie arrière de la rame, sont sortis par une ou deux autres portes qu'ils ont déverrouillées de l'intérieur. Ensuite, il est sorti de sa cabine, est descendu du tramway et est resté à l'extérieur, contre le flanc du tramway. C'est à ce moment là qu'il a appris que la passagère était coincée dans les tôles.

Suite à l'alerte déclenchée par le conducteur du tramway, le PCC de la SEMITAN a décidé l'envoi d'une voiture d'intervention et d'une équipe d'agents de sûreté.

L'Officier de police judiciaire (OPJ) en résidence à Nantes est informé, par la salle de commandement, de cet accident.

Les sapeurs pompiers sont présents (ils sont arrivés moins de 10 minutes après l'accident, soit vers 12 h 24) et le SAMU également (un peu plus tard, vers 12 h 45). La police du commissariat de Saint-Herblain est également sur place et procède à la déviation de la circulation aux abords du giratoire Vasco de Gama.

L'OPJ demande à la salle de commandement de prévenir l'identité judiciaire du service local de police technique afin de se rendre sur les lieux. Il se rend sur les lieux à 13 h 25 et constate que la police municipale est déjà sur place.

L'inspecteur de permanence du matin et l'adjoint exploitation de la SEMITAN (inspecteur de permanence du soir) sont présents, ainsi qu'une équipe de maintenance tramway et des techniciens des installations fixes (SEMITAN), dépêchés sur place, au vu des dégâts importants sur la rame et sur le poteau support de LAC. Des agents de prévention ont été positionnés au terminus « François Mitterrand » ainsi qu'à la station « Tertre » afin d'informer la clientèle de l'arrêt d'exploitation.

Le conducteur du tramway a été brièvement entendu par l'équipage de police et l'alcootest s'est révélé négatif. Il a été raccompagné par un agent de la SEMITAN au dépôt de DALBY pour y établir une déclaration interne d'accident du travail ; il n'a pas souhaité être raccompagné et est rentré seul à son domicile.

Le conducteur de la voiture accidentée a été emmené aux « urgences », car il avait de nombreux saignements de tête ; son état n'inspirait cependant pas d'inquiétude.

La décision de mettre en place trois autobus en relais, puis quatre, est prise par la SEMITAN qui envoie, également, un « brimon* » pour bouger la rame après la désincarcération.

L'épouse du conducteur de la voiture, la passagère, est restée incarcérée dans son véhicule jusqu'à 14 h 15. A 14 h 20, le service de maintenance de la SEMITAN soulève la motrice à l'aide de vérins hydrauliques, pendant que les pompiers et le SAMU dégagent la victime en la posant sur un brancard, avant de la placer dans un VSAB. La passagère décède vers 14 h 30.

A 17 h 30, la rame accidentée est évacuée, ainsi que la rame n° 343 bloquée au terminus « François Mitterrand ».

Le retour en parcours normal est opéré vers 18 h 30, le passage au droit du poteau support de LAC endommagé s'effectuant à vitesse très réduite (moins de 10 km/h).

En conclusion, l'enchaînement des alertes-secours a fonctionné normalement : les services de secours sont intervenus rapidement sur les lieux de l'accident.

Le règlement de sécurité et d'exploitation (RSE) de la SEMITAN a été respecté.

Les responsables et agents concernés ont en effet été mobilisés rapidement :

- deux inspecteurs de permanence ;
- une voiture d'intervention ;
- des agents de maîtrise « sûreté » ;
- des techniciens du service des installations fixes ;

* Terme figurant dans le glossaire

- le service technique pour le levage de la rame ;
- les directeurs « exploitation et maintenance » et « infrastructures et développement », ainsi qu'un cadre du département sécurité tramway / BUSWAY.

Des autobus de remplacement ont été mis en place et l'exploitation a pu être relancée un peu plus de six heures après l'accident.

6- Analyse des facteurs et orientation préventive

L'examen du déroulement de l'accident amène à rechercher des orientations préventives et d'apporter des précisions utiles dans les domaines ci-après :

- ✓ l'aménagement et le fonctionnement du carrefour Vasco de Gama ;
- ✓ le déclenchement du frein d'urgence et les capacités de freinage ;
- ✓ la conception du matériel et les équipements du tramway ;
- ✓ l'organisation du travail et la conduite du tramway.

6.1- L'aménagement et le fonctionnement du carrefour Vasco de Gama

L'agglomération nantaise a été la première, en France, à renouveler l'usage du tramway et à développer un réseau de transport collectif de type tramway, exemple suivi, ensuite, par beaucoup d'autres métropoles. Outre les études liées à la recherche des itinéraires les plus maillants, il s'est agi, ensuite, d'inscrire le site propre dans un réseau viaire construit, à l'origine, pour des véhicules routiers.

La signalisation à mettre en place pour organiser le déplacement de l'ensemble des modes et l'aménagement des carrefours, notamment giratoires, n'ont jusqu'ici, jamais cessé d'évoluer, toujours tournés vers la recherche d'une meilleure sécurité.

Alertés par la relative dangerosité de certaines dispositions liées à l'aménagement de projets tramway sur des systèmes viaires, pas forcément tous parfaitement adaptés à l'accueil d'un site propre, le STRMTG et le CERTU ont élaboré, conjointement, un guide concernant la conception des franchissements d'un carrefour giratoire par une ligne de tramway (version mise à jour et mise en ligne sur le site internet des deux services depuis le début 2008) (voir paragraphe 4.6.2).

Le guide précise les types d'aménagements à éviter tout en en recommandant d'autres.

6.1.1- Géométrie du carrefour

Le carrefour giratoire « Vasco de Gama » comporte des aménagements qui respectent les recommandations contenues dans le guide, notamment : la traversée du tramway en site axial, un îlot central circulaire, une bonne visibilité, ou une cohérence d'aménagement des giratoires le long de la ligne de transport, et d'autres qui ne les suivent pas.

Ce giratoire, réalisé avant la parution du guide, comporte également des dispositions non conformes aux recommandations, telles des entrées à deux voies de circulation et une circulation possible à deux voies sur l'anneau. Sans que le diamètre de l'anneau soit en dehors des normes maximales préconisées par le guide du STRMTG, les dimensions confortables du giratoire, alliées aux dispositions non conformes citées au préalable, peuvent favoriser des vitesses excessives.

Il convient de signaler, toutefois, que l'accident du 4 juin 2007 ne paraît pas lié à ces caractéristiques géométriques, le véhicule accidenté ayant circulé à faible vitesse.

Les désordres potentiels liés à ces caractéristiques ont toutefois bien été compris par l'exploitant comme relevant d'un enjeu prioritaire : celui-ci s'est, ainsi, engagé sur un programme de remise à niveau de ce type de carrefours qui répond en grande partie aux besoins de sécurisation précédemment définis. Les actions concernant la géométrie portent donc :

- sur la réduction de la partie circulée de l'anneau en mettant en place des barrettes en résine autour du cercle intérieur ;
- sur la réduction du nombre de voies en entrée de carrefour à une seule file de circulation ;
- sur l'amélioration de la visibilité du tramway par la mise en place de textures colorées au sol.

6.1.2- Signalisation du carrefour

Le dispositif de signalisation fonctionnait correctement lors de l'accident (pas d'anomalie détectée dans le contrôleur de carrefour, notamment).

Le conducteur de la voiture accidentée n'a pas respecté l'obligation d'arrêt qui lui était ordonné par le rouge clignotant placé en limite de plate-forme tramway (signal R24) ; il n'avait pas remarqué, non plus, la signalisation d'entrée de carrefour, ni respecté le feu rouge activé (signal R22j).

Ces deux manquements interrogent, tout autant, sur la lisibilité de la signalisation que sur sa compréhension par l'utilisateur.

Schéma 24 : La signalisation lumineuse du carrefour giratoire « Vasco de Gama »

(voir schéma 16, paragraphe 4.6.3)



(Source Fond photographique Google Map)

6.1.2.1- La signalisation en entrée de carrefour

Signal lumineux d'entrée R22j

Le signal lumineux d'entrée sur carrefour R22j s'ajoute à la signalisation statique normale d'un giratoire habituellement présente (panneau AB3a « cédez le passage »). Il n'a pas été remarqué par le conducteur de la voiture accidentée qui l'a franchi au rouge ; si celui-ci l'avait respecté, l'accident aurait probablement été évité.

L'implantation d'un signal R22j en entrée de carrefour (feux tricolores, rouge, jaune fixe, jaune clignotant) n'est pas recommandée par l'IISR et n'est pas mentionnée par le guide.

Le guide « STRMTG/CERTU » portant sur les franchissements d'un carrefour giratoire par une ligne de tramway n'en conseille donc pas l'usage.

Cependant, le retour d'expérience sur l'intérêt d'un feu tricolore en entrée de carrefour reste ambigu. En effet :

- d'une part, l'expérimentation, menée fin 2002 à Nantes, par le STRMTG, et évoquée au paragraphe 4.7.4.2, semble montrer que l'allègement de la signalisation en entrée de carrefour renforce la lecture de celle située en barrage : la signalisation en barrage en paraissait, ainsi, mieux respectée ;
- d'autre part, les conclusions de la récente étude accidentologique du STRMTG paraissent, à l'inverse, faire apparaître des effets positifs de cette signalisation lumineuse en entrée de carrefour.

Le STRMTG devra préciser, dans l'avenir, l'intérêt de ce type de signalisation.

Dans le cadre de la mise en sécurité de son réseau, et prenant appui sur les réflexions en cours, la SEMITAN a déjà prévu de supprimer les signaux R11j ou R22j en entrée de carrefour giratoire.

Les questions de la mise en place d'une signalisation lumineuse d'entrée pour les carrefours giratoires de ce type et, dans l'affirmative, du choix du type de signal lumineux le plus approprié, doivent continuer à faire l'objet de recherches pour aboutir à une sécurité optimale.

Panneau A9 de présignalisation

Les panneaux A9 (signalisation avancée de franchissement d'une plate-forme tramway) sont absents à l'approche du carrefour Vasco de Gama : jusqu'en novembre 2008, ces panneaux étaient réglementairement prévus par l'IISR lorsque les traversées de tramway sont équipées de signaux R24, ce qui est le cas, à Nantes/Saint-Herblain.

Depuis, les modifications, introduites par un arrêté dont la publication est en cours, renversent l'obligation puisque la pose de panneaux A9 « est obligatoire lorsque la traversée n'est pas munie d'une signalisation lumineuse ». Ainsi, l'ensemble des carrefours nantais traversés par un tramway étant équipés de signaux R24, n'est-il plus obligatoire de positionner des panneaux A9 en signalisation avancée indiquant le franchissement d'une plate-forme tramway. L'évaluation comparative conduite sur Nantes, par le CERTU, a également montré que la présence ou non de ces panneaux n'avait pas, ou peu d'influence sur le taux de respect des signaux R24, mais pouvait contribuer à avertir de la présence du site propre de transport.

Ce giratoire étant situé en zone péri-urbaine, à proximité du périphérique et d'une zone commerciale régionale (à proximité de la grande surface commerciale IKEA), il est probable qu'une part non négligeable du trafic soit composée de visiteurs qui ne sont pas habitués à la présence d'un tramway et à sa signalisation et pour qui « l'alerte » en entrée de carrefour peut s'avérer utile (le conducteur de la voiture accidentée faisait partie de cette catégorie). En effet, les panneaux C20c, situés sous les signaux R24 en barrage, ne semblent pas avoir joué leur rôle d'alerte dans cet accident, ni d'ailleurs, le feu R22j en entrée de carrefour. La question de la pertinence d'ajouter une signalisation en entrée de certains carrefours reste toutefois posée, et il semble délicat d'écarter définitivement l'utilité potentielle d'une telle information dans d'autres situations.

Ainsi, en zone péri urbaine, dans un territoire susceptible d'être très fréquenté par des usagers non habituels, peut-il être utile de renforcer la pré signalisation, et cela, même dans le cas où la signalisation de barrage est constituée de signaux R24.

Recommandation R1 (Nantes Métropole, SEMITAN) : Identifier les secteurs, notamment péri urbains, où une pré signalisation en entrée de carrefour indiquant la traversée d'un tramway peut ajouter une information utile pour le conducteur automobile.

Définir un programme d'introduction de pré signalisation, notamment le panneau A9 et le mettre en oeuvre.

6.1.2.2- La signalisation en barrage

La signalisation réglementaire à notre disposition, en barrage, est constituée de trois types de signaux et de quelques panneaux juxtaposés ou non, aux signaux lumineux.

L'arrêt absolu est commandé par les signaux R24 (rouge clignotant), R11v (tricolore vert, jaune et rouge fixes) et R11j (jaune clignotant, jaune et rouge fixe).

Les textes réglementaires ne tranchent pas quant au choix à effectuer entre ces trois types de signaux qui relève donc du maître d'ouvrage. Le récent guide STRMTG/CERTU sur les giratoires proscrit l'usage du signal R11j.

La signalisation en barrage du carrefour Vasco de Gama est composée d'un signal R24, positionné de chaque côté de la plateforme de tramway, et d'un panneau C20c placé sous chaque signal ; elle respecte donc les prescriptions applicables. Les lignes de feux en marquage horizontal sont visibles et les temps minimums des matrices de feux fournis sont suffisants au regard des exigences réglementaires.

En barrage, une des questions pendantes est de savoir comment sont perçus les différents types de feux mis en place. Dans le cas du signal lumineux R24, le conducteur rescapé de l'accident a dit, au témoin qui l'aidait à sortir de la voiture, qu'il n'avait pas vu « le feu rouge », pour déclarer, ensuite, à la police, qu'il avait perçu « un feu orange clignotant ».

Ce conducteur n'a donc pas interprété le clignotement du feu rouge R24 comme une obligation de s'arrêter, pour une ou plusieurs des raisons suivantes :

- ✓ parce qu'il ne connaissait pas la signification du signal R24 ;
- ✓ parce que la couleur rouge a été « dénaturée » par un clignotement que le conducteur a mentalement réaffecté à la couleur orange (le feu orange clignotant étant un signal familier, non porteur d'obligation stricte) ;
- ✓ parce qu'il n'aurait rien vu et qu'il reconstituerait, a posteriori, son environnement ;
- ✓ parce que, même s'il dit avoir vu venir un véhicule qu'il a pris pour un autobus, il pensait avoir priorité, car étant sur l'anneau du giratoire.

Cela montre que, lorsqu'un signal est peu connu du grand public, ou simplement de certains conducteurs, une certaine confusion dans l'interprétation de sa signification peut avoir de graves conséquences.

L'expérimentation menée par la ZELT et portant sur « l'évaluation du respect du rouge clignotant lié au signal R24 sur un carrefour giratoire traversé par le tramway, à Nantes », évoquée au paragraphe 4.7.4.1, semble valider ce signal en barrage à condition d'en multiplier le nombre : soit 6 signaux au lieu de 2 (4 à gauche et 2 à droite).

L'expérimentation est toutefois reconduite par la DSCR.

Dans le cadre d'un groupe de travail sur la réglementation et la signalisation des transports collectifs de surface, associant le GART* et l'UTP*, le CERTU a, par ailleurs, engagé une réflexion sur les avantages et les inconvénients liés à l'usage du signal R24 : la conclusion n'est pas définitivement arrêtée, aujourd'hui, et les avis restent partagés. On peut, effectivement, évoquer un défaut de connaissance par le grand public de la signification du signal R24.

* Terme figurant dans le glossaire

On peut aussi pointer l'ambiguïté du clignotement pour une couleur rouge, le clignotement étant pratiquement toujours, par ailleurs, considéré comme un message d'attention ou de prudence dans les signaux lumineux en usage sur le domaine routier et non à une obligation de s'arrêter. L'assimilation erronée d'un « clignotant rouge », peu connu, à un « clignotant orange », familier, peut ainsi se produire.

On peut enfin observer que, par rapport à des feux tricolores, où l'interdiction (feu rouge fixe) intervient après un avertissement constitué par la phase « feu orange », le signal R24 commande instantanément l'arrêt absolu. L'absence d'indication lumineuse, lorsqu'il n'y a pas de tramway en approche (mise au noir), accentue la soudaineté du signal qui apparaît donc sans transition ; une transgression durant les secondes qui suivent la mise en clignotement du rouge est alors inévitable. Ce phénomène a notamment été observé lors de l'expérimentation de la ZELT citée précédemment.

D'autres signaux, actuellement en service à l'étranger, semblent posséder des avantages relativement comparables à ceux du signal R24, sans avoir, toutefois, l'inconvénient lié au clignotement : en Allemagne, un feu jaune fixe/rouge fixe (après un « noir ») permet d'introduire 3 secondes de jaune fixe avant un rouge fixe. Les 3 secondes de jaune fixe sont alors considérées comme le délai de prise de conscience de la nécessité de s'arrêter et permettent, sans doute, de limiter les transgressions du rouge d'interdiction. Un signal tricolore classique (vert, jaune et rouge) aurait également le même avantage.

Une synthèse exhaustive de l'efficacité comparée des signaux en service sur le territoire national, avec d'autres signaux en service chez nos voisins européens, semblerait ainsi opportune.

Le besoin d'homogénéité de la signalisation, sur le territoire national, semble être un objectif naturel à atteindre. Cela requiert la mise en synergie de tous les acteurs institutionnels devant traiter de la sécurité des déplacements, notamment la DSCR, la DGITM* et le CERTU.

Dans le cadre de son programme de mise en sécurité du réseau de tramway, la SEMITAN a déjà décidé de renforcer la signalisation (en barrage en multipliant le nombre de signaux R24), et de repositionner les boucles de détection pour optimiser le fonctionnement du carrefour.

Recommandation R2 (SEMITAN) : Achever le programme de renforcement de la signalisation déjà décidé à la SEMITAN, programme détaillé au paragraphe 4.8.1.

Recommandation R3 (DSCR, CERTU) : Poursuivre l'expérimentation de différentes utilisations en feux de barrage des signaux réglementaires actuels, afin d'en apprécier l'efficacité du point de vue de leur respect par les usagers de la route.

Recenser les signaux utilisés dans d'autres pays de l'union européenne et en apprécier l'opportunité d'expérimentation en France.

Recommandation R4 (DSCR) : Engager une communication, au plan national, en association avec les AOT*, mais aussi, le GART et l'UTP, visant à mieux faire connaître la signification et la portée du signal R24.

Cette communication devrait également couvrir l'utilisation des signaux R24 pour les passages à niveau ferroviaires.

* Terme figurant dans le glossaire

6.1.3- Les obstacles

Le guide d'implantation des obstacles fixes à proximité des intersections tramways / voies routières (avril 2007) édicte des règles d'implantation des obstacles fixes par rapport au "gabarit limite d'obstacle" (GLO), en fonction des vitesses des tramways : elles permettent de limiter l'écrasement d'un véhicule tiers entre un obstacle fixe et un tramway et de ne pas altérer son espace de sécurité (cf schéma 18 paragraphe 4.6.5).

Le poteau support de LAC n° 1825, qui se trouve à une dizaine de mètres de l'anneau routier, ne répond pas aux règles d'implantation du guide technique du STRMTG. En effet, étant situé à moins de 31,50 mètres de l'anneau routier, il aurait dû être écarté latéralement de 1,50 mètre, au minimum, par rapport au GLO, alors qu'il ne l'est que de quelques dizaines de centimètres. Ce faible écartement a constitué un élément aggravant de l'accident.

Cet élément factuel plaide pour une modification de l'implantation de ce poteau et des autres poteaux du giratoire Vasco de Gama qui ne respecteraient pas les distances de sécurité recommandées par le guide du STRMTG sur les obstacles, d'avril 2007.

Le guide rappelle « qu'il n'est pas exigé de mise en conformité systématique des systèmes en service ; toutefois, si des problèmes de sécurité [...] sont mis en évidence, des solutions devront être recherchées ».

La SEMITAN a réalisé une analyse de l'accidentologie qui a permis d'identifier et de hiérarchiser les carrefours concernés par les accidents dont le caractère de gravité ou d'occurrence imposerait que soit modifiée l'implantation des obstacles fixes, notamment celle des poteaux supports de LAC ; sur cette base, un programme de modification d'implantation des poteaux ne respectant pas les distances de sécurité prônées par le guide peut être établi.

Comme signalé au paragraphe 4.6.5, le scénario du choc contre le poteau est atypique : en effet, la logique de calcul de la distance de sécurité du guide a été mise en défaut par le déclenchement tardif du FU. Cela n'altère toutefois pas la nécessité de sortir, des zones sensibles, les poteaux supports de LAC situés dans les carrefours jugés les plus préoccupants.

Recommandation R5 (Nantes Métropole, SEMITAN) : Reprendre l'implantation des obstacles fixes situés dans l'environnement immédiat du giratoire Vasco de Gama qui ne respectent pas les recommandations du guide du STRMTG sur les obstacles.

Mettre en oeuvre un programme de modification d'implantation des poteaux supports de LAC sur les carrefours les plus préoccupants.

6.2- Le déclenchement du frein d'urgence

Le déclenchement du frein d'urgence (FU) par le conducteur de tramway n'a été effectif que 3 secondes, environ, après le premier choc, soit après avoir parcouru approximativement 34 mètres (figure 17 de l'annexe 4).

Le retard au déclenchement du FU a donc constitué un facteur aggravant de l'accident.

La mise en place d'une automatisation du déclenchement du FU, en cas de choc, permettrait, peut-être, de se prémunir contre les réactions tardives des conducteurs ; cependant, compte tenu des difficultés de validation et de mise au point d'un tel dispositif, il ne semble pas que celui-ci puisse être disponible à brève échéance.

La conduite en milieu urbain requérant, par définition, une attention constante, la formation des conducteurs de tramway consiste, essentiellement, à les sensibiliser à la conduite à vue, conduite reposant sur le principe d'anticipation et de défiance vis à vis de leur environnement.

La formation continue des conducteurs de tramway, à Nantes, implique la participation à un cycle d'une journée par an. La sensibilisation « continue » des conducteurs aux conditions de la conduite en zone urbaine et péri-urbaine semble bien comprise par l'exploitant et intégrée dans l'accompagnement des conducteurs puisque, en plus de la journée technique annuelle, est mis en place, pour chacun d'entre eux, un accompagnement annuel en ligne par les responsables et les formateurs.

Recommandation R6 (STRMTG) : S'assurer, auprès des exploitants, d'une formation périodique adéquate des conducteurs visant à les préparer aux réactions d'urgence qui doivent prévaloir en cas de danger.

6.3- La conception du matériel et les équipements du tramway

6.3.1- Avertisseur sonore

Même si, pour cet accident, et compte tenu de sa tardiveté, le déclenchement de l'avertisseur n'a pas pu avoir d'impact sur la conduite de la voiture percutée, on peut s'interroger sur la perception du « gong » par le conducteur de cette voiture dans le cas où son actionnement se serait produit plus en amont.

En effet, dans un contexte péri urbain, où ce type de bruit n'est forcément pas réverbéré et amplifié comme il peut l'être en ville par l'intermédiaire des fronts urbains, il peut paraître utile, pour les tramway, de disposer d'un deuxième type d'avertisseur, de plus forte intensité pour être vu « et entendu ».

Recommandation R7 (STRMTG) : Engager une réflexion portant sur l'opportunité d'ajouter un avertisseur sonore puissant (par exemple, de type « klaxon », « sifflet » comme à Mulhouse ou « corne de brume ») distinct des avertisseurs en service sur les véhicules routiers.

6.3.2- La conception des avants de tramway

D'importants efforts de recherche sont entrepris pour réduire l'agressivité des faces avant des voitures en cas de choc avec les piétons ou avec d'autres véhicules.

S'agissant des tramways, circulant en ville la plupart du temps, il ne semble pas que la recherche d'une limitation de ses effets, en cas de choc, se soit développée : un matériel aussi lourd, sur fer, de surcroît, a pourtant besoin d'une distance de freinage bien plus grande qu'un matériel plus léger, comme l'autobus. Par ailleurs, la face avant du matériel ALSTOM (celui de Nantes), directement héritée d'une logique ferroviaire, est relativement plane et quasi-verticale, sans que, par ailleurs, des zones de déformation, en cas de choc, fassent partie de son architecture.

Un design plus arrondi, comme on peut l'observer pour les tramways actuels, aurait, peut-être, permis une évacuation de la voiture accidentée sur le côté.

On peut s'interroger, également, sur l'opportunité de concevoir des avants de tramway capables d'absorber les chocs afin de les rendre « moins agressifs ».

Recommandation R8 (STRMTG) : Engager une réflexion sur la conception des avants de tramway visant à rendre ceux-ci moins agressifs pour les piétons et les véhicules routiers en cas de choc, tant du point de vue de la forme (pour repousser d'éventuels corps étrangers) que de celui de l'absorption des efforts lors des chocs.

6.3.3- Les moyens techniques d'information embarqués

- *Les moyens vidéo*

La reconstitution de l'accident a été rendue plus compliquée par le manque d'information précise, à travers la vidéo ou les données figurant dans la boîte noire.

La vidéo embarquée à bord de la rame de tramway donne des informations sur le ressenti des passagers, notamment au moment du/des chocs, mais renseigne de façon plus floue sur les conditions de l'accident, sauf à se reporter sur les témoignages afin de compléter ou/et de vérifier les informations déjà enregistrées.

Étant consciente du problème que pose le manque d'information précise, lors de certains événements, la SEMITAN souhaite se lancer dans une expérimentation visant à équiper les rames de tramway de caméras-vidéo ayant pour rôle de filmer le territoire à franchir.

Il apparaît, en effet, souhaitable d'équiper les véhicules de transport de caméras placées à l'avant, et orientées sur l'espace urbain à franchir, afin de bénéficier d'éléments d'analyse complémentaires et de reconstituer les scénarios d'accidents.

Recommandation R9 (STRMTG) : Étudier les conditions dans lesquelles les rames de tramway pourraient être équipées d'une caméra vidéo orientée sur le territoire à franchir, et intégrer, en fonction des résultats de l'étude, cette disposition dans les préconisations des référentiels techniques.

- *La boîte noire*

La centrale tachymétrique donne des indications avec une unité de temps trop large, soit la demi-seconde ; pour illustrer le déficit d'information sur ce sujet, les chocs ont un temps d'effet de 40 à 400 millisecondes.

Par ailleurs, sur les matériels anciens, un certain nombre de données sont manquantes (position du manipulateur, activation du gong, ...) : cela handicape, particulièrement, l'analyse précise des accidents. Le cas de l'accident de Nantes/Saint-Herblain est révélateur de cette situation.

Le STRMTG a établi une liste minimale des paramètres qui devraient être enregistrés sur la boîte noire des tramways :

- la date et l'heure, la distance parcourue (odomètre), la vitesse réelle ;
- le freinage de secours (coup de poing) et le FU manipulateur ;
- l'ouverture de la boucle FU et le contact FU veille ;
- l'action sur poignée déverrouillage porte, la cabine active ;
- l'état manipulateur (traction / neutre / freinage) ;
- la commande manuelle des patins magnétiques ;
- la commande de l'avertisseur sonore (gong) ;
- la marche arrière (si cette dernière est possible et si elle n'est pas plombée).

Le pas d'enregistrement de la boîte noire devrait être inférieur ou égal à 1 mètre (1/10ème de seconde à 36km/h) et sa mémoire suffisante pour stocker, au moins, les 50 derniers kilomètres.

Recommandation R10 (STRMTG) : Déterminer les conditions et les délais à prévoir pour augmenter le contenu paramétrique de la boîte noire des tramways de l'ensemble du parc français selon la liste préconisée par le STRMTG. Étudier les procédures à mettre en place pour que les exploitants de réseaux puissent équiper l'ensemble de leur flotte des mêmes dispositifs.

Les dispositions réglementaires correspondantes seront proposées par le BEA-TT au ministre chargé des Transports comme le prévoit l'article 20 du décret du 26 janvier 2004 relatif aux enquêtes techniques après [...] accident ou incident de transport terrestre.

6.3.4- Capacité de freinage

Les essais réalisés par la SEMITAN, suite à la demande du BEA-TT, ont permis de constater l'impact très voisin des deux conditions de freinage, avec ou sans isolement de freins, et de conclure que les conséquences de l'accident, tel que celui-ci s'est produit, n'auraient pas été différentes si la rame avait eu tous ses blocs-freins fonctionnels. Les essais réalisés par la SEMITAN, auparavant, (voir paragraphe 4.5.4) avaient d'ailleurs déjà mis en évidence que l'affaiblissement du freinage se traduisait, en effet, par une diminution de la décélération d'un peu plus de 6% et par un allongement de la distance d'arrêt en freinage d'urgence d'un mètre, environ.

6.4- L'organisation du travail et la conduite du tramway

Le conducteur du tramway a été embauché à la SEMITAN en septembre 1991, a été habilité en avril 1992, et était, notamment, apte à conduire sur la ligne 1. Son dernier stage de recyclage date de novembre 2006 et il n'a pas eu d'accident de tramway antérieurement.

Le conducteur du tramway a pris son service à 05 h 05, le matin, sur un autobus, pour le quitter à 09 h 00 et reprendre la conduite d'un tramway de 09 h 51 jusqu'à 13 h 20. L'accident a eu lieu en fin de service, vers 12 h 15.

En juin 2007, les conducteurs de la SEMITAN pouvaient donc alterner, dans la même journée, la conduite d'un autobus et d'un tramway ; le conducteur du tramway accidenté a bénéficié d'une pause, entre les deux modes, d'un peu moins d'une heure. L'avantage incontestable de ce type d'organisation au plan de la souplesse qu'elle permet, notamment dans la gestion des absences de conducteurs (maladie ou congés, par exemple), doit être relativisé.

En effet, la conduite de ces deux modes de transport fait vraisemblablement appel à des réflexes différents pour certains protocoles, notamment le freinage d'urgence : la question se pose alors de savoir si « le reformatage » de la charge mentale du conducteur, lié au passage d'un mode à l'autre, peut s'effectuer sans délai de transition.

Le STRMTG a mené une enquête sur les pratiques de conduite alternée des autobus et des tramway auprès des exploitants de tramway ; la conduite d'un autobus et d'un tramway, dans la même journée, semble, sauf exception, ne plus être une pratique courante.

Sans rejeter cette alternance, la plupart des réseaux ne semblent donc plus mettre, systématiquement, leurs conducteurs en situation d'alterner la conduite d'un autobus et d'un tramway dans une même journée ; certains considèrent que le passage d'un mode à un autre implique des efforts d'adaptation qui peuvent être importants.

A la demande du BEA-TT, l'Inspection générale du travail des transports du MEEDDAT a, dans le même temps, effectué une enquête portant sur les pratiques des réseaux de transports collectifs quant à l'alternance dans la conduite d'un autobus vers le tramway et inversement.

Les pratiques de 16 réseaux, (Nantes n'en faisait pas partie), ont été examinées.

Un seul réseau programme, de manière régulière, l'alternance de conduite autobus/tramway, en la subordonnant à un temps de pause minimum, entre modes, de quatre heures. L'avantage, alors allégué, réside dans les contacts « clientèle » plus directs dans la conduite d'un autobus et dans le maintien d'une nécessaire polyvalence nécessaire aux remplacements de congés maladie.

Les 15 autres réseaux n'envisagent pas cette polyvalence comme un mode de gestion ordinaire.

Parmi ceux-ci, 5 ne la pratiquent pas, et 10 y ont recours, plus ou moins exceptionnellement, selon divers protocoles :

- 6 réseaux mettent en place une alternance dans la même journée, exceptionnellement, pour s'adapter aux absences pour maladie ou à des circonstances particulières et inhabituelles (accident, manifestation...);
- les 4 restants y ont recours d'une manière un peu plus organisée, dans la mesure où ils forment des équipes destinées à gérer les situations exceptionnelles nécessitant, dans l'urgence, de maintenir le service.

Parmi les réseaux qui « organisent » l'alternance, 2 d'entre eux précisent que la durée de pause minimum est comprise entre 3 h 30 et 4 h 00. Pour certains autres, l'occurrence est très faible (10/an dans un réseau comportant 140 conducteurs), sinon nulle.

L'alternance, pratiquée sur d'autres rythmes par les réseaux, a des origines relativement communes :

- le maintien d'un contact direct avec la clientèle ;
- la flexibilité, pour répondre aux absences imprévues, aux accidents ou à des manifestations spécifiques ;
- le maintien d'une compétence dans la conduite des deux modes ;
- la volonté d'éviter la création d'une corporation de spécialistes ;
- le maintien de l'égalité dans le rythme de travail, le week-end.

Les rythmes alors pratiqués sont très différents selon les réseaux, allant d'un rapport de 1 à 2 (une semaine sur deux) à 1 à 15 (le premier chiffre étant le nombre de semaines de conduite d'un autobus, le deuxième correspondant au nombre de semaines de conduite d'un tramway).

S'il y a des raisons pertinentes pour pratiquer l'alternance de conduite de modes de transport différents, dans une même entreprise, les charges mentales, différentes d'un mode à l'autre, semblent donc imposer quelque prudence lorsqu'il s'agit de pratiquer cette alternance dans une même journée : la nécessité d'encadrer cette alternance semble alors s'imposer.

Fin août 2007, la SEMITAN a décidé de ne plus pratiquer ce type d'alternance.

En conclusion, l'alternance de conduite d'un autobus et d'un tramway dans la même journée apparaît maintenant comme une pratique réservée à des cas exceptionnels ; lorsqu'elle est utilisée, il convient de rester attentif aux éventuelles difficultés de transition qui pourraient apparaître.

7- Conclusions et recommandations

7.1- Identification des causes et facteurs associés ayant concouru à l'accident

L'enquête a mis en lumière une cause directe, des causes associées, plusieurs facteurs ayant contribué à la survenue de l'accident et à son déroulement, ainsi que d'autres facteurs ayant pénalisé son analyse.

7.1.1- Cause directe

La cause directe de l'accident réside dans l'inobservation et le non respect de la signalisation routière par le conducteur de la voiture accidentée.

Le conducteur de cette voiture cherchait sa route et son attention n'était pas focalisée sur son environnement direct : ainsi, a-t-il commencé par ne pas respecter le rouge en entrée de carrefour (signal R22j), avant de franchir la ligne de signaux en barrage mise au rouge clignotant (signal R24) et de se faire heurter violemment par le tramway.

7.1.2- Autres facteurs causaux

Le retard dans le déclenchement du freinage d'urgence par le conducteur du tramway a constitué un facteur aggravant de l'accident et un facteur déterminant de la violence du deuxième choc, contre le poteau.

L'aménagement du carrefour giratoire présente deux caractéristiques ne garantissant pas une sécurité optimale :

- présence d'un obstacle fixe, le poteau support de ligne aérienne de contact dans le gabarit limite d'obstacle, à proximité immédiate du bord de la chaussée de l'anneau ;
- absence de pré-signalisation, ayant pu amoindrir la perception du contexte urbain et de ses contraintes.

7.1.3- Autres facteurs ayant pu jouer un rôle dans l'accident

Différents facteurs, liés à la signalisation du carrefour, à la conception du matériel roulant ou à la nature des équipements embarqués, ont également pu jouer un rôle :

- ambiguïté du signal de barrage R24 à feu rouge clignotant qui a pu être confondu, par le conducteur de la voiture, avec d'autres types de signaux visant à attirer l'attention, tel l'orange clignotant ;
- absence d'avertisseur sonore puissant qui paraît pénalisante, surtout en situation d'urgence ;
- conception ancienne de la face avant du TFS d'ALSTOM, qui ne paraît pas optimisée pour atténuer les conséquences d'un choc avec des tiers, notamment sur le plan de l'absorption d'énergie ou sur celui de l'écartement des obstacles.

7.1.4- Facteurs ayant pénalisé l'analyse de l'accident

La reconstitution des conditions de l'accident a été rendue plus difficile par des équipements embarqués fragmentaires ou manquants.

- ✓ nombre limité d'informations contenues dans la boîte noire du matériel tramway qui handicape la bonne compréhension des circonstances de l'accident ;
- ✓ absence de caméras vidéo embarquées et orientées sur le territoire à franchir, ne permettant donc pas de reconstituer, précisément, les circonstances de l'accident.

7.2- Recommandations émises

Recommandation R1 (Nantes Métropole, SEMITAN) : Identifier les secteurs, notamment péri urbains, où une pré signalisation en entrée de carrefour indiquant la traversée d'un tramway peut ajouter une information utile pour le conducteur automobile.

Définir un programme d'introduction de pré signalisation, notamment le panneau A9 et le mettre en oeuvre.

Recommandation R2 (SEMITAN) : Achever le programme de renforcement de la signalisation déjà décidé à la SEMITAN, programme détaillé au paragraphe 4.8.1.

Recommandation R3 (DSCR, CERTU) : Poursuivre l'expérimentation de différentes utilisations en feux de barrage des signaux réglementaires actuels, afin d'en apprécier l'efficacité du point de vue de leur respect par les usagers de la route.

Recenser les signaux utilisés dans d'autres pays de l'union européenne et en apprécier l'opportunité d'expérimentation en France.

Recommandation R4 (DSCR) : Engager une communication, au plan national, en association avec les AOT, mais aussi, le GART et l'UTP, visant à mieux faire connaître la signification et la portée du signal R24.

Cette communication devrait également couvrir l'utilisation des signaux R24 pour les passages à niveau ferroviaires.

Recommandation R5 (Nantes Métropole, SEMITAN) : Reprendre l'implantation des obstacles fixes situés dans l'environnement immédiat du giratoire Vasco de Gama qui ne respectent pas les recommandations du guide du STRMTG sur les obstacles.

Mettre en oeuvre un programme de modification d'implantation des poteaux supports de LAC sur les carrefours les plus préoccupants.

Recommandation R6 (STRMTG) : S'assurer, auprès des exploitants, d'une formation périodique adéquate des conducteurs visant à les préparer aux réactions d'urgence qui doivent prévaloir en cas de danger.

Recommandation R7 (STRMTG) : Engager une réflexion portant sur l'opportunité d'ajouter un avertisseur sonore puissant (par exemple, de type « klaxon », « sifflet » comme à Mulhouse ou « corne de brume ») distinct des avertisseurs en service sur les véhicules routiers.

Recommandation R8 (STRMTG) : Engager une réflexion sur la conception des avants de tramway visant à rendre ceux-ci moins agressifs pour les piétons et les véhicules routiers en cas de choc, tant du point de vue de la forme (pour repousser d'éventuels corps étrangers) que de celui de l'absorption des efforts lors des chocs.

Recommandation R9 (STRMTG) : Étudier les conditions dans lesquelles les rames de tramway pourraient être équipées d'une caméra vidéo orientée sur le territoire à franchir, et intégrer, en fonction des résultats de l'étude, cette disposition dans les préconisations des référentiels techniques.

Recommandation R10 (STRMTG) : Déterminer les conditions et les délais à prévoir pour augmenter le contenu paramétrique de la boîte noire des tramways de l'ensemble du parc français selon la liste préconisée par le STRMTG. Étudier les procédures à mettre en place pour que les exploitants de réseaux puissent équiper l'ensemble de leur flotte des mêmes dispositifs.

Les dispositions réglementaires correspondantes seront proposées par le BEA-TT au ministre chargé des Transports comme le prévoit l'article 20 du décret du 26 janvier 2004 relatif aux enquêtes techniques après [...] accident ou incident de transport terrestre.

ANNEXES

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête

Annexe 2 : Les signaux routiers aux interfaces avec une ligne de tramway

Annexe 3 : Plan détaillé du giratoire Vasco de Gama - Ligne 1 de tramway

Annexe 4 : Rapport d'expertise d'« EURO CRASH », de l'Ecole centrale de Nantes

Annexe 5 : Retour d'expérience sur des évènements similaires

Annexe 6 : Analyse accidentologique des giratoires (STRMTG)

Annexe 1 : Décision d'ouverture d'enquête



BEA-TT 2007-008

Ministère de l'Ecologie,
du Développement
et de l'Aménagement
durables

DECISION

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

Vu la loi n° 2002-3 du 3 janvier 2002 modifiée relative à la sécurité des infrastructures et systèmes de transport et notamment son titre III sur les enquêtes techniques ;

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 survenu le 4 juin 2007 sur la commune de Saint-Herblain (Loire Atlantique) et l'accord du Directeur de Cabinet auprès du secrétaire d'Etat chargé des Transports en date du 19 juin 2007 ;

DECIDE

Article 1 : Une enquête technique, effectuée dans le cadre du titre III de la loi n° 2002-3 du 3 janvier susvisée, est ouverte par le BEA-TT concernant l'accident mortel survenu le 4 juin 2007 entre un tramway et un véhicule léger sur la commune de Saint-Herblain (Loire Atlantique).

Fait à Paris, le 20 juin 2007

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


Jean Gérard KOENIG

Tour Paecal B
92055 La Défense cedex
téléphone :
01 40 81 23 27
télécopie :
01 40 81 21 50
courriel :
Cgpc.Beatt
@equipement.gouv.fr

Annexe 2 : Les signaux routiers aux interfaces avec une ligne de tramway

Traversée de voies de tramway



A9

Carrefour à sens giratoire



ab25

Voie réservée aux tramways



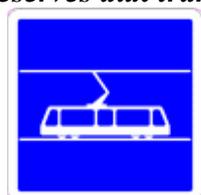
B27b

Fin de voie réservée aux tramways



B45b

Arrêt de tramway : l'arrêt et le stationnement y sont réservés aux tramways



C7

Traversée de tramway

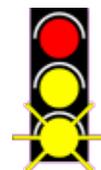


C20c

Signaux lumineux d'intersection et de contrôle de flots : signaux tricolores



R11v, R22v



R11j, R22j

Signal d'arrêt



R24

Signal bicolore destiné aux piétons



R12

Signal pour tramway (équivalent du signal tricolore routier)



R17

Signal directionnel pour tramway



R18

Autres signaux d'intersection et de priorité



AB3a

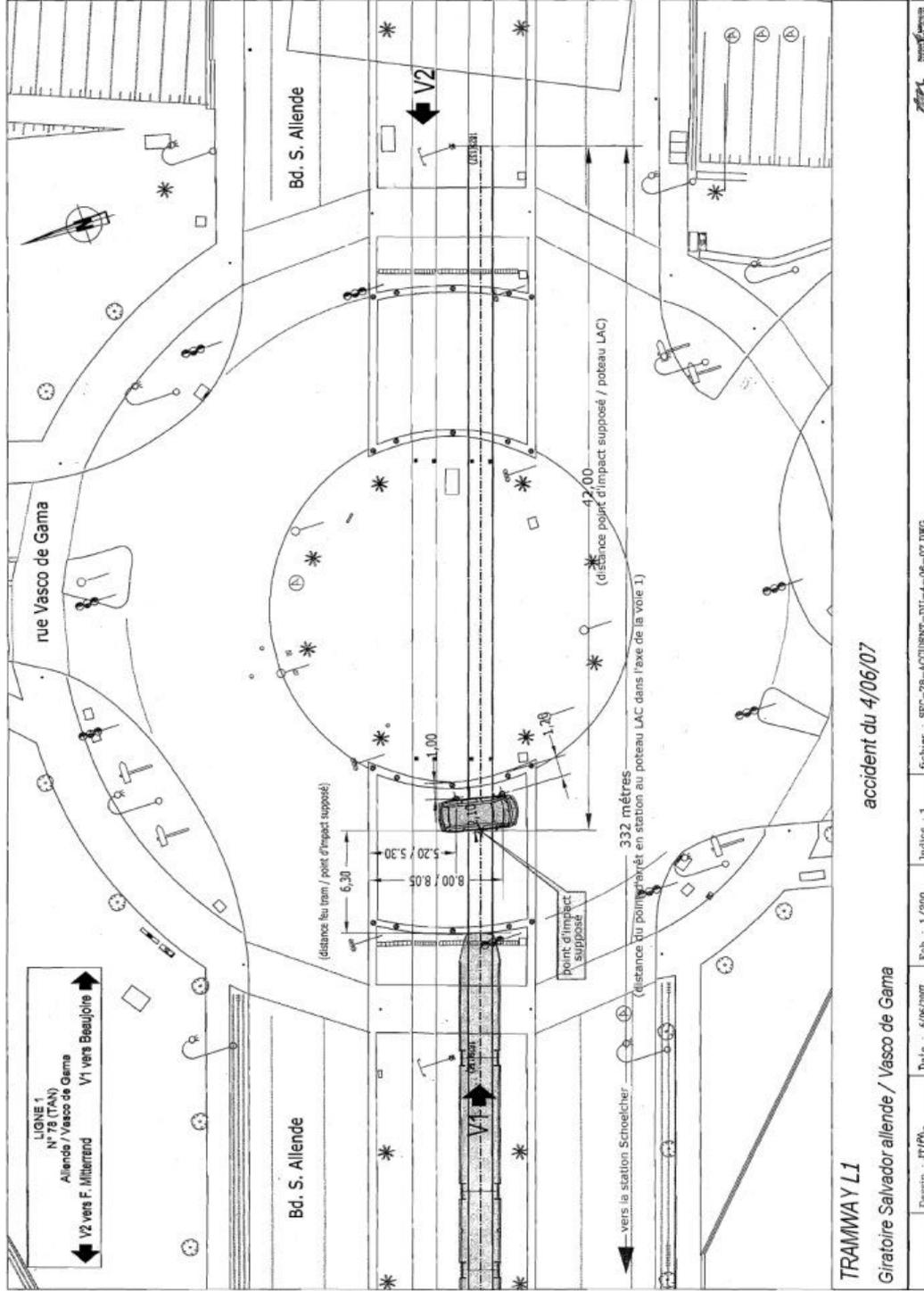
Panonceaux d'indications diverses

*« Rouge clignotant
arrêt absolu »
ou, par exemple,*



M9z

Annexe 3 : Plan détaillé du giratoire Vasco de Gama – Ligne 1 de tramway



Annexe 4 : Rapport d'expertise sur la cinématique de l'accident réalisé par le laboratoire « Euro Crash » de l'Ecole centrale de NANTES

ACCIDENT 04 JUIN 2007
SCENARIO DU CRASH
Commande N°0000029799 du 08 Octobre 2007
Rapport définitif Indice 03

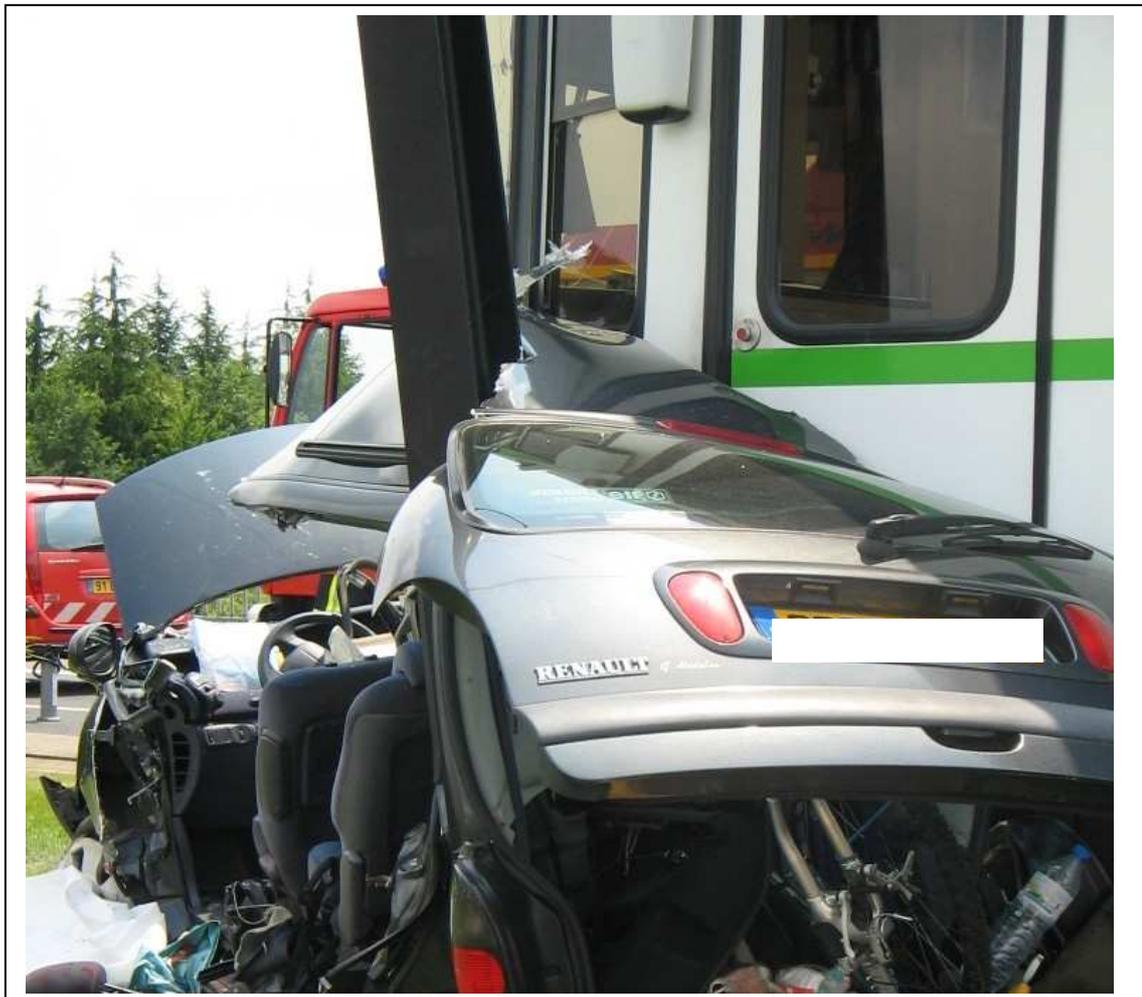


Table des matières

	Pages
I- But	3
II- Sources d'informations	3
III- Données à disposition	3
IV- Scenario crash	3
IV-1 : Premier choc Tram contre voiture avant choc poteau	3-7
IV-1-1 : conditions de la simulation	3-4
IV-1-2 : chocs répétés - force- temps	4
IV-1-3 : chocs répétés - force- déplacement	4-5
IV-1-4 : chocs répétés - vitesses successives	5
IV-1-5 : chocs répétés et énergie absorbée	6
IV-1-6 : enfoncement du véhicule	6
IV-1-7 : <i>première conclusion</i>	7
IV-2 : Choc poteau	7-13
IV-2-1 : simulation numérique	7-8
IV-2-2 : force de contact	9
IV-2-3 : écrasement du véhicule	9
IV-2-4 : énergie absorbée par le véhicule	10
IV-2-5 : énergie absorbée par le poteau et effort sur poteau	10-11
IV-2-6 : variation des vitesses Tram- voiture	12
IV-2-7 : écrasement voiture (photo et numérique)	12-13
V- Diagramme de choc	14-15
VI- Répartition énergétique	15
VII- Conclusions	15
VIII- Suggestions	16

I- BUT

Reconstitution cinématique du choc avec les paramètres de l'accident et détermination de l'influence des conditions aux limites

II- SOURCES D'INFORMATION

- Bureau d'enquêtes sur les accidents de transport terrestre (BEA-TT / MEDAD)
- Compte rendu de visite du 07 Juin 2007 sur l'accident (BIRMTG)
- Synthèse du rapport circonstancié de l'accident par Monsieur HELAS (SEMITAN)
- CD-R de l'accident (vidéo embarquée dans la rame de Tram)

III- DONNEES A DISPOSITION

Les données à notre disposition sont insuffisantes pour reconstituer, avec grande précision l'accident. En effet, devant le faible temps de choc (40 à 400 ms) :

- la fréquence d'enregistrement du central du tram est trop faible (0,5 S par point),
- la fréquence de la Caméra vidéo (0,25 S par image) l'est également.

Les chocs ne peuvent donc pas être détectés par les moyens d'enregistrement du Tram. Toutefois, ces données sont suffisantes pour modéliser et expliquer les conséquences des différents chocs enregistrés sur le Tram et la voiture accidentée.

IV- SCENARIO DU CRASH

IV-1 : Simulations numériques avant choc poteau

IV-1-1 : Conditions aux limites de la simulation

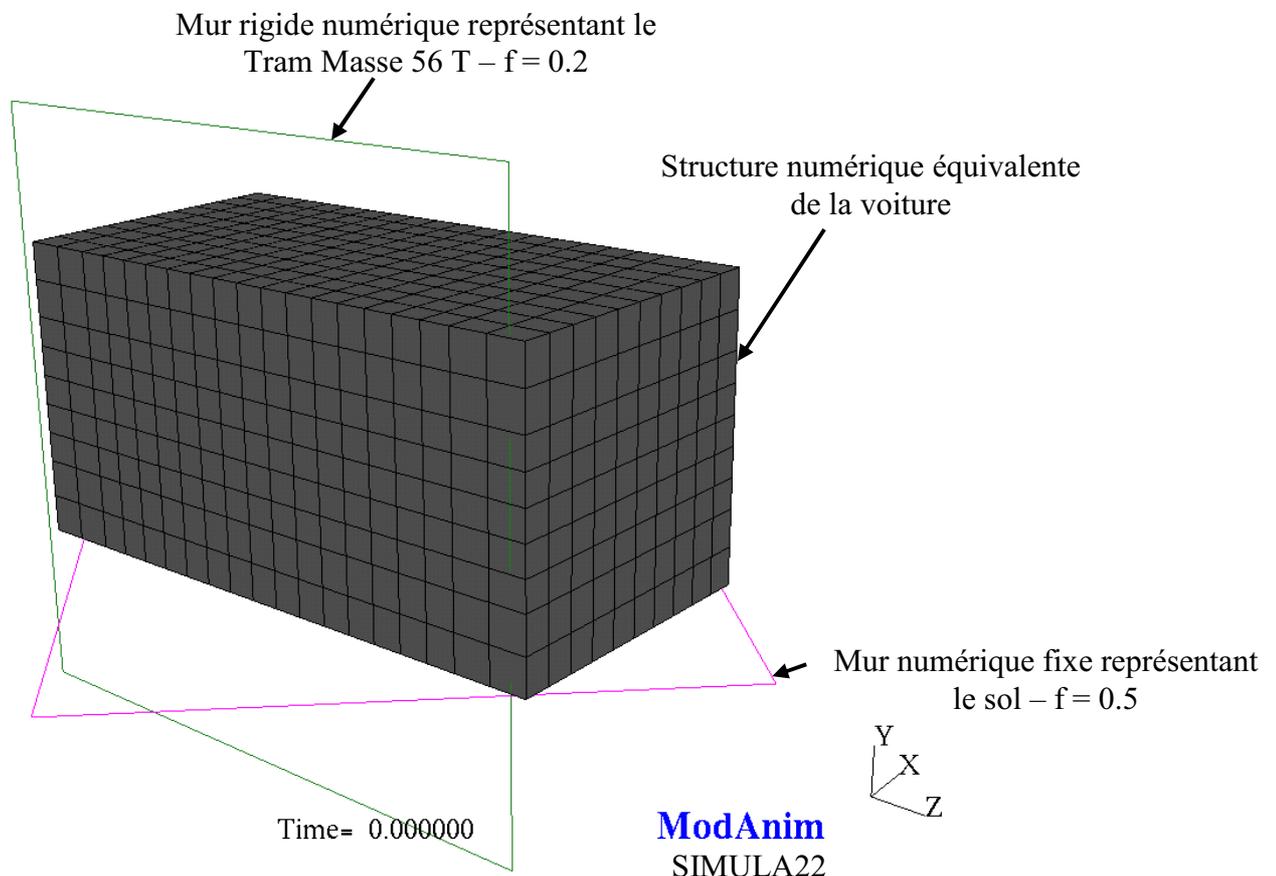


Figure 1 : Conditions aux limites de la simulation numérique

- La voiture est représenté par un parallélépipède en acier de dimensions 4*2*2,3 m et pesant 1600 Kg.
- Le Tram est représenté par un mur rigide de 56 Tonnes.
- Le coefficient frottement de la voiture au sol est : $f = 0,5$
- Le coefficient de frottement du Tram est : $f = 0,2$
- La vitesse initiale d'impact est de 10,32 m/s

IV-1-2 : Chocs répétés - forces d'impact = F (Temps de choc)

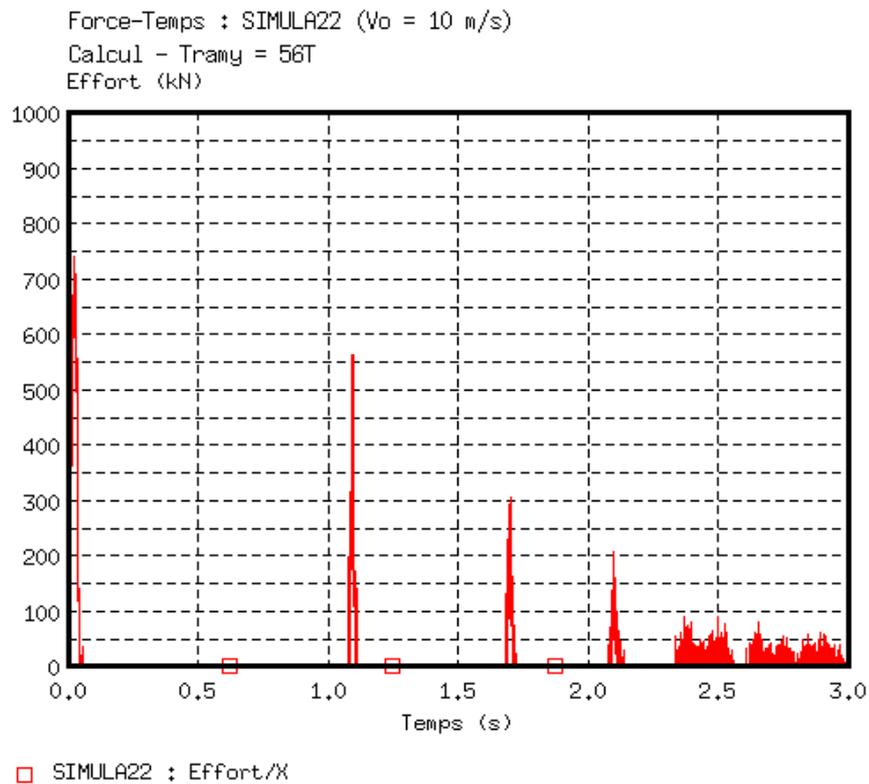


Figure 2 : variation de l'effort de choc sur la voiture en fonction du temps
La voiture a subi 6 chocs en trois secondes

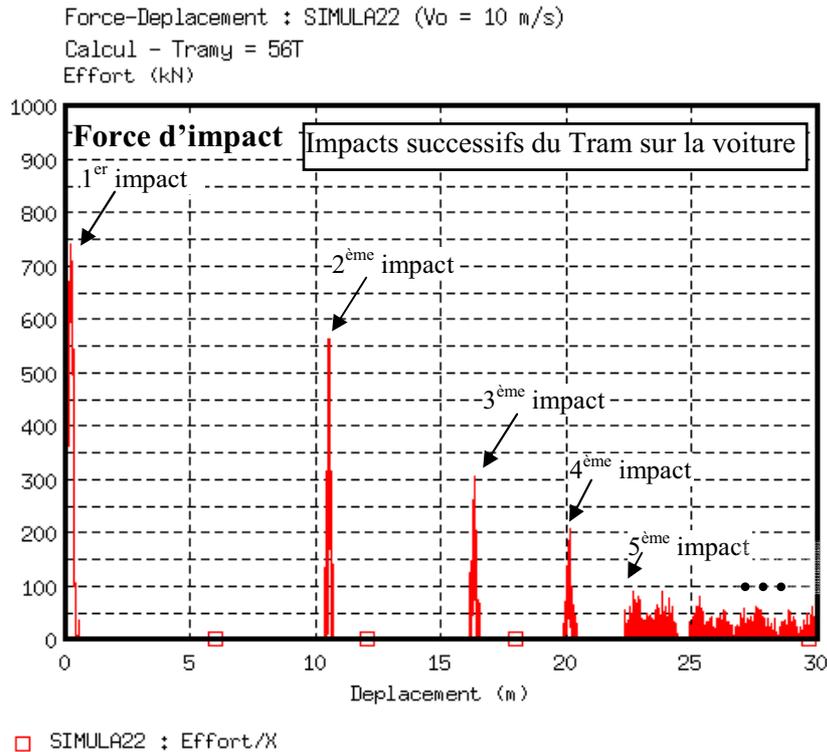
La figure 2 montre que:

- La voiture a subi 6 chocs successifs en 3 secondes. Chaque choc correspond à une mise en vitesse nouvelle du véhicule.
- Les efforts d'impact variant de :
 - ✓ 740 KN pour le choc n° 1
 - ✓ 550 KN pour le choc n° 2
 - ✓ 300 KN pour le choc n° 3
 - ✓ 200 KN pour le choc n° 4
 - ✓ 050 KN pour les chocs n° 5 et n° 6

Le temps moyen de chaque choc est # 30 ms.

IV-1-3 : Chocs répétés – Force impact = F (déplacement voiture)

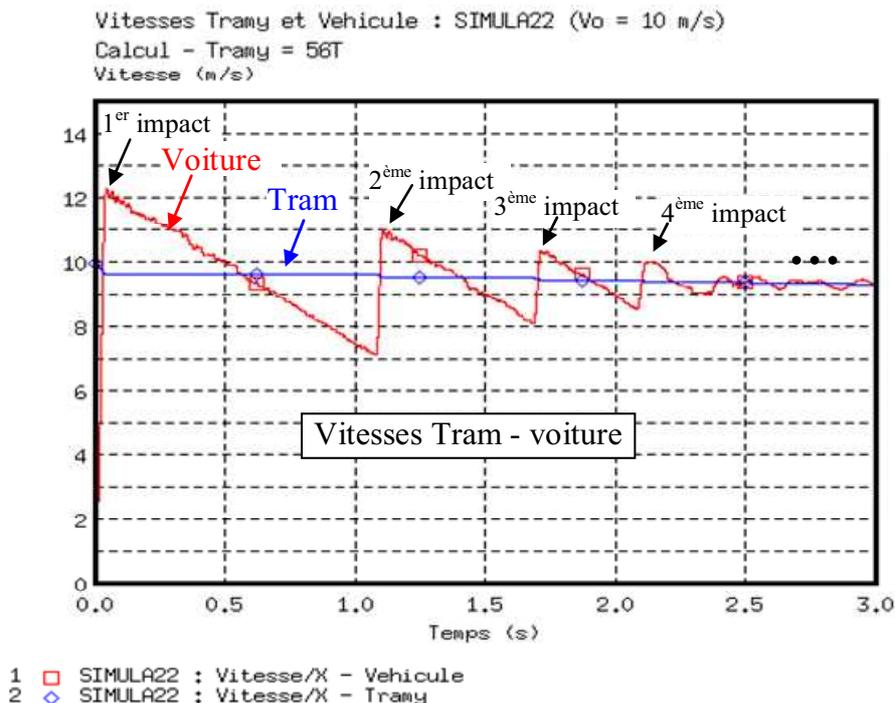
La figure 3 montre la variation des efforts d'impact en fonction du déplacement du véhicule dans le sens du choc. On remarque que le choc n° 2 est arrivé 11 mètres après le choc n° 1, le choc n° 3, 17 mètres après, le choc n° 4, 20 mètres après et ainsi de suite jusqu'au choc n° 6, 30 mètres après le point d'impact initial.



**Figure 3 : Variation de l'effort de choc en fonction du déplacement du Tram
 6 chocs en 30 mètres**

IV-1-4 : Choc répétés - mise en vitesses successives du véhicule

La figure 4 montre la variation des vitesses Tram - voiture en fonction du temps de choc. Le véhicule est propulsé à 12 m/s après le premier choc ; freiné par ses roues, il est rattrapé par le Tram au bout de # 1 seconde, et subit un deuxième choc qui fait croître sa vitesse de 7 m/s à 11 m/s. Ce phénomène se répète 6 fois en 3 secondes avant que les deux structures bougent à la même vitesse de # 9,8 m/s.



**Figure 4 : Variation de la vitesse du Tram et de la voiture en fonction
 du temps de choc**

IV-1-5 : Chocs répétés et énergie absorbée par la déformation du véhicule

La figure 5 montre la variation de l'énergie absorbée par la déformation de la voiture en fonction de son déplacement et des chocs répétés provenant du Tram. Cette énergie est de 200 KJ pour le choc n°1, 50 KJ pour le choc n°2 et ainsi de suite.....

L'énergie totale absorbée par le véhicule est # 380 KJ.

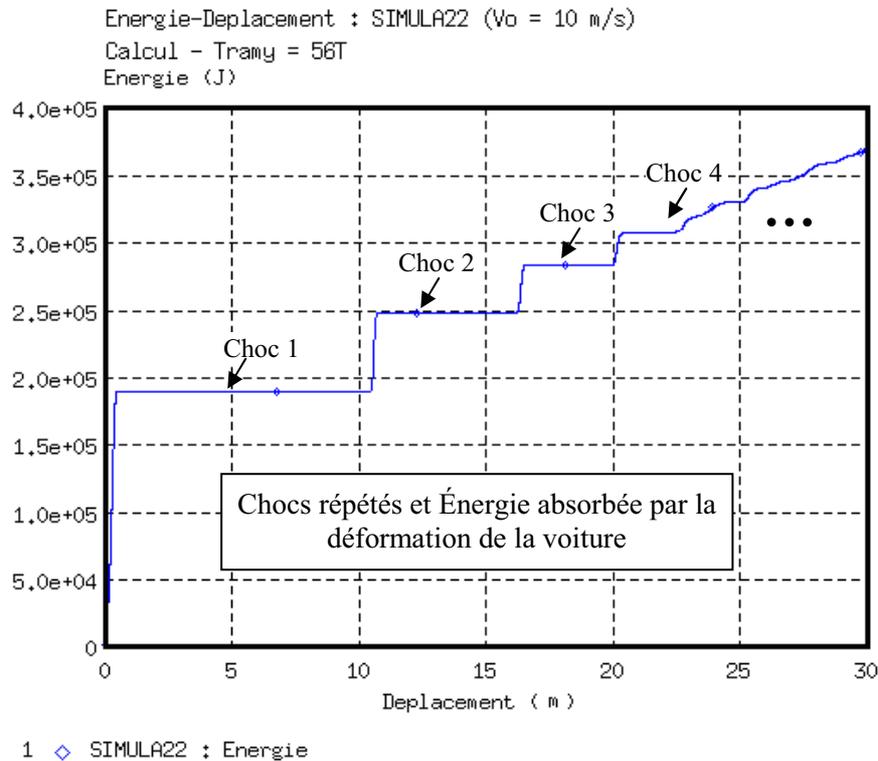


Figure 5 : Variation de l'énergie absorbée par le véhicule en fonction du temps de choc

IV-1-6 : Enfoncement de la voiture par le Tram

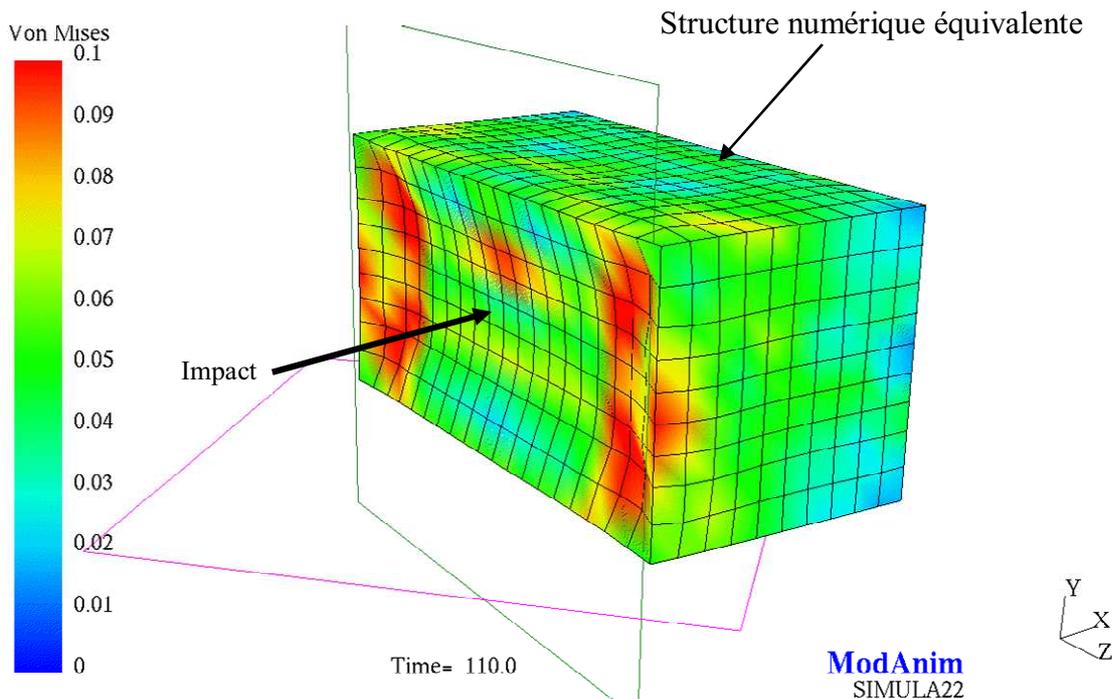


Figure 6 : Représentation numérique de la déformée latérale de la voiture

La figure 6 montre l'enfoncement latéral de # 220 mm de la voiture, après la succession des premiers chocs du Tram contre la voiture.

IV-1-7 : Première conclusion

Le véhicule routier accidenté a subi, latéralement, 6 chocs successifs, sur 30 mètres, avant d'avoir une vitesse équivalente à celle du Tram.

Le niveau de la force d'impact varie de 740 KN, au premier choc, à 50 KN pour le sixième choc.

L'énergie dissipée dans le véhicule (mise en vitesse et déformation) est # 380 KJ.

La déformée latérale du véhicule routier, côté passager avant, est # 220 mm.

IV-2 : Choc poteau

IV-2-1 : Simulation numérique

Le poteau, structure H, est numérisé avec la loi de comportement d'un acier S235. Les dimensions du poteau ont été relevées sur place.

Après freinage d'urgence, la vitesse résiduelle du Tram est de 6 m/s, au contact avec le poteau.

La décélération moyenne du Tram en FU étant # 2,2 m/s², le Tram est freiné par un effort de 123 KN.

Le coefficient de frottement de la voiture au sol est toujours : $f = 0,5$.

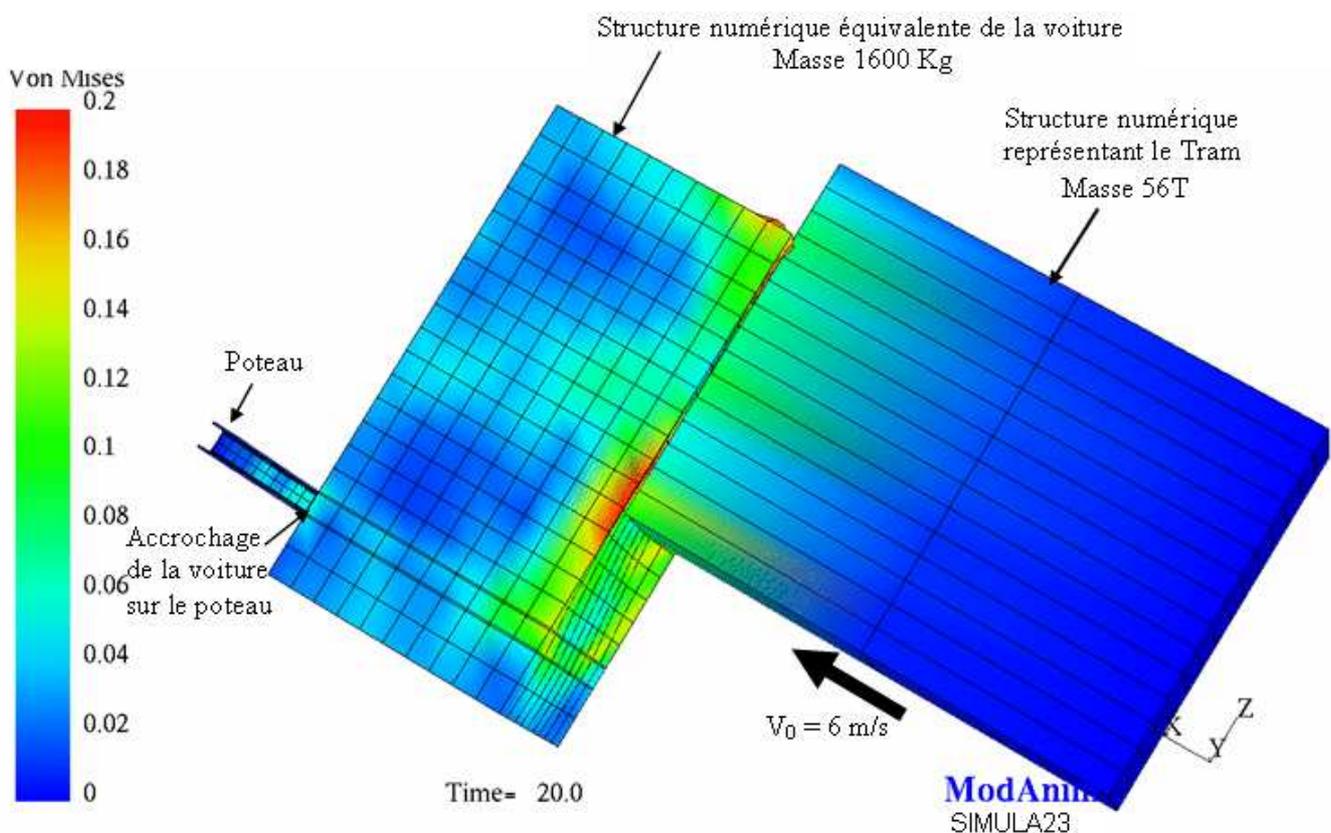


Figure 7 : Choc poteau - crash prédictif d'une durée de # 20 ms

La figure 7 montre la simulation numérique du choc poteau de l'ensemble Tram - voiture. L'accrochage d'une partie du véhicule avec le poteau provoque un encastrement de l'arrière du véhicule pendant que le reste de la structure est en mouvement avec le Tram. L'écrasement dramatique de la structure est effectué **par compression, rotation et chevauchement**.

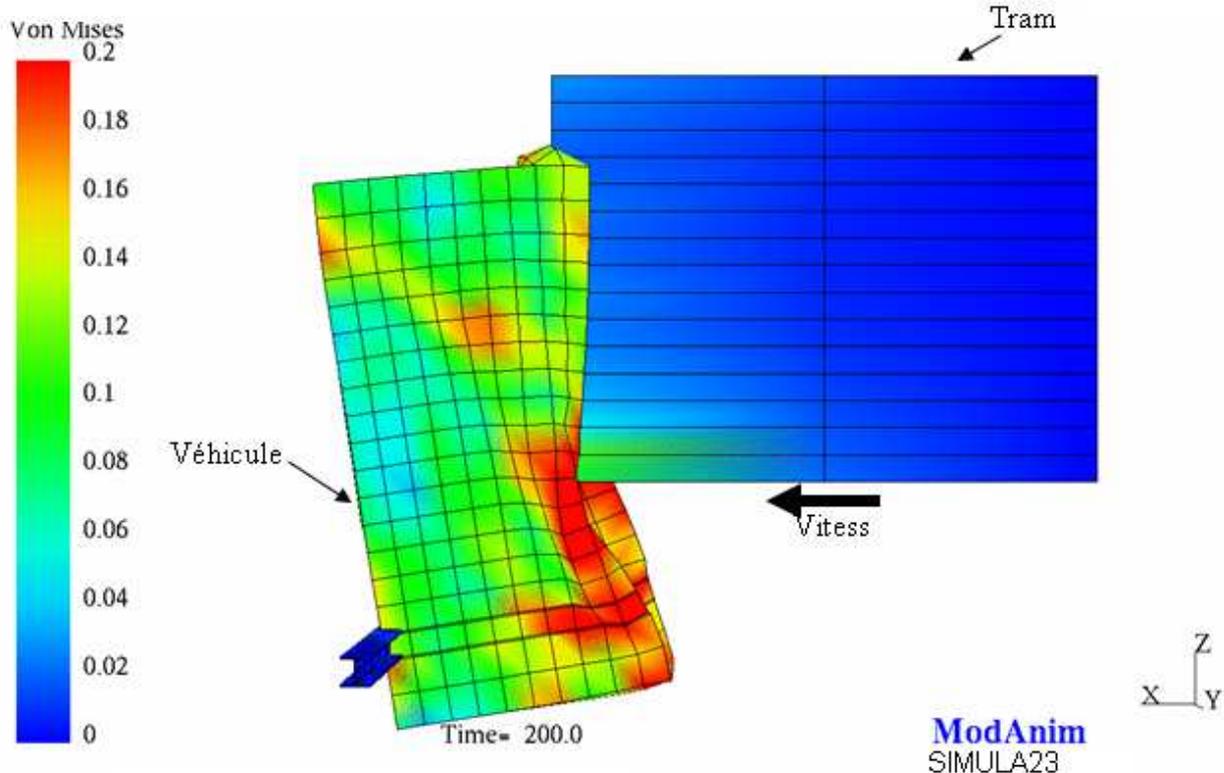


Figure 8 : Choc poteau à t = 200 ms

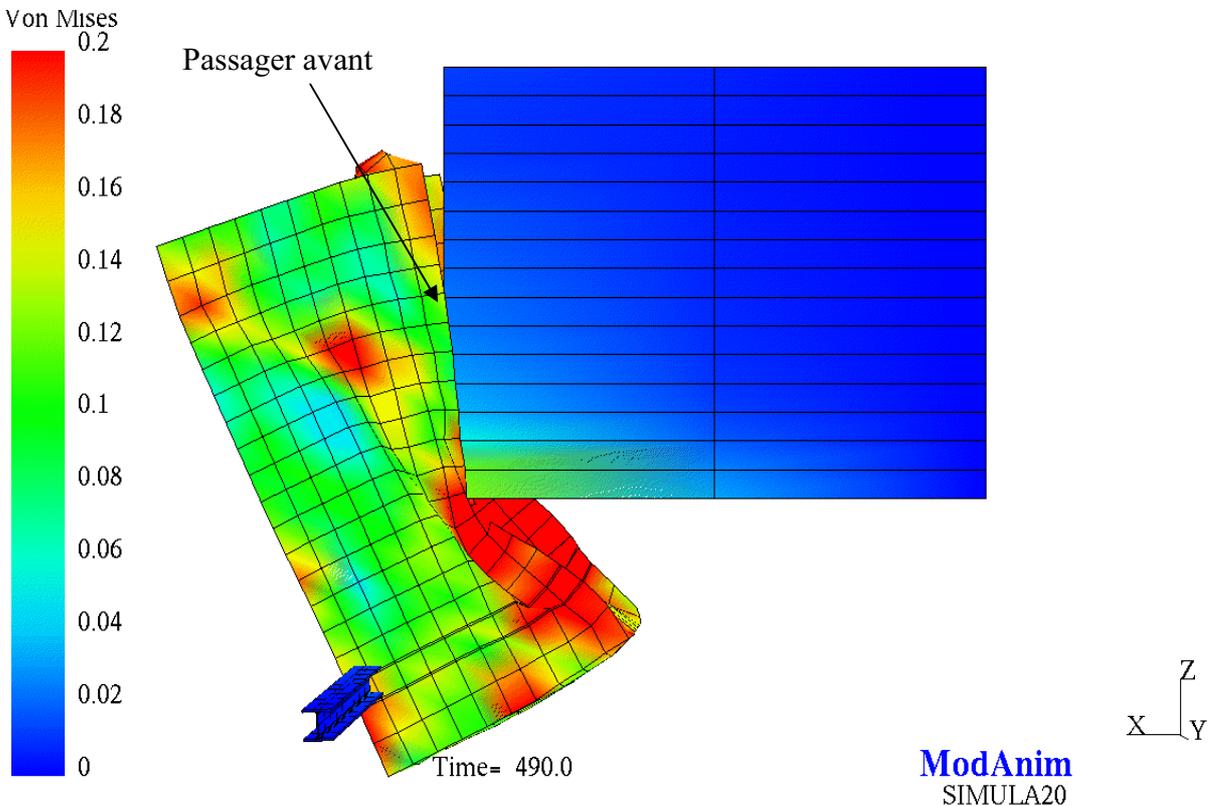


Figure 9 : Choc poteau à t = 490 ms

IV-2-2 : Force de contact Tram - voiture

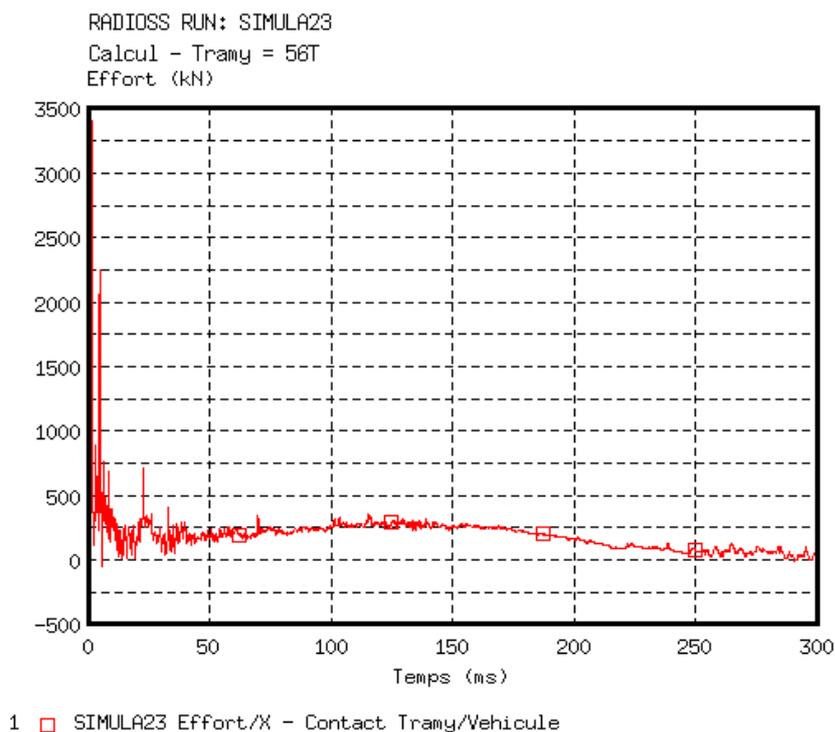


Figure 10 : Choc poteau / force de contact Tram - voiture

La figure 10 montre la variation de l'effort de contact Tram -voiture en fonction du temps de choc. La force d'écrasement du véhicule varie de 3500 kN à 250 kN durant 200 ms.

IV-2-3 : Force de contact et écrasement du véhicule

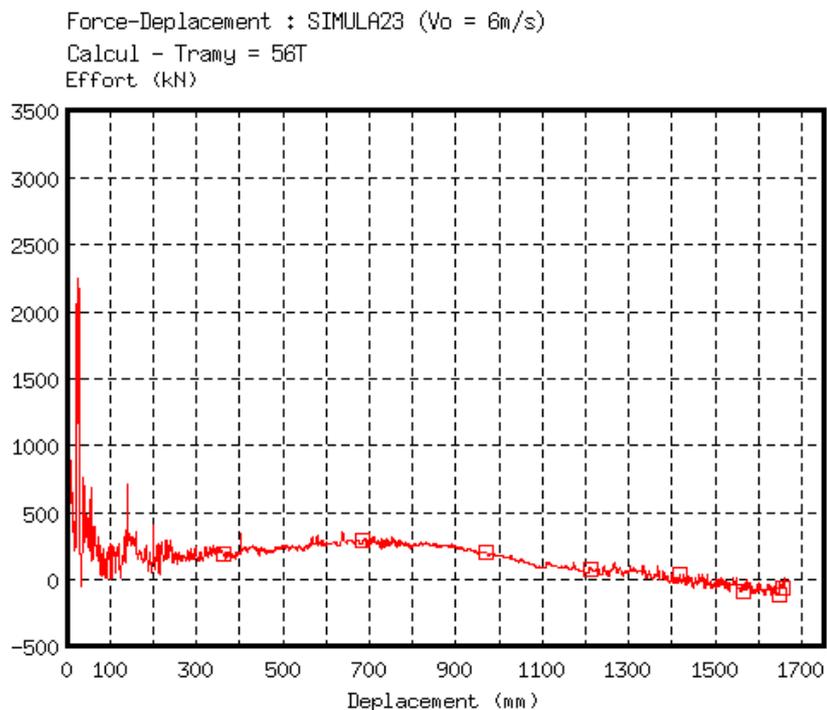


Figure 11 : Choc poteau / Force contact - déplacement Tram - voiture

La figure 11 montre cette même variation en fonction de l'écrasement du véhicule et on remarque que l'effort varie de 3500 kN à 250 kN en 1,5 mètre d'écrasement.

IV-2-4 : Énergie absorbée par le véhicule routier accidenté

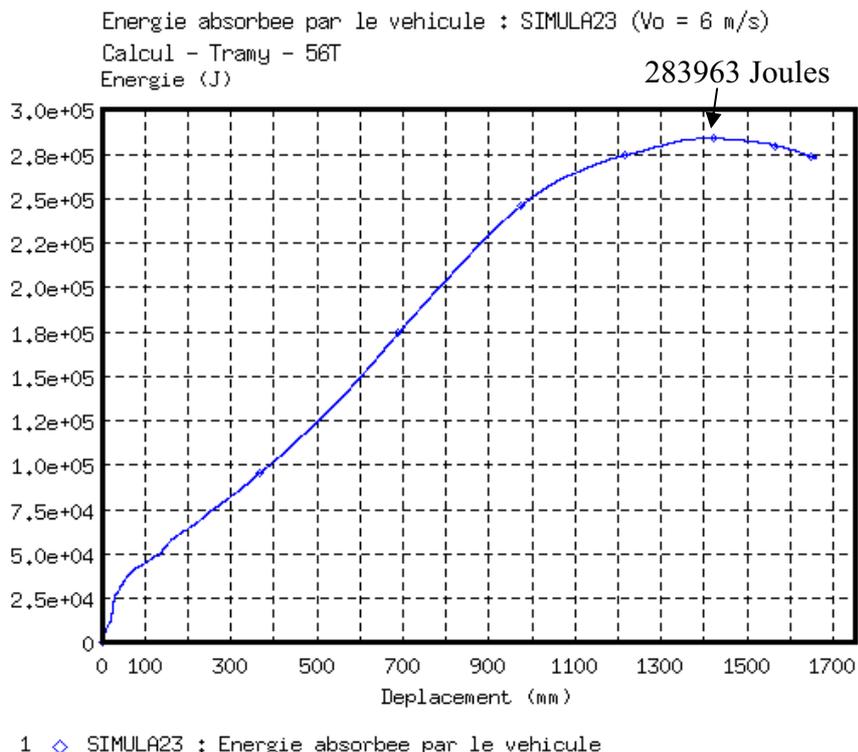


Figure 12 : Choc poteau - Energie absorbée par la voiture

La figure 12 montre la variation de l'énergie absorbée par le véhicule en fonction de son écrasement.

On remarque qu'au bout de 1,5 mètre, environ, d'écrasement, l'énergie absorbée par le véhicule est approximativement de 284 kJ.

IV-2-5 : Énergie absorbée par le poteau et effort qui lui est appliqué

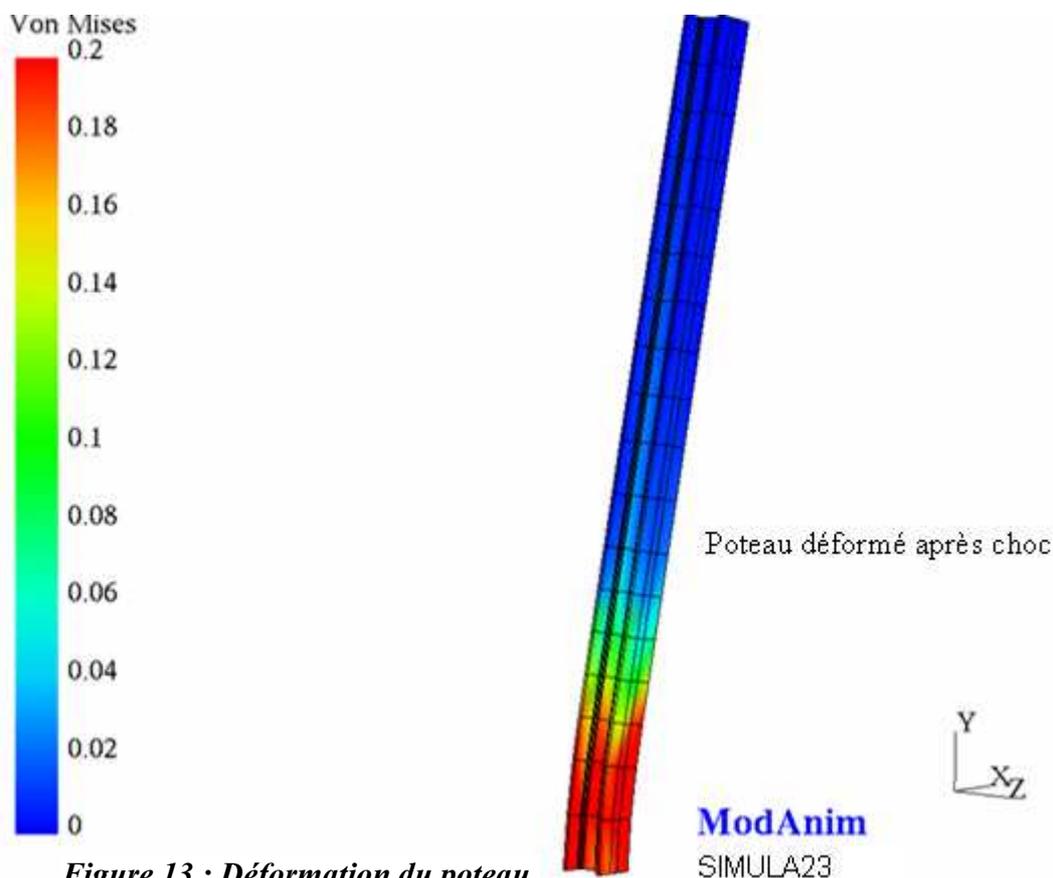


Figure 13 : Déformation du poteau

La figure 13 montre la déformation du poteau après le choc.

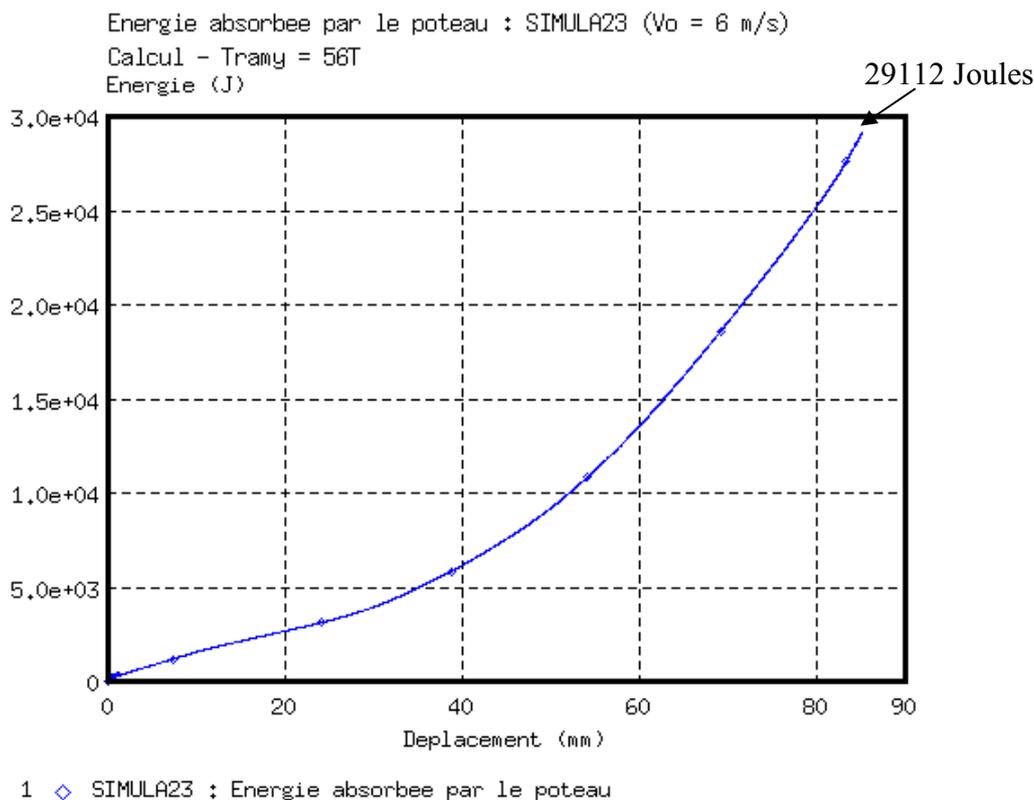


Figure 14 : Choc poteau - Energie absorbée par le poteau

Les figures 14 et 15 montrent la variation de l'énergie absorbée et de l'effort appliqué sur le poteau en fonction du déplacement de son point de contact avec le véhicule.

On distingue la différence du déplacement entre le point de contact du véhicule avec le poteau (#90 mm) et le déplacement du « contact véhicule » avec le tram (1500 mm voir fig. 12).

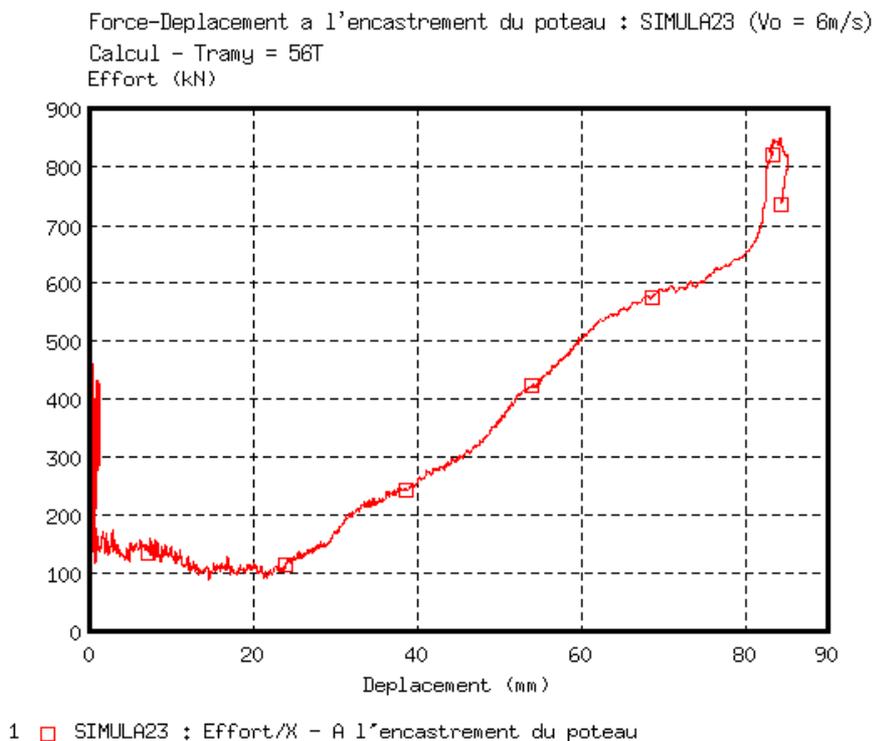


Figure 15: Choc poteau - Effort appliqué au poteau en fonction du déplacement de son point de contact avec le véhicule

IV-2-6 : Choc poteau - vitesses (Tram - voiture) pendant le crash

La figure 16 montre les variations des vitesses respectives du Tram et de la voiture pendant le choc.

On distingue 2 chocs successifs sur le poteau provenant du freinage de l'encastrement du véhicule sur le poteau qui empêche la voiture de sortir de la trajectoire du Tram, provoquant, ainsi, son écrasement par compression et rotation par le Tram et son cisaillement par le poteau.

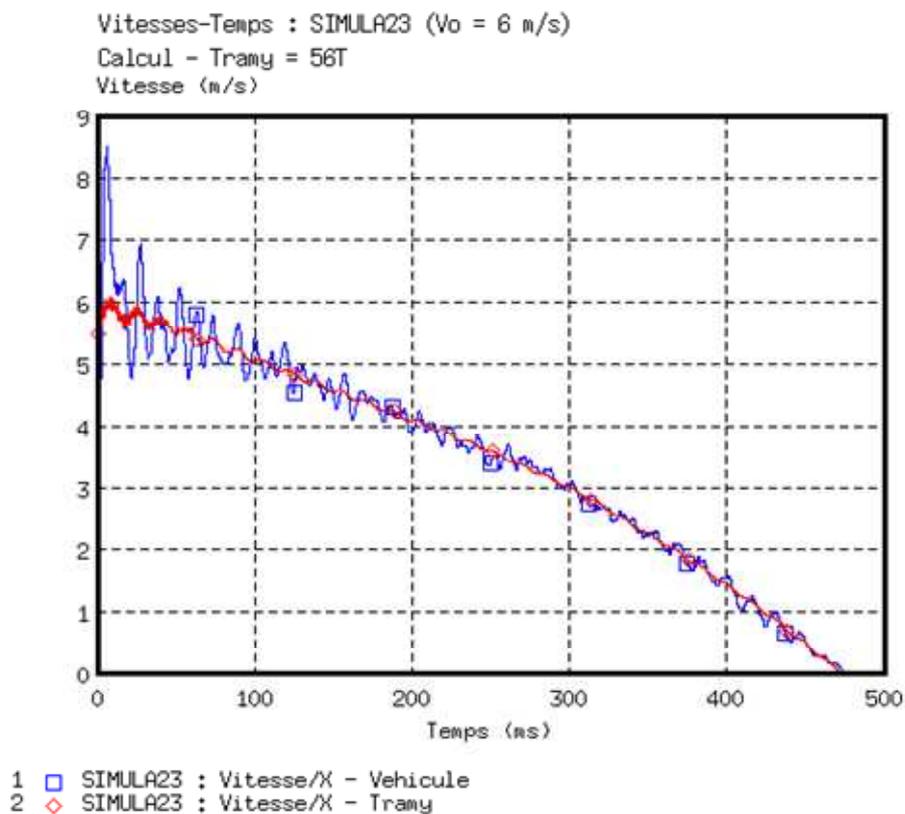


Figure 16: *Choc poteau/variation des vitesses Tram et voiture en fonction du temps de choc*

IV-2-7 : Modèle numérique du véhicule après choc

La figure 17 montre les grandes déformations du véhicule côté passager avant

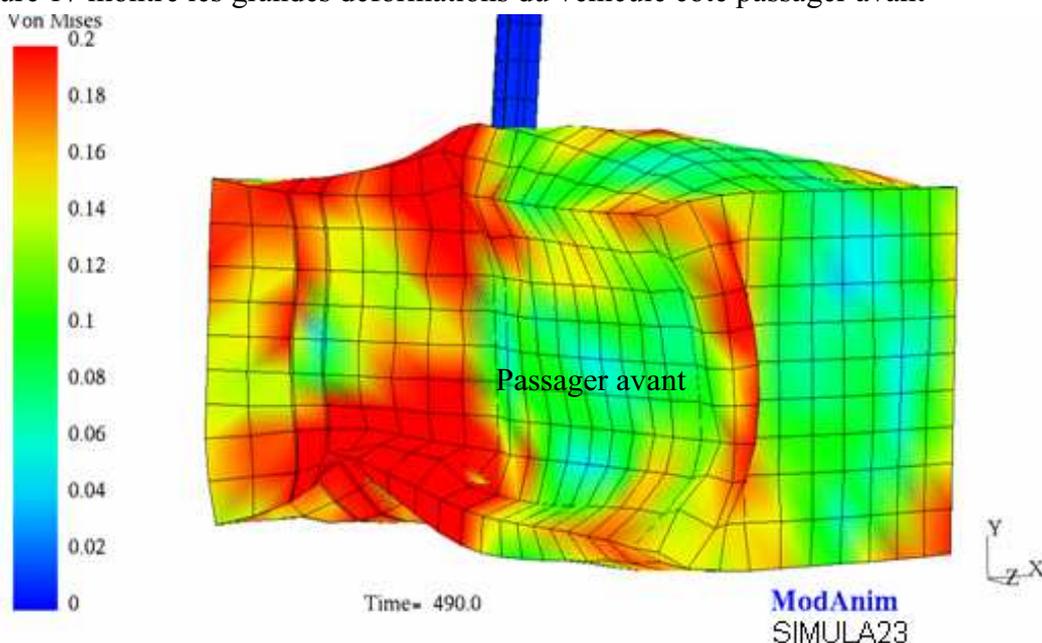


Figure 17 : *Déformée numérique de la structure équivalente après choc*

Les figures 18 et 19 montrent les similitudes de la configuration après choc entre le cas réel (figure 18) et le cas numérique (figure 19)



Figure 18 : Photo après crash de l'accident du 04 Juin 2007



Figure 19 : Image numérique après crash de la simulation de l'accident

V : DIAGRAMME DU CHOC

Compte tenu des calculs précédents, de la documentation mise à notre disposition et de notre réflexion, le diagramme du choc fait l'objet de la figure 20.

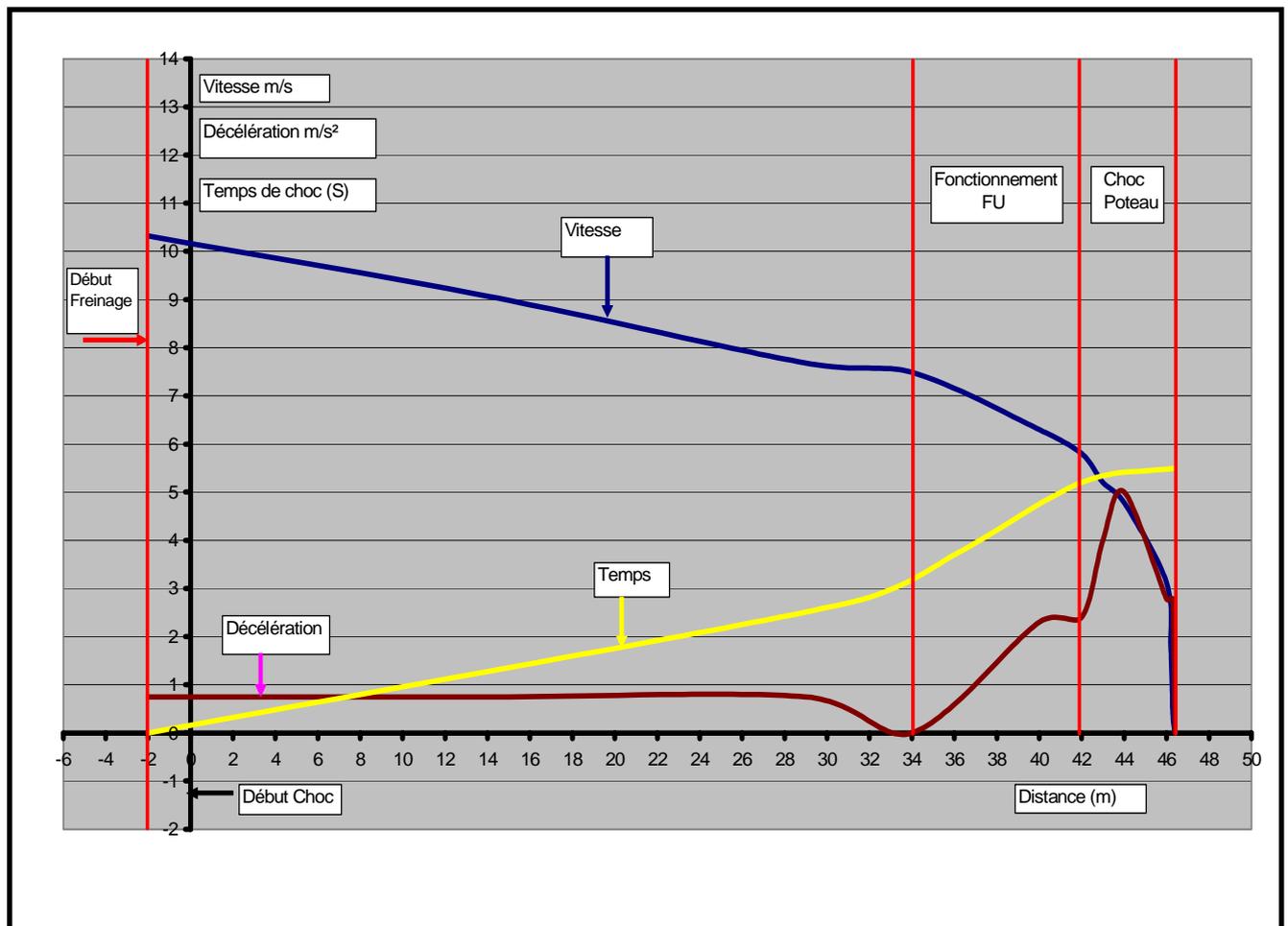


Figure 20 : Diagramme du choc côté Tram : variation de la vitesse, de la décélération et du temps de choc en fonction de la distance parcourue.

On distingue les observations majeures suivantes :

- Début de freinage à -2 mètres du choc évalué en fonction des vitesses enregistrées et du mouvement des passagers dans le tram :
 - ✓ la vitesse du tram est de 37,25 Km/h (10,32 m/s).
 - ✓ la décélération est constante à # 0,65 m/s².
- Début de choc avec la voiture :
 - ✓ à # 30 mètres la décélération est de 0,65 m/s² et la vitesse est de 27,75 Km/h (7,68 m/s). A ce moment le freinage s'arrête, la décélération tombe à zéro, puis la vitesse reste constante entre 30 et 33 mètres,
 - ✓ le freinage d'urgence commence à se manifester à # 34 mètres et la décélération commence à augmenter jusqu'au niveau nominal de # 2,2 m/s²,
 - ✓ à 40 mètres, la vitesse chute et, à 42 mètres, elle a une valeur de # 6 m/s.

- ✓ à 42 mètres le choc poteau se manifeste et la décélération monte rapidement à # 5 m/s². La force du contact variant entre 3500 KN et 250 KN et le choc poteau dure # 450 ms
- ✓ à 44 mètres du point d'impact, la voiture est broyée et la décélération chute à # 2,8 m/s².
- ✓ à t # +5,5 secondes du point d'impact, le crash est fini : la distance parcourue par le « Tram – voiture » est de 46 mètres après impact.

VI- REPARTITION ENERGITIQUE

Compte tenu des calculs précédents la répartition énergétique pendant le choc fait l'objet du tableau suivant.

Origine Energie absorbée	Décélération m/s ²	Distance parcourue (m)	Energie KJ
Déformation et mise en vitesse de la voiture avant choc poteau			380
Déformation voiture par choc poteau			284
Déformation poteau			29
Freinage Tram de -2 m à 30 m	0,65	32	1165
Début FU de 34 m à 40 m	1,2	6	403
FU de 40 m à 46 m	2,2	6	739
Energie totale dissipée dans le crash			3000 KJ

L'énergie cinétique en début de choc est : $=0,5 * M * V^2$ (M la masse du Tram et V sa vitesse)

$$56 * 0,5 * (10,32)^2 = 2982 \text{ KJ}$$

La totalité de l'énergie du tram est dissipée dans le crash.

VII- Conclusion

- o- la première phase de choc a duré 3 secondes sur 30 mètres .La voiture a subi 6 chocs successifs d'une durée chacun de # 30 ms et un effort variant de 740 KN à 50 KN.
Le défoncement du véhicule est de # 220 mm pour une énergie totale absorbée (déformation et mise en vitesse) de # 380 KJ.
Le déclenchement tardif du FU à 31 mètres a ralenti l'ensemble Tram- véhicule de 7,68 m/s à 6 m/s au moment du démarrage du choc poteau à 42 mètres.
- o- Le choc poteau a pulvérisé la voiture qui a encaissé des efforts variant de 3500 KN à 250 KN pendant 450 ms et un écrasement de 1500 mm.
L'énergie absorbée par l'écrasement (compression –rotation par le Tram à l'avant du véhicule et cisaillement par le poteau à l'arrière de la voiture) est de # 284 KJ.
- o- Si le freinage d'urgence avait été déclenché dès le premier contact avec le véhicule, le choc poteau aurait été sûrement évité car il faut entre 20 et 22 mètres pour arrêter le Tram en FU et la voiture victime disposait de 42 mètres avant son dramatique écrasement.

VIII- Suggestions

- O- Automatisation du FU au contact avec un obstacle routier
- O- Avertisseur sonore en cas de franchissement du feu rouge par le véhicule routier
- O- Les poteaux doivent être à une distance > 22 mètres du point de contact avec l'obstacle routier.

Annexe 5 : Retour d'expérience sur des évènements similaires

Choix des évènements pris en compte

En complément des informations contenues au paragraphe 4.7.5, portant sur l'analyse accidentologique des giratoires, il est utile de rapprocher cet accident d'autres évènements survenus sur giratoire, dont les caractéristiques sont identiques. Deux éléments caractérisent, notamment, cet accident, plus particulièrement :

- le temps de réaction du conducteur de TW pour déclencher le FU ;
- un deuxième choc de la VP sur un obstacle fixe, après un premier provoqué par le TW.

Il est important de noter qu'un temps de réaction du conducteur de TW de 3s pour activer le FU, suite au premier choc avec la VP, est un phénomène qui, à ce jour, n'est pas connu des services de contrôle de l'Etat. Il est, en effet, d'usage, dans les études de sécurité, de prendre en compte un temps de réaction allant de 1 à 1,35 s suivant les scénarii.

Le critère « déclenchement tardif du FU par le conducteur » n'est donc, de fait, pas pris en compte pour la description qui va suivre.

Par conséquent, les évènements retenus pour la présente étude consistent en des accidents qui se sont déroulés en carrefours giratoires traversés par une ligne de tramway pour lesquels il y a eu choc contre un obstacle fixe.

De mémoire d'exploitant, cinq évènements peuvent être pris en compte :

- ✓ trois accidents sur le réseau de tramway de Nantes au niveau du giratoire « Cardo Rue du Printemps » sur la ligne 2 (accidents des 15 octobre 2004 et 14 décembre 2007), et du giratoire Cassin Bout des Landes sur la ligne 2 (accident du 06/10/94).
- ✓ deux accidents sur le réseau de Lyon au niveau du giratoire Bron/Parilly sur la ligne T2 (accidents du 21 novembre 2001 et du 18 juillet 2006).

Ligne 2 du tramway nantais : giratoire Cardo, rue du Printemps – Accidents des 15 octobre 2004 et 14 décembre 2007

Lieu

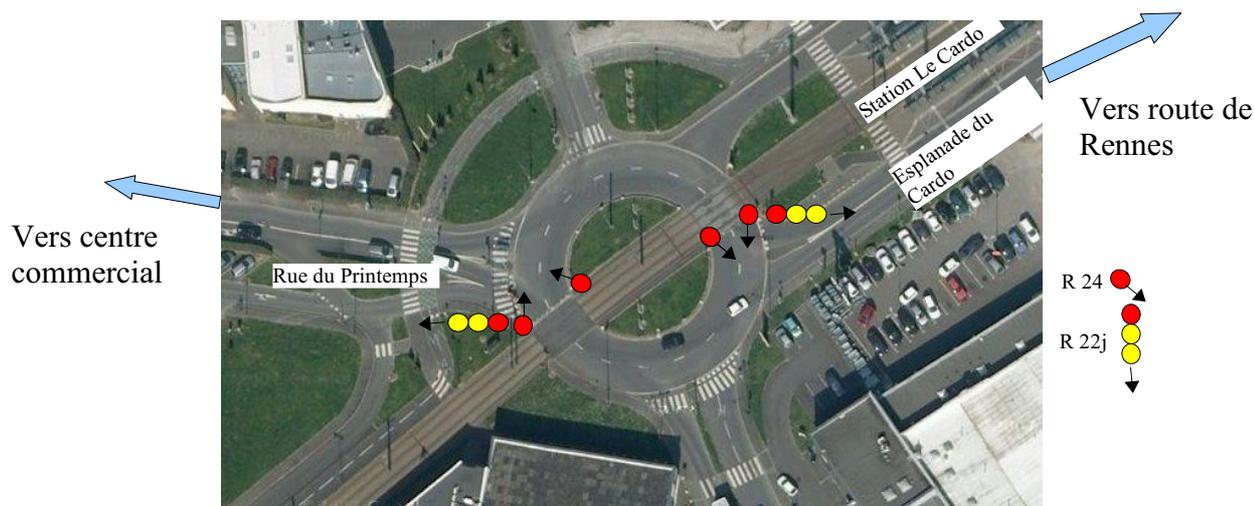
Le giratoire « Cardo Rue du Printemps » est localisé sur la commune d'Orvault, sur la ligne 2 du tramway de Nantes.

Ce giratoire se situe dans une zone commerciale à proximité de la route de Rennes, axe routier important d'entrée dans Nantes.

Les poteaux supportant la LAC sont implantés en axial.

Deux entrées du giratoire (Esplanade du Cardo et rue du Printemps) sont équipées de signalisation lumineuse (R22j) et les traversées de plate-forme sont équipées de signaux R24 (voir vue aérienne ci-dessous).

Schéma 1 Giratoire « Cardio » : signalisation lumineuse existante



● Accident du 15 octobre 2004

Description de l'évènement

Date / heure : 15 octobre 2004 vers 14h.

Conditions d'exploitation :

- exploitation nominale ;
- visibilité bonne ;
- adhérence dégradée (rail gras, glissant).

Circonstances :

D'après les déclarations de l'exploitant, la VP arrivait au niveau du giratoire par la rue du Printemps. Le conducteur du tramway a, en premier lieu, freiné en voyant la VP arriver au niveau du giratoire. Puis, voyant la VP freiner, comme pour s'arrêter au feu rouge clignotant du signal R24, il est revenu « sur l'erre ». La VP a de nouveau accéléré, le conducteur du tramway a déclenché un FU. Le tramway a percuté la VP, à une vitesse d'environ 20 km/h (information déclarative), et a entraîné celle-ci contre un poteau support de LAC.

Conséquences de l'accident

Les conséquences ont été importantes puisque l'accident a fait un mort (le conducteur de la VP qui était seul dans le véhicule).

Le poteau de LAC, situé dans la zone devant être libre de tout obstacle d'après le guide du STRMTG « Guide d'implantation des obstacles fixes à proximité des intersections tramways / voies routières », paru en avril 2007, a été un facteur aggravant.

● Accident du 14 décembre 2007

Description de l'évènement

Date / heure : 14 décembre 2007 vers 15h.

Conditions d'exploitation :

- exploitation nominale ;
- visibilité bonne ;
- adhérence normale.

Circonstances :

Selon les déclarations de l'exploitant, le tiers venait de la rue du Printemps et cherchait sa route. Il n'a pas remarqué le signal R24, rouge clignotant, et a heurté le tramway. Le tramway arrivait en direction de la station le Cardo et a percuté la VP à une vitesse inférieure à 30 km/h. La VP s'est ensuite retrouvée coincée entre la rame et le poteau de LAC axial se situant au centre du giratoire.

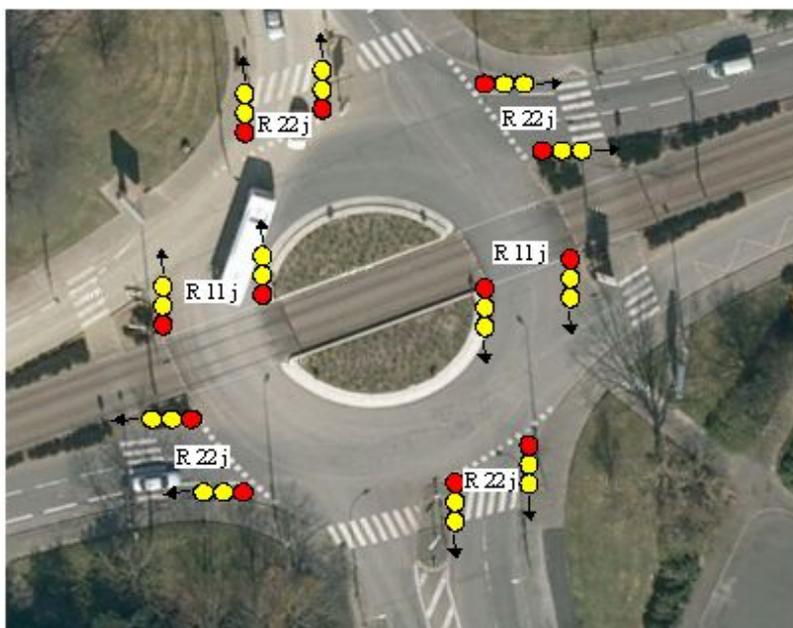
Conséquences de l'accident

L'accident a provoqué une victime, la conductrice de la VP, qui a souffert de diverses commotions et de blessures légères.

Le poteau support de LAC, situé dans la zone devant être libre de tout obstacle d'après le guide du STRMTG (voir précédemment), a été un facteur aggravant.

Ligne 2 du tramway nantais : giratoire Cassin Bout des Landes – Accident du 6 octobre 1994

Schéma 2 : Giratoire «Cassin – Bout des Landes» : signalisation lumineuse lors de l'accident (depuis 2003 les R11j en barrage ont été remplacés par des R24)



Description de l'évènement

Date / heure : 6 octobre 1994 à 9h28.

Conditions d'exploitation :

- exploitation nominale
- visibilité bonne
- adhérence normale

Circonstances :

D'après les déclarations de l'exploitant, la rame venait de la station René Cassin voie 1 et se dirigeait vers la station Cardo. Le VL a franchi le feu au rouge (R11j), il a été percuté par le tramway avant de finir coincé entre un poteau support de LAC et la rame.

Conséquences de l'accident

Les conséquences ont été importantes puisque l'accident a fait un mort (le conducteur de la VP).

Le poteau de LAC, situé dans la zone devant être libre de tout obstacle d'après le guide du STRMTG « Guide d'implantation des obstacles fixes à proximité des intersections tramways / voies routières », paru en avril 2007, a été un facteur aggravant.

Ligne T2 du réseau de tramway de Lyon : giratoire Bron Parilly – Accidents des 21 novembre 2001 et 18 juillet 2006

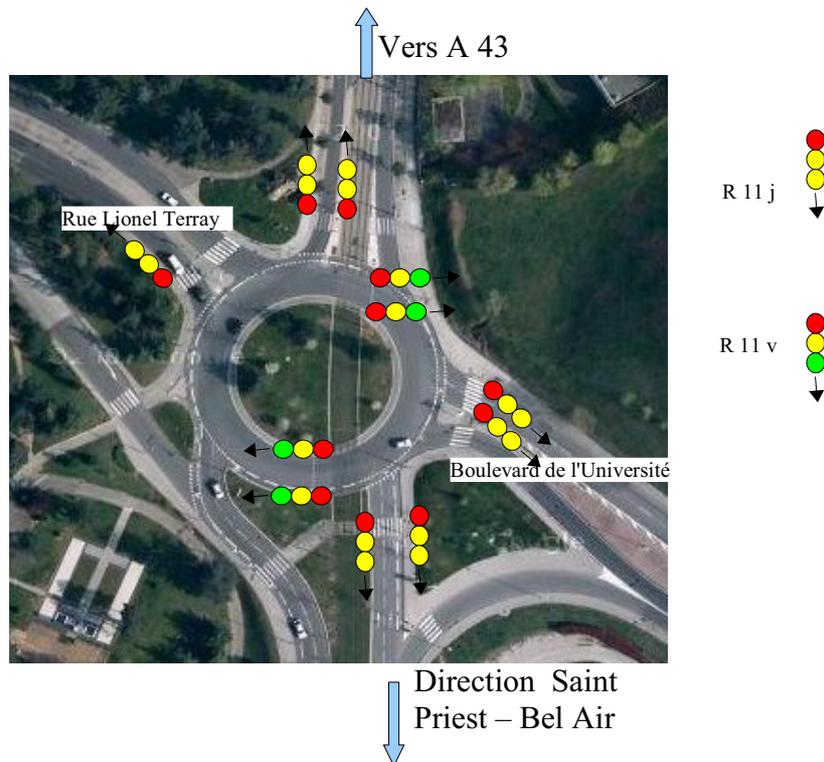
Lieu

Le giratoire « Bron Parilly » est localisé sur la commune de Bron, sur la ligne T2 du tramway de Lyon.

Ce giratoire se situe à proximité de l'autoroute A 43, dans une zone très fréquentée, car à proximité de l'hippodrome de Lyon Parilly et du centre commercial de Porte des Alpes

Chaque entrée est équipée de signalisation lumineuse (R11j) et les traversées de plate-forme sont équipées de signaux lumineux tricolores « classiques », des R11v (vert-jaune-rouge) (voir vue aérienne ci-dessous).

Schéma 3 : Giratoire « Bron-Parilly » : signalisation lumineuse existante



● **Accident du 21 novembre 2001**

Préambule

En 2001, la signalisation du giratoire était différente, en effet, l'ensemble des signaux lumineux étaient des R11j (en plate-forme et en entrée de giratoire).

Description de l'évènement

Date / heure : 20 novembre 2001 à 17h25.

Conditions d'exploitation :

- exploitation nominale ;
- visibilité bonne mais l'accident s'est produit de nuit ;
- adhérence normale

Circonstances :

D'après les déclarations de l'exploitant, la rame de tramway arrivait de la station en direction Saint Priest – Bel Air. Au moment de franchir le giratoire, un véhicule, fourgonnette type Master Renault, percute l'avant gauche du tramway après avoir franchit le R11j au niveau de la plate-forme au rouge. Le conducteur actionne le frein d'urgence et de secours, sa vitesse est alors de 23 km/h.

Sous l'effet du choc, le tramway ripe la fourgonnette, déraille sur une distance d'environ 12 m et vient terminer sa course contre un arbre. Les deux véhicules s'immobilisent de chaque côté du poteau support de caténaire sans le percuter.

Conséquences de l'accident

L'accident a fait 3 blessés légers (le conducteur du tramway, le conducteur de la fourgonnette et son passager).

Les dégâts matériels sont importants tant au niveau du tramway que de la fourgonnette.

Le poteau caténaire, pourtant situé dans la zone devant être libre de tout obstacle d'après le guide du STRMTG « Guide d'implantation des obstacles fixes à proximité des intersections tramways / voies routières » paru en avril 2007, n'a pas été facteur aggravant.

● Accident du 18 juillet 2006

Description de l'évènement

Date / heure : 18 juillet 2006 vers 19h.

Conditions d'exploitation :

- exploitation nominale ;
- visibilité bonne ;
- adhérence normale

Circonstances :

D'après les déclarations de l'exploitant, le conducteur du tramway, en abordant le giratoire en direction de Saint Priest Bel Air, aperçoit une voiture, en provenance du boulevard de l'Université. Cette VP franchit le feu rouge du signal R11v, malgré les coups de klaxon. La rame percute, à une vitesse d'environ 25 km/h (information déclarative), l'arrière de la voiture qui pivote et qui vient se coincer entre la rame et le poteau de la ligne aérienne (vois schéma ci-dessous).

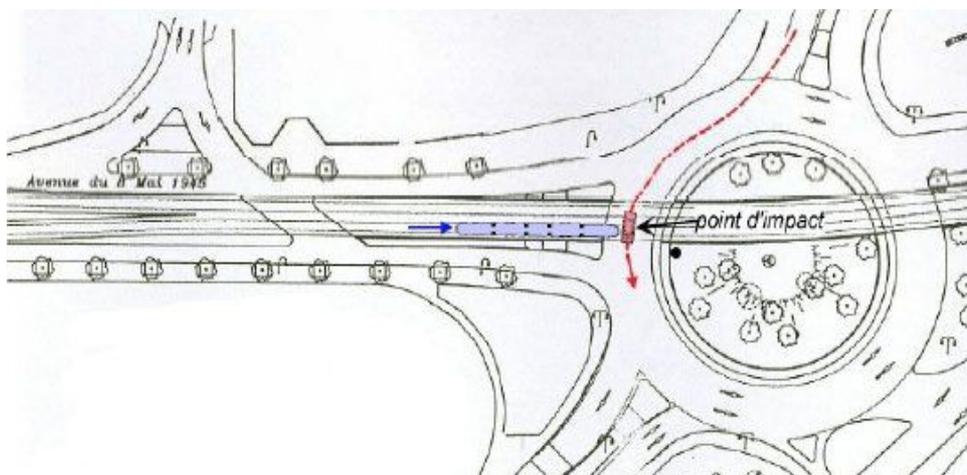
Conséquences de l'accident

L'accident a fait un blessé, le conducteur de la VP.

Au niveau du matériel roulant, le premier essieu de la rame a déraillé.

Le poteau de LAC, situé dans la zone devant être libre de tout obstacle d'après le guide du STRMTG (voir précédemment), a été un facteur aggravant.

Schéma 4 : Giratoire « Bron-Parilly » : visualisation des circonstances de l'accident



Conclusion

Les accidents présentés confirment l'utilité et la nécessité de définir des zones devant être libres de tout obstacle fixe dans les intersections car nous constatons, à la lumière de ce retour d'expérience, que les obstacles de type « poteaux supports de LAC », dont la localisation est non conforme au guide du STRMTG « Guide d'implantation des obstacles fixes à proximité des intersections tramways / voies routières », paru en avril 2007, ont été des facteurs aggravants.

Les exploitants des réseaux concernés par ces accidents mènent actuellement des réflexions pour traiter ces zones et doivent proposer, courant 2008, des solutions.

LA SEMITAN a lancé un programme de déplacement des poteaux de LAC sur l'ensemble de son réseau. Ce programme, annoncé par la SEMITAN dans son rapport du 12 juin 2007 relatif à l'accident du 4 juin 2007, prévoit dans un premier temps de lister les poteaux se situant dans les zones à risques, au sens du guide du STRMTG (31,5 mètres, en distance longitudinale pour une vitesse de 40 km/h, cf. le schéma 19 pour caler les extrémités), puis de définir les actions à lancer par ordre de priorité sur la base de 3 critères :

- ✓ la gravité (énergie cinétique au point d'impact) ;
- ✓ l'accidentologie des carrefours concernés ;
- ✓ la complexité des travaux à réaliser (notion de coût).

L'objectif de la SEMITAN est de pouvoir disposer d'un programme afin de le présenter à Nantes Métropole courant 2008.

A ce sujet, Nantes Métropole vient de voter, en décembre 2007, un programme de sécurité concernant le réseau tramway et portant sur 5 M€ TTC : il s'agit, principalement, de réaliser le déplacement des poteaux supports de LAC, de poursuivre le renforcement du programme d'amélioration de la signalisation et de réaliser diverses autres interventions.

Concernant le giratoire Bron/ Parilly sur la ligne T2 du tramway de Lyon, les réflexions menées par l'exploitant Keolis Lyon pour améliorer la perception globale du giratoire sont axées notamment sur :

- des modifications de la signalisation verticale,
- des déplacements de certaines lignes de feux,
- un renforcement de la perception du GLO* au moyen d'un marquage spécifique au sol,
- des interventions sur la végétation pour améliorer la visibilité.

Par ailleurs, le poteau caténaire concerné dans les deux accidents a été déplacé en le 3 avril 2007.

Nous remarquons également que, pour les 5 accidents présentés, le choc (sur l'obstacle fixe pour 4 accidents) a eu lieu suite à la première traversée de la plate-forme, immédiatement après le premier choc, et non pas suite à la seconde traversée, comme cela s'est produit sur le giratoire « Vasco de Gama ».

* Terme figurant dans le glossaire

Annexe 6 : Analyse accidentologique des giratoires

GIRATOIRES TRAVERSES PAR UNE LIGNE DE TRAMWAY

Étude accidentologique
sur la période 2004 - 2006

Date : Mai 2008



Remerciements

Nous remercions les exploitants de tramways qui ont bien voulu répondre à l'enquête spécifique réalisée dans le cadre de ce rapport et qui en a permis son élaboration.

Affaire suivie par

Valérie de LABONNEFON – STRMTG – Division tramways
Tel: 04 76 63 78 70, fax: 04 76 42 39 33
Mail: valerie.de-labonnefon@developpement-durable.gouv.fr

Sommaire

1. Introduction.....	4
2. Présentation de la base de données du STRMTG.....	4
3. Le domaine de l'étude.....	5
3.1.Définitions.....	5
3.2.Périmètre de l'étude.....	5
3.3.Les années de référence.....	5
3.4.Le parc analysé.....	5
3.5.Les événements pris en compte.....	6
4. Les résultats.....	6
4.1.Limites de l'étude.....	6
4.2.Données globales.....	7
4.3.Les accidents mortels.....	7
4.4.La répartition des collisions et des victimes entre 2004 et 2006.....	7
4.5.L'influence de la géométrie.....	9
4.5.1.Positionnement de la plate-forme tramway par rapport au giratoire.....	10
4.5.2.Taille des giratoires.....	11
4.5.3.Nombre de voies de circulation routière en entrée de giratoire	13
4.5.4.Giratoires moyens – Influence du nombre de voies en entrée.....	14
4.6.L'influence de la signalisation lumineuse de trafic (SLT).....	15
4.6.1.La signification des signaux.....	16
4.6.2.Positionnement de la SLT.....	16
4.6.3.Positionnement de la SLT et taille des giratoires.....	17
4.6.4.Le type de signalisation lumineuse.....	18
5. Conclusion.....	19
5.1.Constat général.....	20
5.2.L'influence de la taille du giratoire.....	20
5.3.L'influence du nombre de voie de circulation en entrée de giratoire.....	20
5.4.L'influence de la signalisation lumineuse de trafic (SLT).....	20

1. Objet de l'étude

Les premières analyses menées par le STRMTG sur l'accidentologie des tramways présentées dans le rapport annuel « Analyse des événements déclarés pour l'année 2005 », ont mis en évidence un « niveau de risque » de collisions plus important dans les carrefours giratoires que dans les autres intersections.

Le rapport fait apparaître un facteur 4 entre le niveau de risque de collisions en giratoires et celui dans les carrefours simples.

Au vu de ces premiers constats et du retour d'expérience disponible en la matière, une réflexion a été engagée avec les spécialistes du domaine de l'aménagement de voirie en milieu urbain et la profession (CERTU, AOT, exploitants, EOQA Insertion Urbaine) afin d'établir un guide technique de recommandations relatif à la conception des giratoires traversés par une ligne de tramway.

Le calendrier de production de ce guide a été déterminé de manière à permettre la prise en compte de ses recommandations sur les nombreux projets de tramways mis en service en 2007.

L'objet de la présente étude est donc multiple:

- affiner les premières conclusions quant au niveau de risque spécifique identifié en giratoires,
- conforter les dispositions adoptées dans le guide technique CERTU/STRMTG « Giratoires et tramways – Franchissement d'un carrefour giratoire par une ligne de tramway »,
- évaluer l'impact du signal R 24 en feu de barrage dans un contexte de fortes interrogations quant à la compréhension par certains usagers de ce signal.

2. Présentation de la base de données du STRMTG

Les données utilisées pour l'analyse qui suit sont issues:

- de la base de données nationale « Accidents » du STRMTG,
- des déclarations des exploitants suite à une enquête menée spécifiquement pour les besoins de cette analyse.

La base de données permet, pour un événement, de disposer des informations suivantes:

1. le nom du réseau,
2. le type d'évènement,
3. la situation temporelle de l'évènement (date et heure),
4. la situation géographique (ligne, voie, numéro de la rame et localisation de l'évènement),
5. la configuration du lieu de l'évènement.
6. l'environnement de l'évènement (conditions extérieures : adhérence, visibilité, exploitation dégradée, travaux, etc.)
7. les conséquences corporelles et matérielles pour l'exploitation (durée de perturbation)
8. les paramètres du système (selon déclaration conducteur et/ou relevé centrale tachymétrique)
9. le rapport de police (oui, non)
10. les circonstances de l'évènement (résumé de l'évènement, manoeuvre du tiers, suicide, etc.)
11. les suites données (étude en cours, modification prévue, plan d'action engagé, etc.)

Toutes les données précisées ci-dessus sont issues des déclarations des exploitants et ne sont pas toujours totalement disponibles, notamment pour les 6 derniers critères listés.

La mise en place de la base de données datant de 2003, la qualité du renseignement de cette base de données est en nette progression, notamment depuis la mise en place d'un outil informatisé à destination des exploitants.

Pour l'étude détaillée ci-après, la base de données permet de connaître:

- l'ordre de grandeur du rayon extérieur du giratoire, (trois catégories: $R_{ext} \leq 15m$, $15m < R_{ext} \leq 25m$ et $R_{ext} > 25m$)
- la catégorie de signalisation (carrefour à feux, signalisation lumineuse tricolore (SLT) sur appel tramway ou pas de SLT).

La base de données ne permet, cependant, pas de connaître la nature précise du signal en barrage ou en entrée.

De la même manière, aucune information concernant la largeur de la chaussée routière et celle d'une éventuelle bande franchissable n'apparaît dans la base de données.

Cette étude a donc du être accompagnée d'une enquête détaillée auprès des exploitants.

3. Le domaine de l'étude

3.1. Définitions

Dans la présente étude, on entend par:

- **Rond-point à feux**, un carrefour avec un anneau de forme circulaire dont les flux routiers sont gérés par feux en l'absence de tramway.
- **Giratoire**, un carrefour fonctionnant en carrefour giratoire « classique » avec cédez-le-passage en entrée de giratoire pour les véhicules routiers en l'absence de tramway. La présence de feux dans ce type de carrefour n'est du qu'à la gestion de la traversée du tramway.
- **Victimes**, et déclarées comme telles par les exploitants, les personnes non indemnes (tiers ou voyageurs) concernées par un événement. **Cette notion ne préjuge en rien de la gravité des blessures des personnes.**
- **Morts**, les personnes dont le décès est connu lors de la déclaration, sans que ne puissent être toujours pris en compte les décès survenus ultérieurement.

3.2. Périmètre de l'étude

Les carrefours pris en compte dans cette étude sont des giratoires traversés par une ligne de tramway.

3.3. Les années de référence

Les années prises en compte sont les années 2004 à 2006, l'année 2003 (première année de saisie) étant trop imprécise et partiellement renseignée.

3.4. Le parc analysé

Les réseaux pris en compte dans l'étude parmi les quinze réseaux en service en 2006 sont les suivants:

- Bordeaux (lignes A, B et C)
- Grenoble (lignes A et B)
- Lyon (lignes T1 et T2)
- Montpellier (ligne 1)
- Mulhouse (en service depuis mai 2006)
- Nantes (lignes 1, 2 et 3)
- Orléans (ligne 1)
- Saint Étienne (ligne 4)
- Paris (ligne T1 et T2)
- Valenciennes (ligne 1 en service depuis mai 2006)

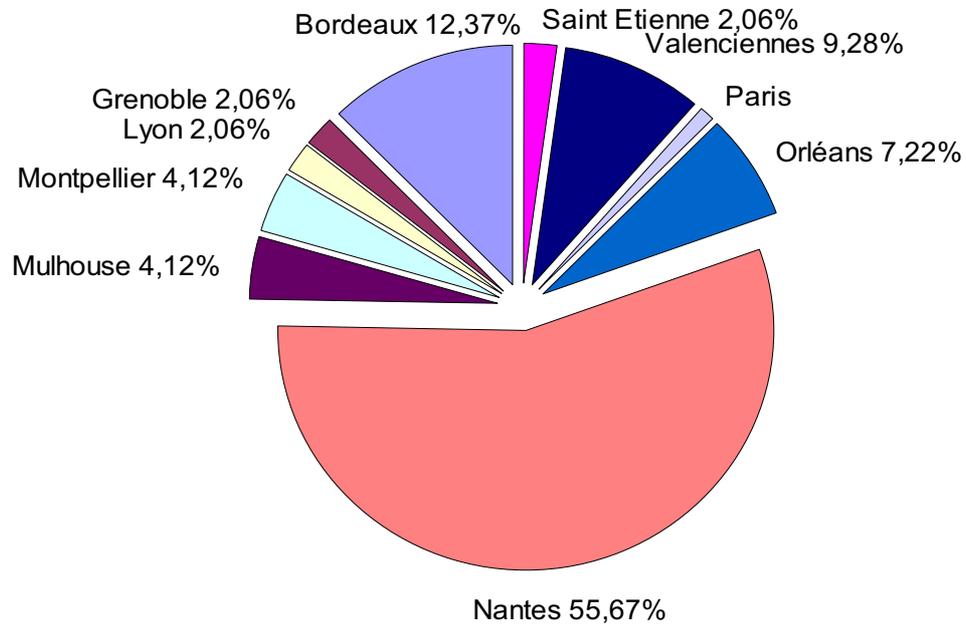
Les réseaux de **Strasbourg et de Lille** n'ont pas de giratoire traversé par une ligne de tramway.

Le réseau de **Rouen** n'est pas intégré à l'étude faute de données suffisamment précises au moment de la rédaction de cette analyse.

Par souci d'homogénéité, **seuls les réseaux de tramway « fer »** ont été pris en compte (mêmes capacités de freinage et même type de guidage).

Ne sont donc pas considérés dans cette étude Caen, Nancy et Clermont-Ferrand.

La répartition du nombre de giratoires traversés par une ligne de tramway par agglomération, en 2006, est la suivante:



On constate que plus de la moitié des giratoires est située sur le réseau nantais (54 giratoires sur 97).

3.5. Les événements pris en compte

Les événements pris en compte sont les événements de type « collisions avec un tiers » au sens de la base de données « Accidents » (PL et TC > 3,5 T, VU < 3,5 T, VL, 2 roues motorisé, vélo, piéton, autre).

4. Les résultats

4.1. Limites de l'étude

L'étude porte plus particulièrement sur la répartition des événements en fonction des configurations et de la signalisation des giratoires en prenant comme référence le guide CERTU / STRMTG « Giratoires et tramways – Franchissement d'un carrefour giratoire par une ligne de tramway ».

L'analyse précise des scénarios des collisions n'a pu être menée faute d'éléments suffisamment détaillés dans la base de données.

Les données présentées ci-après n'ont pas fait l'objet d'une analyse statistique démontrant leur significativité. **Elles présentent donc des tendances à confirmer avec les données futures.**

4.2. Données globales

Il a été recensé 97 giratoires en 2006 sur les réseaux pris en compte, nombre en augmentation depuis 2004, année pour laquelle nous recensons 81 giratoires et 85 giratoires en 2005.

Le nombre de collisions s'élève à 374 entre 2004 et 2006 ayant fait 85 victimes et 3 morts (2 en 2004 et 1 en 2006).

4.3. Les accidents mortels

Les 3 accidents mortels se sont produits sur des giratoires « moyens » (voir définition au paragraphe 4.5.2) ayant tous les trois de la signalisation en entrée de giratoire.

- Deux d'entre eux, en 2004, se sont produits sur le réseau de Nantes:
 - x Un sur la ligne 2 sur le carrefour « Cardo/Rue du Printemps » impliquant un poteau de LAC axial.
 - x L'autre sur la ligne 2 sur le carrefour « Orion Michelet » lié à un problème de visibilité dû à de la végétation.
- Le troisième s'est produit, en 2006, sur la ligne A du réseau d'Orléans.

4.4. La répartition des collisions et des victimes entre 2004 et 2006

Le tableau ci-dessous présente la répartition des collisions, des victimes et des morts sur les années 2004 à 2006.

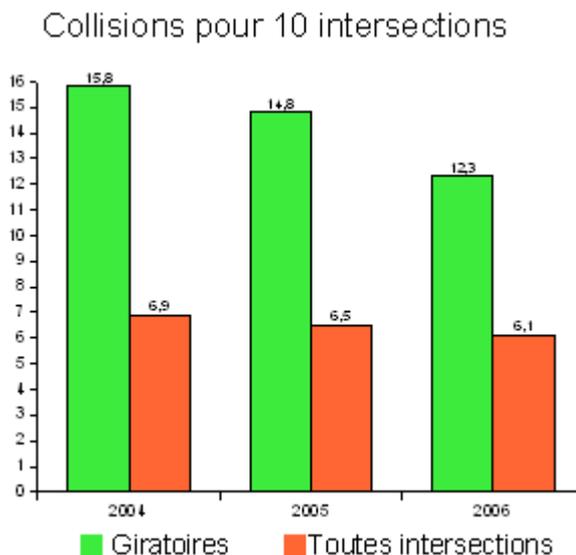
	2004	2005	2006	Total
Nbre de giratoires	81	85	97	97
Nbre de collisions	128	126	120	374
Nbre de victimes	24	30	31	85
Nbre de morts	2	0	1	3

On constate une baisse globale des collisions en giratoires entre 2004 et 2006 alors que le nombre de giratoires augmente.

L'étude s'est attachée à comparer l'évolution du nombre de collisions et de victimes en giratoires avec celle observée pour l'ensemble des intersections (giratoires compris), **en regard des indicateurs retenus** dans les rapports «Accidentologie des tramways » édités annuellement par le STRMTG:

- **nombre de collisions pour 10 intersections,**
- **nombre de victimes pour 10 intersections.**

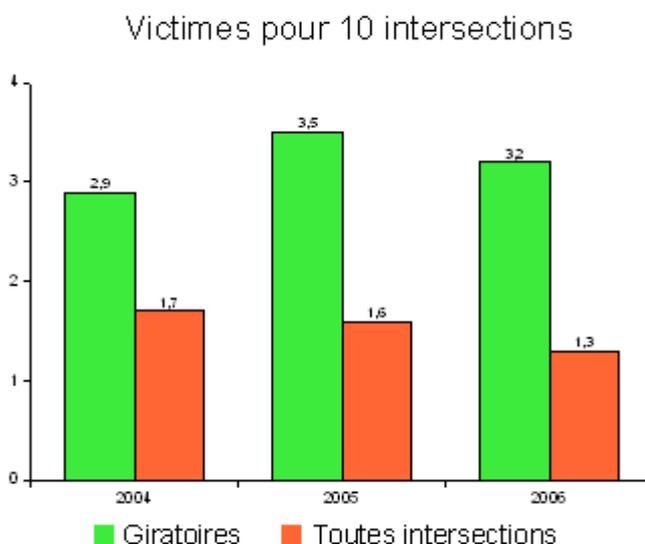
On observe alors les résultats suivants:



Même si l'on constate une baisse globale du nombre de collisions entre 2004 et 2006, les giratoires présentent un niveau de dangerosité globalement deux fois plus important que pour l'ensemble des intersections traversées par une ligne de tramway.

On verra, dans la suite de l'étude, que cette donnée brute est à relativiser notamment par le fait que sont prises en compte toutes les configurations de giratoires existantes sur les réseaux, les « bonnes » configurations comme les « mauvaises » en référence au guide de conception du CERTU/STRMTG sur les giratoires traversés par une ligne de tramway évoqué en première partie « Objet de l'étude ».

Concernant les victimes on obtient les données suivantes:



On remarque que la gravité est plus importante que pour l'ensemble des intersections.

Par ailleurs, la tendance à la baisse observée précédemment pour les collisions en giratoires n'est pas observée pour les victimes. Toutefois, les chiffres pris en compte sont beaucoup plus faibles, de sorte qu'il est difficile de parler d'évolution.

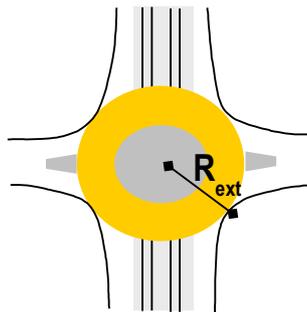
On peut retenir, pour la suite de l'étude, les indicateurs globaux suivants:

	Collisions pour 10 intersections par an	Victimes pour 10 intersections par an
Giratoires	14,3	3,2
Toutes intersections	6,5	1,5

4.5. L'influence de la géométrie

Plusieurs critères relatifs à la géométrie et listés ci-après peuvent a priori être pris en compte dans l'analyse de l'influence de la géométrie (en référence au guide technique STRMTG/CERTU « Giratoires et tramways – Franchissement d'un carrefour giratoire par une ligne de tramways »):

- le positionnement de la plate-forme tramway par rapport au giratoire,
- la taille du giratoire par la longueur du rayon extérieur (cf. schéma ci-dessous),



- la largeur de l'anneau,
- l'existence ou non de la bande franchissable (surlargeur située sur le pourtour de l'îlot central d'environ 1,5 m à 2m de large pour permettre les girations des poids-lourds mais n'étant pas identifiée comme étant dans la zone de roulement de l'anneau),
- le nombre de voies de circulation routière en entrée de giratoire.

Une analyse détaillée pour chaque critère a été engagée mais s'est heurtée, dans certains cas, à des échantillons d'événements trop faibles pour pouvoir mener une étude pertinente.

Au final l'examen a porté sur les thématiques suivantes, pour lesquelles des tendances générales ont pu être dégagées:

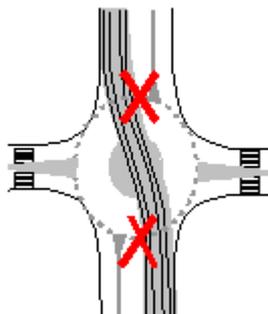
- positionnement de la plate-forme tramway par rapport au giratoire,
- taille des giratoires,
- nombre de voie de circulation routière en entrée de giratoire.

Ces deux dernières thématiques présentant un caractère particulier du point de vue de la sécurité.

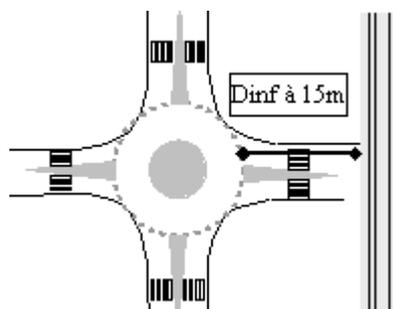
4.5.1. Positionnement de la plate-forme tramway par rapport au giratoire

Deux configurations ont été analysées:

- Les giratoires avec, au moins, une entrée juste en amont de la plate-forme (voir schéma ci-dessous)



- Les giratoires se situant à l'extérieur de la plate-forme à une distance inférieure à 15m.



Les résultats sont présentés dans les tableaux suivants:

Giratoires avec au moins une entrée juste en amont	2004	2005	2006
<i>Nbre de giratoires</i>	21	22	25
<i>Nbre de collisions</i>	45	48	33
<i>Nbre de collisions pour 10 intersections</i>	21,4	21,8	13,2

En première approche, on constate que cette configuration paraît relativement accidentogène.

Toutefois cette tendance doit être relativisée car nous ne savons pas si les accidents comptabilisés se sont produits sur les entrées considérées dans cette catégorie (juste en amont de la plate-forme).

Il faudrait en outre étudier d'autres critères qui aboutiraient à des nombres de collisions trop faibles pour pouvoir en tirer des enseignements fiables.

Giratoires à l'extérieur de la plate-forme à moins de 15m	2004	2005	2006
<i>Nbre de giratoires</i>	12	12	13
<i>Nbre de collisions</i>	11	11	8
<i>Nbre de collisions pour 10 intersections</i>	10,7	11,5	6,4

Le panel est relativement faible. Il semble toutefois que cette catégorie présente une accidentologie moindre par rapport à celle, globale, des carrefours giratoires (moyenne de 14,3 collisions pour 10 intersections et par an). Ce point devra être suivi avec les données futures pour voir si cette tendance se confirme.

**Les giratoires à l'extérieur de la plate-forme tramway (14 giratoires), constituant une configuration très particulière, sont exclus dans la suite de l'étude.
Le panel d'analyse est donc de 83 giratoires correspondant à 336 collisions et 77 victimes.**

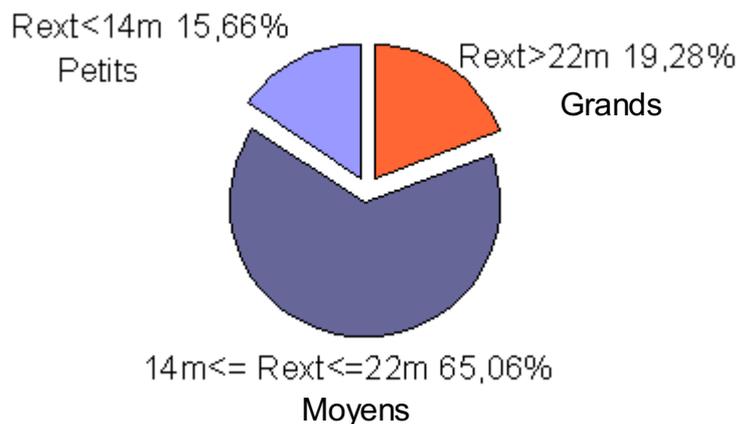
4.5.2. Taille des giratoires

On entend par:

- petits giratoires, ceux dont le rayon extérieur est strictement inférieur à 14m
- giratoires moyens, ceux dont le rayon extérieur est compris entre 14 et 22 m
- grands giratoires, ceux dont le rayon extérieur est strictement supérieur à 22m

(en référence au guide de conception du CERTU/STRMTG sur les giratoires traversé par une ligne de tramway

La répartition par taille de giratoire est la suivante:

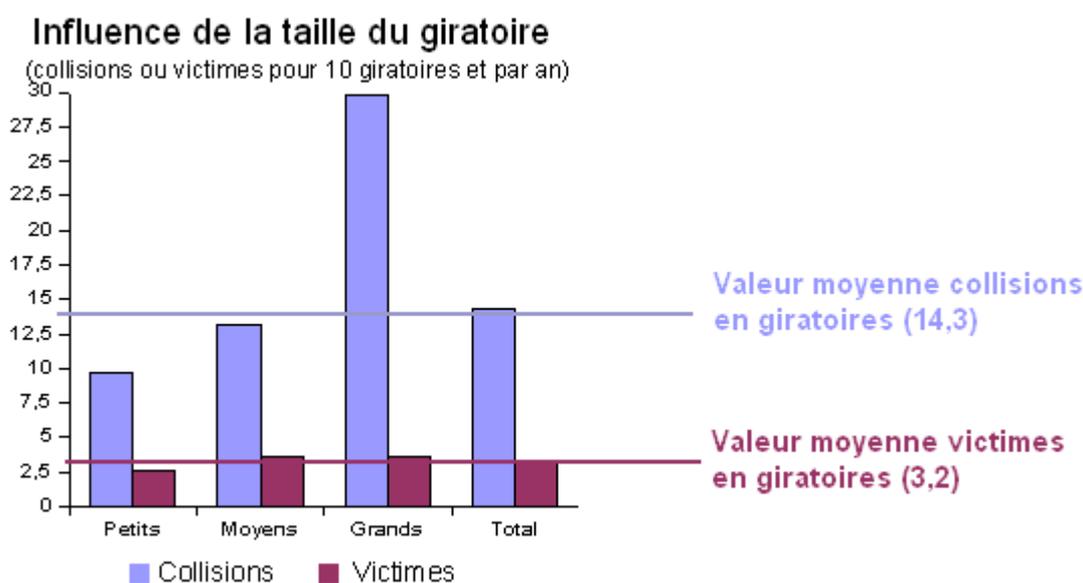


On constate que plus de la moitié des giratoires sont des giratoires moyens (54 giratoires sur 83).

Le tableau ci-dessous indique le nombre de collisions et de victimes entre 2004 et 2006 en fonction de la taille des giratoires.

Taille	Nombre de giratoires en 2006	Nombre de collisions entre 2004 et 2006	Nombre de victimes entre 2004 et 2006
Petits	13	33	9
Moyens	54	196	55
Grands	16	107	13

En prenant en compte les indicateurs collisions ou victimes pour 10 giratoires et par an, on obtient le graphe suivant:



On constate que:

- Les giratoires moyens ont des taux de collisions et de victimes pour 10 giratoires et par an voisins des valeurs moyennes de l'ensemble des giratoires. Comme le panel de cette catégorie est important, il est possible d'en faire une analyse plus détaillée, notamment en examinant le facteur « nombre de voies routières en entrée de giratoires » (voir paragraphe 4.5.4.).
- **Les grands giratoires ont un taux de collisions pour 10 giratoires et par an deux fois plus important que la valeur moyenne de l'ensemble des giratoires**, cette donnée confirme ce que l'on pouvait supposer, à savoir que les giratoires de grande taille sont particulièrement accidentogènes du fait notamment des vitesses qui peuvent y être pratiquées.
- Les petits giratoires semblent avoir une accidentologie plus faible. **Il est toutefois difficile de dégager une conclusion pertinente, le panel d'étude étant très réduit.**

Il est utile de rappeler que la valeur moyenne entre 2004 et 2006 du nombre de collisions pour 10 intersections et par an est de 6,5 pour l'ensemble des intersections traversées par un tramway.

4.5.3. Nombre de voies de circulation routière en entrée de giratoire

Le critère étudié dans ce paragraphe est le nombre de voies de circulation routière en entrée de giratoire.

On parle de:

- « giratoires avec une voie en entrée » lorsqu'il n'y a **qu'une seule voie de circulation routière sur toutes les entrées du giratoires.**
- « giratoires avec deux voies et + en entrée » lorsqu'il y a **au moins, sur l'une des entrées, deux voies de circulation routière (ou plus).**

Il convient de préciser qu'aucune distinction n'est faite à ce niveau entre les entrées parallèles et les entrées perpendiculaires à la plate-forme.

On obtient donc pour l'ensemble des 83 giratoires étudiés, la répartition suivante:

Giratoires avec une voie en entrée	2004	2005	2006
<i>Giratoires</i>	47	50	61
<i>Collisions</i>	62	62	60
<i>Victimes</i>	7	12	18

Giratoires avec deux voies et plus en entrée	2004	2005	2006
<i>Giratoires</i>	20	20	22
<i>Collisions</i>	52	49	51
<i>Victimes</i>	15	16	9

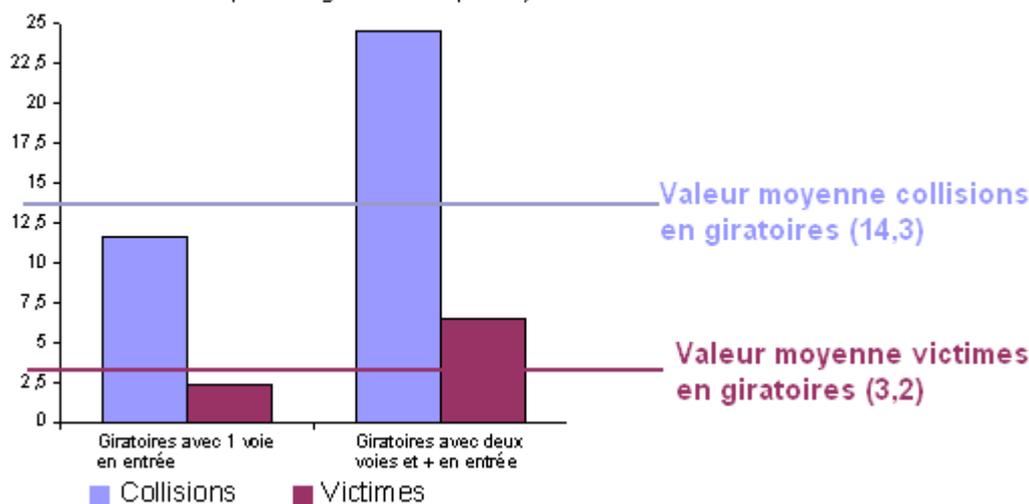
On remarque que le nombre de giratoires avec une seule voie de circulation routière en entrée est en progression conformément à ce qui est préconisé dans le guide technique STRMTG/CERTU « Giratoires et tramways – Franchissement d'un carrefour giratoire par une ligne de tramways » alors que dans le même temps le nombre d'accident reste stable.

On constate par ailleurs une augmentation du nombre de victimes. Ce point devra être suivi avec les données futures pour voir si cette tendance se confirme.

En prenant en compte les indicateurs collisions ou victimes pour 10 giratoires et par an, on obtient le graphe suivant:

Influence du nombre de voies en entrée

(collisions ou victimes pour 10 giratoires et par an)



Il apparaît que la limitation du nombre de voies de circulation routière en entrée de giratoire a une incidence positive sur le nombre de collisions pour 10 giratoires et par an.

Concernant les victimes, la tendance est la même. Elle doit toutefois être relativisée compte-tenu du petit nombre de données.

4.5.4. Giratoires moyens – Influence du nombre de voies en entrée

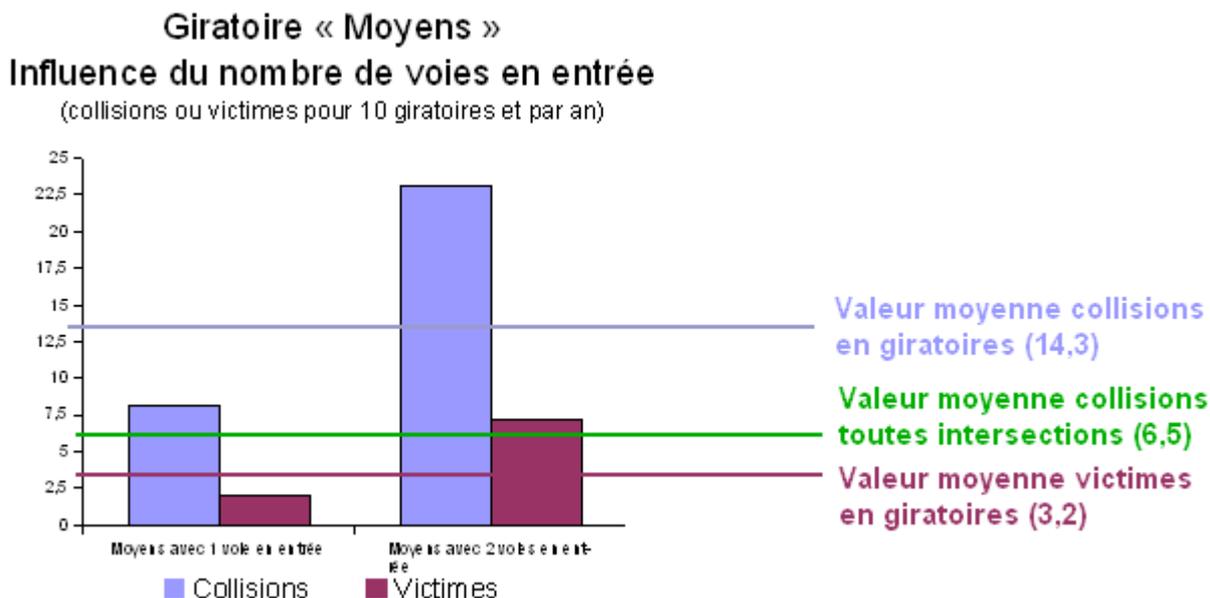
Afin de se rapprocher d'une configuration proche de celle préconisée par le guide technique STRMTG/CERTU « Giratoires et tramways – Franchissement d'un carrefour giratoire par une ligne de tramways », tout en conservant un panel de données suffisant pour en tirer des conclusions pertinentes, nous nous sommes intéressés aux giratoires moyens en analysant l'influence du nombre de voie de circulation routière en entrée. On obtient donc pour les 54 giratoires « moyens » (valeur 2006), les répartitions suivantes:

Giratoires « moyens » avec une voie en entrée	2004	2005	2006
Giratoires	30	31	36
Collisions	29	22	28
Victimes	3	4	13*

* Une collision a généré 7 victimes (6 voyageurs et 1 tiers)

Giratoires « moyens » avec deux voies et plus en entrée	2004	2005	2006
Giratoires	17	17	18
Collisions	43	41	33
Victimes	15	15	5

En prenant en compte les indicateurs collisions ou victimes pour 10 giratoires et par an, on obtient le graphe suivant:



Le graphe ci-dessus confirme le fait que le nombre de voies de circulation routière en entrée est un facteur influençant sensiblement l'accidentologie des tramways en giratoires.

On constate par ailleurs que les taux de collisions et de victimes pour 10 giratoires et par an des giratoires moyens avec une seule voie de circulation en entrée (respectivement 8,1 et 2,1) sont très inférieures à ceux observés pour l'ensemble des giratoires (respectivement 14,3 et 3,2). Ils apparaissent plus proches des valeurs obtenues pour l'ensemble des intersections (respectivement 6,5 et 1,5).

4.6. L'influence de la signalisation lumineuse de trafic (SLT)

Afin d'avoir des échantillons permettant de dégager des tendances fiables, une analyse sur le positionnement de la SLT (en barrage au niveau de la plate-forme ou en entrée de giratoire) a tout d'abord été menée.

Il aurait été également intéressant de faire une analyse plus fine sur le type de signal employé (R24, R11v, R11j).

Malheureusement une grande variété de configuration existe sur les réseaux de tramways réduisant les échantillons à quelques unités et rendant ainsi l'exercice difficile.

Nous avons donc restreint l'étude à une évaluation globale de l'impact du signal R24 (signal majoritairement implanté sur les réseaux) en tant que signal de barrage (voir paragraphe 4.6.1.).

4.6.1. Description des signaux



4.6.2. Positionnement de la SLT

Trois catégories ont été identifiées:

- les giratoires avec uniquement de la SLT en barrage (au niveau de la plate-forme),
- les giratoires avec de la SLT en barrage et en entrée,
- les giratoires avec uniquement de la SLT sur les branches d'entrées du giratoire.

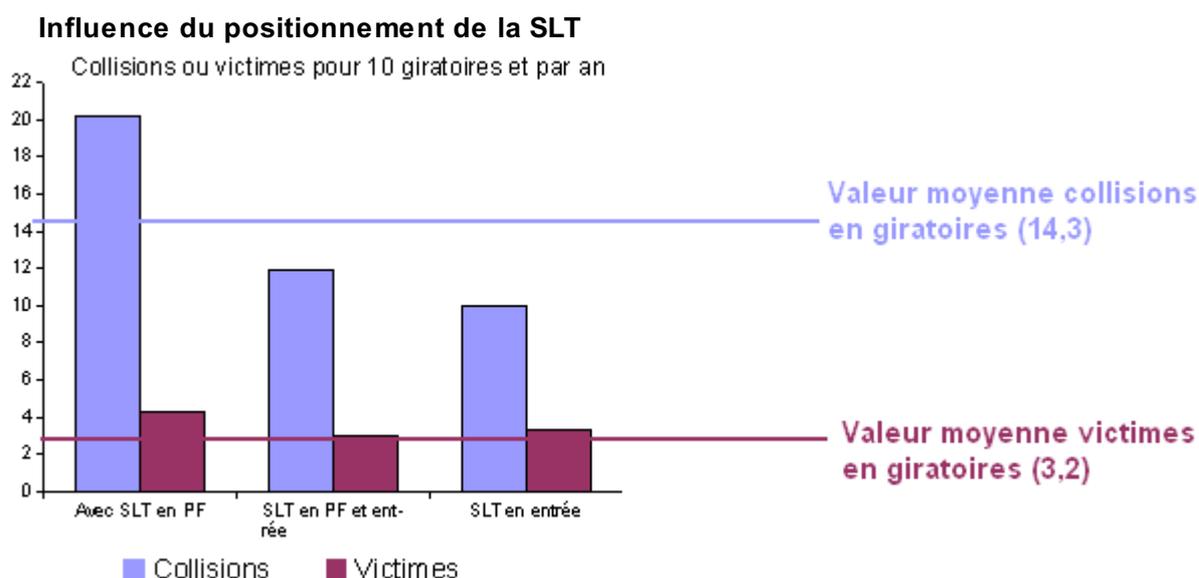
Le tableau ci-après présente la répartition en nombre de giratoire selon les trois catégories ainsi que le type de SLT en place.

Positionnement de la SLT	Nombre de giratoires	Type de SLT*	Nombre
SLT uniquement en barrage	36	R 24	30
		Type R 1(jaune clignotant)	1
		R11v	2
		R11v et R11j	1
		R11j	2
SLT en barrage et en entrée	36	R11j associés à un R11j/R22j	7
		R11v associé à un R11j	1
		R24 associés à des R22j	28
SLT uniquement en entrée	9	R11j	6
		R22j	3
Divers	2	Sans aucune SLT	1
		STOP en barrage	1

* voir ci-dessus la signification des signaux

On constate une grande diversité de configuration avec tout de même une large majorité de signal R24 positionné en barrage (58 giratoires sur 83).

En prenant en compte les indicateurs collisions ou victimes pour 10 giratoires et par an, on obtient le graphe suivant:



Le cas des giratoires avec de la SLT uniquement en entrée est à prendre avec précaution dans la mesure où l'échantillon est faible (9 giratoires, 7 collisions, 3 victimes entre 2004 et 2006).

Pour les deux autres catégories, **il semble qu'une ligne de feux en entrée de giratoire ait des effets positifs sur le nombre de collisions.**

Cette tendance est plus discutable pour ce qui concerne les victimes (données assez faibles en nombre).

Ceci apparaît contradictoire avec le guide technique STRMTG/CERTU « Giratoires et tramways – Franchissement d'un carrefour giratoire par une ligne de tramways » qui recommande de ne pas implanter de SLT en entrée de giratoire afin de ne pas nuire à la lisibilité de l'aménagement. Il conviendra donc de suivre ce point avec les données futures.

4.6.3. Positionnement de la SLT et taille des giratoires

L'influence de la SLT en fonction de la taille des giratoires a été analysée.

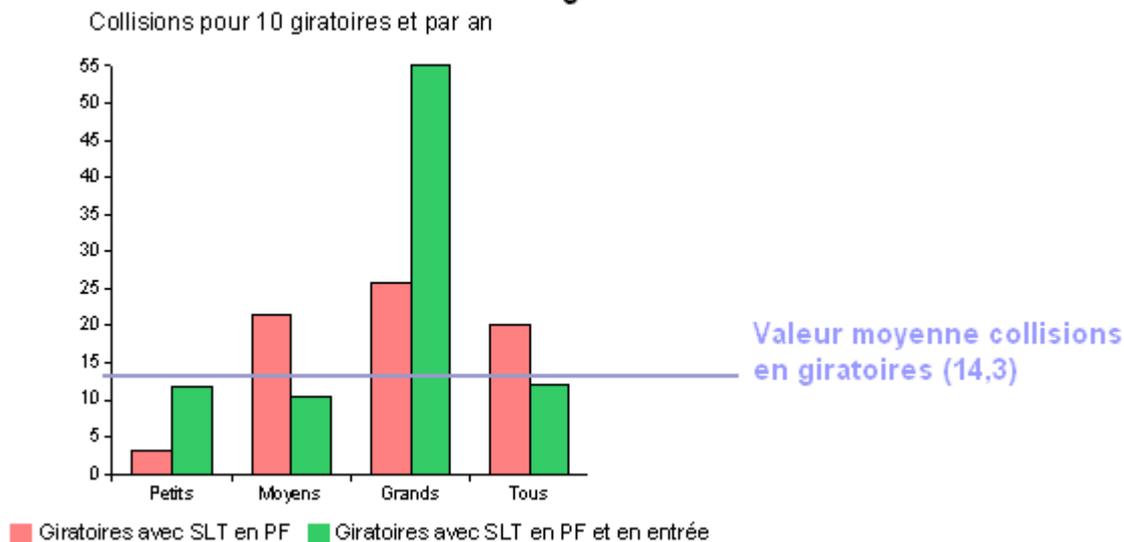
Seules les catégories « giratoires avec SLT en plate-forme » et « giratoires avec SLT en plate-forme et en entrée » ont été étudiées. **La catégorie « giratoires avec SLT en entrée » a trop peu de données pour être exploitée.**

La répartition est la suivante:

	Petits (nombre en 2006)	Moyens (nombre en 2006)	Grands (nombre en 2006)
Avec SLT en plate-forme	5	18	13
Avec SLT en plate-forme et en entrée	2	32	2

En prenant en compte l'indicateur collision pour 10 giratoires et par an (l'indicateur relatif aux victimes n'est ici pas pertinent), on obtient le graphe suivant:

Influence de la SLT en fonction de la taille du giratoire



Les données vraiment exploitables sont celles relatives aux giratoires moyens pour **lesquels on retrouve l'effet positif en terme de nombre de collision pour 10 intersections et par an d'une ligne de feux en entrée de giratoire. Ce nombre (10,3) se situe nettement en dessous de la moyenne globale pour l'ensemble des giratoires (14,3).**

4.6.4. Le type de signalisation lumineuse

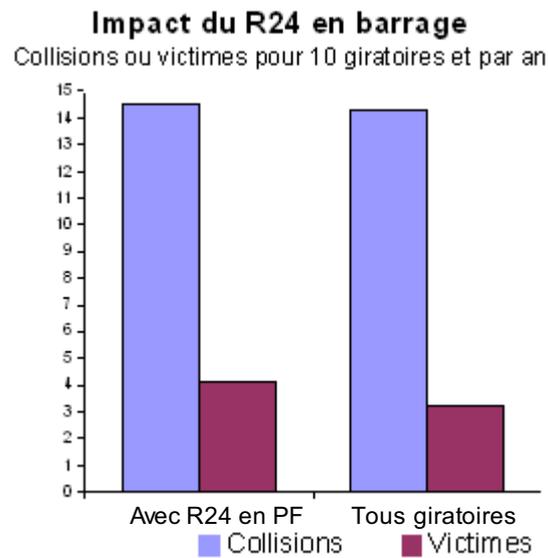
Vu les configurations existantes très variées ayant pour conséquence d'avoir des panels très petits, une analyse comparée de l'ensemble des signaux situés sur les giratoires n'a pu être menée.

Nous avons essayé d'évaluer globalement l'impact du signal R24 (signal majoritairement implanté sur les réseaux) positionné en barrage.

La répartition est la suivante:

	Nombre de giratoires en 2006	Nombre de collisions entre 2004 et 2006	Nombre de victimes entre 2004 et 2006
Avec R24 en plate-forme	58	222	63
Avec R11j en plate-forme	9	32	0
Divers (pour mémoire)	16	82	14

En prenant en compte les indicateurs collisions ou victimes pour 10 giratoires et par an et en analysant uniquement les giratoires avec R24 en plate-forme, on obtient le graphe suivant:



On constate que les nombres de collisions et de victimes pour 10 intersections et par an dans les giratoires avec R24 en barrage (respectivement 14,5 et 4,1) sont globalement très proches des valeurs observées pour l'ensemble des giratoires (respectivement 14,3 et 3,2).

5. Conclusion

Cette étude constitue l'une des premières analyses détaillées concernant l'accidentologie des tramways en giratoire.

Elle s'est attachée à examiner la répartition des collisions avec tiers en fonction des configurations et de la signalisation des giratoires en prenant comme référence le guide CERTU / STRMTG « Giratoires et tramways – Franchissement d'un carrefour giratoire par une ligne de tramway ».

Elle s'est appuyée sur les données figurant dans la base de données « Accidents » du STRMTG et des données fournies par les exploitants concernant les événements survenus entre 2004 et 2006 sur les réseaux suivants :

- Bordeaux (lignes A, B et C)
- Grenoble (lignes A et B)
- Lyon (lignes T1 et T2)
- Montpellier (ligne 1)
- Mulhouse (en service depuis mai 2006)
- Nantes (lignes 1, 2 et 3)
- Orléans (ligne 1)
- Saint Étienne (ligne 4)
- Paris (ligne T1 et T2)
- Valenciennes (ligne 1 en service depuis mai 2006)

Compte-tenu du panel relativement limité d'événements, la significativité statistique des résultats n'a pu être démontrée.

Les conclusions rappelées ci-après ne constituent donc que des tendances qui devront être confirmées ou infirmées à l'avenir.

5.1. Constat général

- Le nombre de collisions de tramways avec tiers en giratoire est environ 2 fois supérieur à celui observé pour l'ensemble des intersections.
- Le nombre de victimes lors de collisions de tramways avec tiers en giratoire est environ 2 fois supérieur à celui observé pour l'ensemble des intersections.

5.2. L'influence de la taille du giratoire

- Les grands giratoires ont un taux de collisions deux fois plus important que la valeur moyenne de l'ensemble des giratoires.
Ceci tend à confirmer le ressenti collectif que les giratoires de grande taille sont particulièrement accidentogènes du fait notamment des vitesses qui peuvent y être pratiquées.
- Les giratoires moyens ont des taux de collisions et de victimes voisins de ceux observés pour l'ensemble des giratoires.
- Les petits giratoires semblent avoir une accidentologie plus faible que les autres catégories de giratoires.

5.3. L'influence du nombre de voie de circulation en entrée de giratoire

- La limitation du nombre de voies de circulation routière en entrée de giratoire constitue un facteur de réduction de l'accidentologie des tramways en giratoire.
- **Les taux de collisions et de victimes dans les giratoires avec une seule voie de circulation en entrée sont très largement inférieures à ceux constatés pour l'ensemble des giratoires.**
- **Le taux de collisions dans les giratoires moyens avec une seule voie de circulation en entrée se rapproche de la valeur constatée pour l'ensemble des intersections.**

5.4. L'influence de la signalisation lumineuse de trafic (SLT)

- La présence d'une ligne de feux en entrée de giratoire semble avoir des effets positifs sur l'accidentologie des tramways, au moins au niveau du nombre de collisions.

Ce constat apparaît contradictoire avec les dispositions du guide technique STRMTG/CERTU « Giratoires et tramways – Franchissement d'un carrefour giratoire par une ligne de tramways » qui recommande de ne pas implanter de SLT en entrée de giratoire afin de ne pas nuire à la lisibilité de l'aménagement.

- Les nombres de collisions et de victimes dans les giratoires équipés de R24 en barrage sont sensiblement identiques aux valeurs observées pour l'ensemble des giratoires.

Ressources, territoires et habitats
Énergie et climat Développement durable
Prévention des risques Infrastructures, transports et mer

**Présent
pour
l'avenir**

BEA-TT - Bureau d'enquêtes sur les Accidents de transport terrestre

Tour Pascal B - 92055 LA DEFENSE CEDEX
Tél. + 33 (0) 1 40 81 21 83 - Fax. + 33 (0) 1 40 81 21 50
cgpc.beatt@developpement-durable.gouv.fr
www.bea-tt.equipement.gouv.fr