
Amélioration de la sûreté de fonctionnement du ferroutage par le concept du wagon intelligent

Joffrey Clarhaut *, **Saïd Hayat ***, **Blaise Conrard ****, **Vincent Cocquempot ****

** INRETS – Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité
20, Rue Élisée Reclus-BP 317 59666 Villeneuve d'Ascq Cedex*

*** LAGIS – Université Lille 1
Equipe Sûreté de Fonctionnement des Systèmes Dynamiques
Polytech-Lille, Bâtiment D- 59650 Villeneuve d'Ascq Cedex*

*joffrey.clarhaut@inrets.fr ; said.hayat@inrets.fr ; blaise.conrard@polytech-lille.fr ;
vincent.cocquempot@univ-lille1.fr*

Sections de rattachement : 61
Secteur : Tertiaire

RÉSUMÉ. Cet article présente le concept du wagon intelligent de ferroutage, calqué sur celui des composants intelligent, et qui permet de répondre aux besoins de sûreté de fonctionnement du système complexe de ferroutage. En effet, l'ajout de fonctionnalités au wagon permet de réduire les risques d'accidents liés au système de ferroutage induits par le transport des camions sur le wagon. Le système de protection contre les incendies qui pourrait être implanté sur le wagon est également présenté dans cet article et illustre l'intérêt de ce concept par rapport à un accident de ferroutage des années 90.

MOTS-CLÉS : Composant intelligent, Sûreté de fonctionnement, Wagon de ferroutage, Système embarqué de protection contre l'incendie.

1. Introduction

La sécurité des systèmes de transport guidé est assurée par l'utilisation de divers systèmes qui sont considérés comme garants du niveau de sécurité du système global. La conception de ces systèmes de sécurité fait l'objet de nombreuses normes qui prescrivent précisément les conditions de conception et de test afin d'attester de leur caractère sécuritaire et du niveau de sécurité obtenu (Schabe, 2002). Cependant, dans le cadre du système de ferroutage, l'absence de normes spécifiques, tenant compte des particularités de ce système, ne permet pas de déterminer les conditions de conception et

de test de ces systèmes sécuritaires. Cela est dû au caractère innovant du système de ferroutage. Ce caractère relativement innovant, l'intensification prévue du ferroutage afin de réduire la congestion routière et les accidents impliquant ces systèmes de ferroutage démontrent qu'il existe un besoin d'ajouter des systèmes de sécurité au système actuel. Prévu dans le but de réduire les risques d'accident du système de ferroutage, l'ajout de systèmes de sécurité au système de ferroutage est de ce fait de plus en plus nécessaire.

La première partie de cet article présente le principe de fonctionnement du ferroutage et son développement actuel. La seconde partie de cet article identifie les différents risques liés au système de ferroutage, c'est-à-dire les différents types d'accidents pouvant intervenir. La troisième partie de cet article propose le concept du wagon intelligent, extension de la notion de composant intelligent, doté de systèmes de sécurité, lui permettant de participer plus activement à la sûreté de fonctionnement du système global de ferroutage. La présentation d'un accident de ferroutage des années 90 illustre l'intérêt de ce nouveau concept et les moyens de réduction des risques d'accidents. Enfin, à titre d'illustration, la présentation d'un système de protection qui pourrait être implanté sur le wagon est effectuée. Ce système a été conçu dans le cadre de la thèse de (Clarhaut, 2009).

2. Présentation du ferroutage

2.1. Principe de fonctionnement

Le ferroutage est un terme générique du fret ferroviaire, désignant l'ensemble des techniques qui permettent de charger des camions complets sur un train : tracteur routier plus remorque plus chauffeur. De nombreuses solutions techniques sont proposées : Modalhor et Eurotunnel Fret (France), RoadRailer (USA), Iron Highway (Canada), Route Roulante (Suisse), Projet Sail (Allemagne) ... Plus précisément, le ferroutage est fondé sur une Unité de Transport Intermodal (UTI), dans laquelle la marchandise est transportée de bout en bout par le mode de transport le plus approprié :

- Le mode de transport routier seulement utilisé en desserte d'extrémité (trajet initial et terminal), avec un parcours le plus court possible.
- Le mode de transport ferré pour le parcours principal.

Ce type de transport présente de nombreux avantages comme la réduction de la congestion routière en délestant le réseau routier d'une partie du trafic de camions, la baisse de la pollution et la baisse de la consommation en carburants.

2.2. Un système en plein développement en France

Malgré ses atouts, le taux de pénétration du ferroutage reste faible (la part modale en tonnes-kilomètres comparativement à la route est de l'ordre de 7% en 2005). Afin de

concurrencer le transport routier en termes de compétitivité, ce système doit se développer. Pour cela, de nombreux projets dits "d'Autoroute Ferroviaire" (terme désignant les projets Français de lignes ferroviaires par ferroutage comme le projet Atlantique et Magistrale Eco-Fret présenté sur la figure 1) sont en cours de réalisation et impliqueront une augmentation importante du trafic par ferroutage.

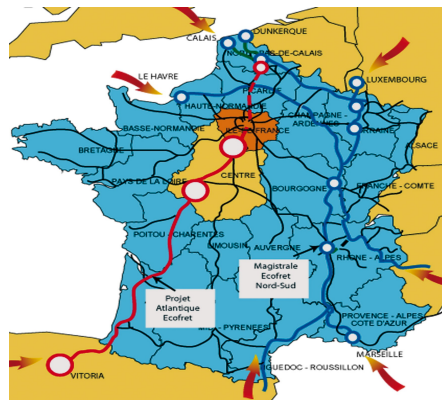


Figure 1 . Lignes de ferroutage du projet « Eco-Fret »

Les systèmes de ferroutage utilisés actuellement nécessiteront d'avoir une disponibilité et un niveau de sécurité élevés afin de pouvoir répondre à cette augmentation de trafic tout en conciliant les besoins liés à la sécurité ferroviaire. Nous allons préciser, dans la seconde partie, les risques liés au système de ferroutage. Cette présentation des risques et des besoins en découlant permettra d'introduire le concept du wagon intelligent répondant à ces besoins.

3. Les risques liés au système de ferroutage

3.1. Les risques généraux des systèmes ferroviaires

Une classification des risques généraux existant dans les systèmes ferroviaires a été proposée par (Hadj-Mabrouk et al., 1998). Cette classification distingue quatre catégories d'accidents :

- Les *accidents utilisateur* sont associés aux dommages causés à un ou plusieurs utilisateurs (usagers et/ou opérateurs) du système alors qu'aucun problème de fonctionnement du système ne soit survenu, et qu'aucune action de cet ou ces utilisateurs n'ait été constatée.
- Les *accidents système* sont associés aux dommages causés au système et aux utilisateurs lors d'un accident initié par le système lui-même (incendie, déraillement ...).
- Les *accidents utilisateur/système* sont associés aux dommages causés à un ou plusieurs utilisateurs du système, lors d'une action effectuée par ce ou ces utilisateurs durant le fonctionnement normal du système.

- Les *accidents environnement/système* sont associés aux dommages causés au système et aux utilisateurs lors de conditions environnementales particulières (catastrophes naturelles ...).

Les risques généraux dépendent également du type de transport guidé considéré (transport de voyageurs ou de marchandises). Pour le transport de marchandises et pour le ferroutage, ce sont principalement des risques matériels qui engendrent des risques humains (par exemple dans le cas d'un déraillement d'un transport de marchandises dangereuses pouvant affecter la population proche du lieu de l'accident).

3.2. Les risques spécifiques liés au ferroutage

Comme nous venons de le voir, les risques liés au ferroutage sont principalement des risques liés au matériel roulant. (Beugin, 2006) spécifie que ces risques sont relatifs à :

- l'état du matériel roulant. Ces risques concernent les défaillances et détériorations du matériel survenant en exploitation selon le vieillissement des équipements (défaillance du système de freinage, d'un chevalet d'arrimage ...) et, selon le vieillissement et la robustesse des structures mécaniques (rupture d'essieu ...).

- certains problèmes dans la conception des composants et des équipements, des sous-systèmes ..., susceptibles d'être à l'origine de défaillances peuvent entraîner la défaillance du système de sécurité embarqué et générer des risques supplémentaires pour le système de transport.

Dans le cadre du ferroutage, à ces risques matériels liés au matériel roulant s'ajoute une classe de risques liée au matériel transporté. En effet le camion, non conçu initialement pour être transporté par un train, possède des caractéristiques physiques propres (Pneus, réservoir, moteur, amortisseurs, produit transporté entre autres) très différents d'une charge classique (un conteneur). Ainsi, le camion peut être mal fixé au wagon, son produit transporté peut avoir été mal réparti (entraînant des vibrations du camion), s'échapper de son conteneur (fuite), le tracteur routier peut présenter des fuites au niveau de son réservoir de carburant, du moteur (fuite d'huile), de ses pneus (dégonflement), avoir un problème sur son système de freinage ou sur ses amortisseurs. Tous ces risques liés au matériel transporté peuvent entraîner un incendie ou un désarrimage du camion et/ou de sa remorque. Ces particularités entraînent des besoins en systèmes de sécurité supplémentaires pour le système de ferroutage permettant de détecter ces événements redoutés (déraillement, collision, incendie, désarrimage). A ces besoins sécuritaires s'ajoutent les besoins en terme de disponibilité afin de rendre attractif le ferroutage.

3.3. Les besoins

Les besoins en terme de disponibilité que le ferroutage doit rendre sont nombreux s'il veut être envisagé comme un mode de transport complémentaire à la route. Ces besoins sont principalement liés à sa complexité du système de ferroutage. En effet, le

système de ferroutage faisant partie des systèmes de transport ferroviaire s'appréhende comme un système complexe et cela pour plusieurs raisons (Clarhaut et al., 2006) :

- Par l'hétérogénéité des différents acteurs en présence. Nous avons en interaction des véhicules routiers, des trains et une infrastructure ferroviaire.
- Par l'hétérogénéité des matières transportées principalement liée à ses caractéristiques physiques (matières dangereuses ou périssables, variation du poids entre deux véhicules).
- Par l'existence de plusieurs phases de fonctionnement (chargement, convoi).
- Par la variabilité dynamique de son environnement (traversée de tunnels, de ponts et de villes).

Ces raisons impliquent les besoins sécuritaires suivants :

- Pour le système de ferroutage : garantir la sécurité, la disponibilité et fiabilité du train et du wagon.
- Pour le chargement : surveiller les risques potentiels liés à la charge et au wagon lors des opérations de chargement et de transport (équilibre de la charge, fixation de la remorque, fuite de carburant, incendie, sur-échauffement des freins), protéger la marchandise transportée et le tracteur routier.
- Pour l'environnement immédiat : réduire les conséquences d'accidents de ferroutage sur les infrastructures environnantes.

L'existence de ces besoins spécifiques impose la définition et la conception d'un système d'automatisation sûr adapté au ferroutage. Ce système d'automatisation sûr est défini par le concept du wagon intelligent de ferroutage.

4. Le concept du wagon intelligent de ferroutage

Le système de ferroutage actuel comprend plusieurs acteurs multi-fonctionnels (véhicules routiers, wagons et infrastructure). Dans les systèmes actuels de ferroutage, le wagon joue un rôle passif du point de vue de la sûreté de fonctionnement. En effet, ce wagon ne possède ni énergie embarquée, ni capteurs, ni actionneurs permettant d'analyser et de déterminer un éventuel risque lié à ce système. Les constructeurs ferroviaires justifient l'absence d'équipements afin de limiter au maximum la tare du wagon (poids à vide) et augmenter le ratio de productivité pour les transporteurs routiers. L'ajout d'intelligence au wagon à l'aide de fonctions supplémentaires embarquées permettrait de contribuer activement à l'amélioration du niveau de sûreté de fonctionnement global de l'ensemble du système de ferroutage dans toutes ses phases de fonctionnement mais en diminuant obligatoirement le ratio de productivité.

En effet, le wagon est le seul acteur du système de ferroutage présent dans toutes les phases de fonctionnement du système complexe. Par ailleurs, le wagon permet de faire le lien entre les deux autres acteurs du système c'est-à-dire avec les véhicules routiers et avec l'infrastructure ferroviaire. Afin d'étayer ces propos, nous allons présenter l'intérêt du concept du wagon intelligent en analysant un accident de ferroutage.

4.1. *L'accident de la navette Eurotunnel 7539 (France-Angleterre)*

Le 18 novembre 1996, le train navette poids-lourds 7539 à destination de la Grande Bretagne s'est immobilisé dans le tunnel avec un incendie à bord. Celui-ci dégagait d'importantes fumées qui ont rapidement enveloppé la voiture salon et la locomotive de tête compliquant l'évacuation. L'incendie a été maîtrisé avec difficultés du fait de l'environnement confiné dans le tunnel (Eurotunnel, 1997). Le tunnel et le train ont subi des dégâts considérables et il a fallu reconstruire l'ensemble des infrastructures sur plus de 1 km. L'exploitation de ce tronçon a été suspendue pendant 2 mois. Aucune marchandise dangereuse n'a été mise en cause et personne n'a été tué, 34 personnes ont été plus ou moins intoxiquées par les fumées. L'origine exacte de l'incendie n'a pas pu être déterminée. Cependant, le feu se serait déclenché avant l'entrée du train dans le tunnel mais n'a pas pu être détecté avant son entrée effective dans le tunnel.

L'intérêt du concept du wagon intelligent s'expose aisément avec cet accident. L'ajout de fonctions, telles que la détection de température dans le wagon, sur ses organes principaux (Boîte d'essieu, roues de boggie, freins, ...) mais également sur la marchandise transportée ainsi que la surveillance d'autres paramètres importants comme la fuite de liquide provenant de la charge auraient permis de faire de la maintenance préventive sur le wagon, de refuser éventuellement le chargement du camion et lors de l'exploitation en convoi de détecter avant l'entrée dans le tunnel le risque d'incendie et/ou l'incendie en lui-même.

4.2. *La réduction des risques par le wagon intelligent*

Les accidents par ferroulage sont heureusement rares, cependant, du fait des matières transportées et de l'environnement traversé (tunnels, villes ...), une défaillance peut entraîner d'importantes conséquences sur le système ferroviaire et sur son environnement. C'est pourquoi le système de ferroulage doit intégrer de nouvelles fonctions permettant de répondre aux exigences de sécurité, de fiabilité et de disponibilité. L'ajout de telles fonctions implique la définition d'un système dit « intelligent » sûr de fonctionnement pour le wagon de ferroulage et implique l'introduction des équipements suivants sur le wagon :

- Des fonctions logicielles permettant de remplir des missions de surveillance, commande, communication, ... (Attouche et al., 2001).
- Une instrumentation adaptée composée de capteurs matériels et d'instruments intelligents afin de récupérer les variables physiques nécessaires aux fonctions logicielles précédentes (Staroswieki et al., 1996).
- Des redondances matérielles et logicielles afin de rendre le système tolérant aux défaillances (Conrard et al., 2006).

Ces équipements supplémentaires vont constituer le système d'automatisation du wagon de ferroulage et doivent pouvoir répondre aux besoins de sûreté de fonctionnement du système de ferroulage.

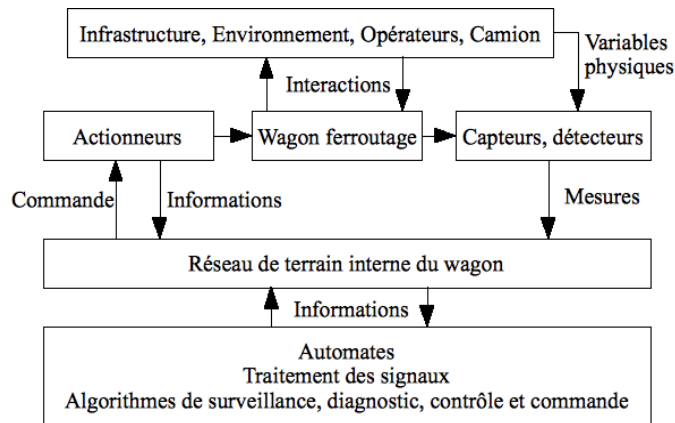
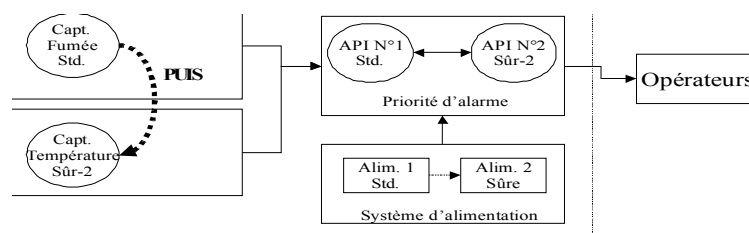


Figure 2 . Modèle du wagon intelligent

D'après la figure 2 qui présente le modèle du wagon intelligent, celui-ci est équipé d'unités de traitement (automates, régulateurs, calculateurs) accomplissant des traitements logiciels afin d'effectuer ses missions (surveillance, diagnostic ...). Le wagon intelligent est également équipé d'un réseau de terrain reliant les unités de traitement aux capteurs et aux actionneurs placés sur sa structure. Ce réseau permet de transmettre des commandes à destination des actionneurs et de récupérer les informations issues des actionneurs (accomplissement d'une commande) ainsi que les mesures générées par les capteurs. Ces mesures sont obtenues à partir de variables physiques issues de l'environnement proche du wagon (infrastructure, opérateurs, camions).

4.3. Exemple de sous-système du wagon intelligent

Figure 3 . Architecture matérielle du système de protection contre l'incendie



Dans le cas du ferroutage, les risques liés au matériel transporté augmentent les probabilités de déclenchement d'un incendie par rapport à un système conventionnel, l'accident de l'Eurotunnel de 1996 en est un exemple concret, il est donc impératif de détecter au plus tôt les incendies. La figure 3 présente une architecture matérielle obtenue pour le système de protection contre l'incendie comprenant des détecteurs de fumée et de température ainsi que des automates (API) et des alimentations embarquées.

5. Conclusion

– Dans cet article, nous avons présenté les concepts généraux du ferroutage ainsi que le concept du wagon intelligent permettant d'améliorer la sûreté de fonctionnement globale du ferroutage. La première partie a présenté le ferroutage ainsi que les besoins particuliers pour le développement de ce système. La seconde partie a mis en évidence les différents risques existant dans les systèmes de transport guidés ainsi que les risques particuliers liés au ferroutage. Les besoins en systèmes de sécurité pour le système de ferroutage découlant de ces risques ont ensuite été présentés. Enfin, la troisième partie a présenté le concept du wagon intelligent permettant de réduire l'ensemble des risques liés à la fois au matériel de transport ainsi que ceux liés au matériel transporté. Les accidents de ferroutage montrent que le niveau de sécurité du système actuel est insuffisant pour répondre à l'intensification future du trafic. Au sein du wagon intelligent, le système de protection incendie a été plus particulièrement détaillé. C'est l'un des systèmes qui montrent l'intérêt du concept du wagon intelligent par rapport à l'accident ferroviaire de 1996 et qui a été présenté dans (Clarhaut et al., 2008).

Bibliographie

Attouche S., Hayat S., Staroswiecki M., « An efficient algorithm for the design of fault tolerant multi-sensors systems », Proceedings of the 40th IEEE Conference on Decision and Control (CDC01), 2001.

Beugin J., Contribution à l'évaluation de la sécurité des systèmes complexes de transport guidé, Thèse de doctorat, 20 décembre 2006, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis.

Clarhaut J., Prise en compte des séquences de défaillances pour la conception de systèmes d'automatisation, Application au ferroutage, Thèse de doctorat, 23 mars 2009, Université de Lille.

Clarhaut J., Hayat S., Conrard B., Cocquempot, V., « Safety intelligent system conception for piggyback service », IEEE ICIT International Conference on Industrial Technology, Vol. N°6, 2006, p. 1659-1664.

Clarhaut J., Hayat S., Conrard B., Cocquempot, V., « Méthodologie de conception de systèmes sûrs et économiques utilisant les scénarios de défaillances », Actes du 16^{ème} Congrès de Maîtrise des Risques et de Sûreté de fonctionnement (LambdaMu 16), Avignon, N°8-B3, 2008, p. 1-8.

Conrard B., Bayart M. « Design of dependable control system thanks to a semi-quantitative optimisation » Proceedings of Safety and Reliability for Managing Risk, Estoril, 18-22 septembre, 2006, p. 1583-1589.

Eurotunnel, Inquiry into the fire on Heavy Goods Vehicle shuttle 7539 on 18 November 1996, Eurotunnel, The Stationery Office, ISBN 0-11-551931-9, 1997.

Hadj-Mabrouk H., Stuparu A., Bied-Charreton D., « Exemple de typologie d'accidents dans le domaine des transports guidés », Revue générale des chemins de fer, mars 1998, p. 17-55.

Schabe H., « The safety philosophy behind the cenelec railway standards », Actes ESREL 2002 European safety and reliability conference, Lyon, 2002.

Staroswiecki M., Bayart M., « Models and languages for the interoperability of smart instruments », Automatica, N°32-6, 1996, p. 859-873.