

Interface Train/ Infrastructure ferroviaire: influence de l'interface multi-contact et aptitude au shuntage du matériel roulant

A. Rabdane^{1,2,3}, R. Bouzerar², V. Bourny^{3,5}, J. Fortin^{3,5}, N. Foy⁴, A. Sakli^{2,4},
C. Rabette^{2,3}

1 : Institut de Recherche Technologique Railenium, 59308, Valenciennes, France

2 : Laboratoire de Physique de la Matière Condensée, Université de Picardie Jules Vernes, 33
Rue St Leu, 80000 Amiens

3 : Laboratoire des Technologies Innovantes, Université de Picardie Jules Vernes, IUT
d'Amiens Avenue des Facultés Le Bailly 80025 Amiens

4 : Laboratoire Physique des Systèmes Complexes Université de Picardie Jules Vernes, 33
Rue St Leu, 80000 Amiens

5 : École supérieure d'ingénieurs en électronique et électrotechnique, 14 Quai de la Somme,
80080 Amiens

...

Résumé :

La plupart des fonctions de signalisation nécessitent de connaître l'état d'occupation de portions de voie appelé « zones ». La détection d'une circulation sur une zone peut s'effectuer au moyen d'un « circuit de voie » équipant cette zone.

Le circuit de voie est constitué d'un émetteur et d'un récepteur et d'une ligne de transmission formée par les rails. En l'absence de circulation sur la zone, le récepteur reçoit toute l'énergie de l'émetteur. En présence d'une circulation, les essieux du train « shuntent » le signal émis par l'émetteur induisant une très faible énergie reçue au niveau du récepteur. On dit qu'il y a « shuntage » du circuit de voie par la circulation et donc présence de la circulation sur la zone.

La qualité du « shuntage » est donc primordiale dans la détection d'une circulation. Elle dépend de la bonne qualité du contact électrique « rail/roue ».

L'évènement redouté que constitue le « déshuntage » conduit à signifier au système que la zone est libre de toute circulation alors qu'une circulation est présente sur la zone.

Le shuntage est une problématique système qui met en jeu les caractéristiques de l'infrastructure, des caractéristiques intrinsèques des circulations, de l'environnement et des conditions d'exploitations.

Un problème demeure : le cadre physique du couplage électromécanique est mal établi. Les études s'intéressent à différents aspects du shuntage isolément du cadre du shuntage, il manque une étude qui permet d'unifier les contributions mécaniques et physiques : c'est le cadre mécanique du train circulant sur la voie qui conditionne le bon shuntage au travers du contact roue/rail. Il semble donc évident de devoir prendre en compte les caractéristiques physiques du train, du circuit de voie, et de l'exploitation, et les interactions entre celles-ci.

Nous proposons une refondation des systèmes d'évaluation par « scores » utilisés par les belges et les néerlandais avec la possibilité de prendre en compte les paramètres aléatoires et imprédictibles

intervenant dans le shuntage. Pour pouvoir faire cela, une étude statistique a été lancée sur des données de la SNCF.

In fine, un système est proposé permettant l'admission d'un train sur les voies en le faisant correspondre à un point dans un espace abstrait dont les dimensions sont constituées de ses caractéristiques : l'admissibilité correspondra à la position de ce point dans cet espace abstrait par rapport à une norme fixée par les exploitants du réseau.

1 Introduction

La plupart des fonctions de signalisation nécessitent de connaître l'état d'occupation de portions de voie appelé « zones ». La détection d'une circulation sur une zone peut s'effectuer au moyen d'un « circuit de voie » équipant cette zone.

Le circuit de voie est constitué d'un émetteur et d'un récepteur et d'une ligne de transmission formée par les rails. En l'absence de circulation sur la zone, le récepteur reçoit toute l'énergie de l'émetteur. En présence d'une circulation, les essieux du train « shuntent » le signal émis par l'émetteur induisant une très faible énergie reçue au niveau du récepteur. On dit qu'il y a « shuntage » du circuit de voie par la circulation et donc présence de la circulation sur la zone.

La qualité du « shuntage » est donc primordiale dans la détection d'une circulation. Elle dépend de la bonne qualité du contact électrique « rail/roue ».

L'évènement redouté que constitue le « déshuntage » conduit à signifier au système que la zone est libre de toute circulation alors qu'une circulation est présente sur la zone.

Première difficulté de cette approche : le cadre physique n'est pas compris. Plusieurs travaux scientifiques existent sur les différents aspects mécaniques permettant d'assurer un bon shuntage, mais aucun n'arrive à y inclure une approche multi-physique qui permet de corréler les aspects mécaniques et physiques en amont qui permettent d'assurer un court-circuit efficace du circuit de voie. Le cadre physique du shuntage est l'interface multi-contact. C'est une physique qui présente un couplage mécanique, thermique et électrique complexe, avec une difficulté supplémentaire apportée par le cadre dynamique de cette interface dans le cadre du shuntage, permettant de rendre compte de certaines observations sur la mesure de la caractéristique courant tension de cette interface.

Deuxième difficulté de cette approche : Une linéarité est présumée dans l'intervention des différents aspects du shuntage entre train, circuit de voie et exploitation, c'est-à-dire qu'il est admis que ces trois aspects sont séparables dans leur étude, et la réponse vis-à-vis de la shuntabilité d'un train est considérée comme binaire : soit le train est bon shunteur, soit il est mauvais shunteur. Ceci est bien entendu une approche simpliste de la réalité qui peut correspondre à une première approximation juste, mais qui démontre rapidement ses limites. A la place, nous proposons une méthode qui permet de déduire la probabilité de shuntage d'un train en fonction des circuits de voie qu'il sera amené à rencontrer pendant son exploitation, chacun de ces aspects étant pleinement intégrés avec la dimension du couplage électromécanique, et avec la possibilité de quantifier la shuntabilité en fonction de différentes situations.

2 Approche multi-physique

2.1 Insuffisances dans les approches actuelles du shuntage

Le shuntage, comme beaucoup de problèmes de couplages, disposent de nombreuses études très pointues sur des aspects bien spécifiques de la problématique, mais qui s'effondrent dès qu'on tente de les faire entrer dans le cadre global de cette problématique à cause de l'absence de prise en compte du couplage de ces phénomènes. Des études ont été menées sur le contact métal/métal statique et dynamique par Ifsttar^[1] (Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement

et des réseaux, établissement public à caractère scientifique et technologique), sur le 3^{ème} corps par la SNCF^[2], diverses universités en collaboration avec les partenaires du secteur ferroviaire, mais il n'existe aucun outil permettant d'unifier ces diverses approches dans le phénomène du shuntage.

C'est le cas des méthodes d'évaluation à points actuellement en cours aux Pays Bas et en Belgique : Méthode à points sur le traitement statistique d'un grand volume de données mesurées. Aux Pays-Bas, une étude a été effectuée sur 800000 mesures avec la prise en compte des caractéristiques des trains correspondant à ces mesures^[3]. Mais cette méthode ne repose pas sur étude physique analysant le contact roue/rail dans le cadre global de l'exploitation. Méthode belge ne s'applique qu'à certains cas : l'autorisation de circulation de manière isolée d'une locomotive sur une ligne grande vitesse, et l'autorisation de circulation de matériel roulant équipé de freins en matériau composite fritté, et est donc par définition très excluant vis-à-vis des trains qui peuvent correspondre à ces critères^[4].

Ces approches sont empiriques et supposent une décorrélation des paramètres physiques influençant le shuntage dans leurs systèmes de scores : une simple addition de points multipliés a des coefficients est établie. Bien qu'il s'agisse de premières approximations satisfaisantes, elles ne sont en aucun cas suffisante : en effet, une étude menée conjointement entre l'UPJV et EPSF^[5] a démontré que l'approche néerlandaise n'est pas généralisable au réseau français.

2.2 Shuntage : le cadre mécanique conditionne le bon shuntage

Lorsque le train passe sur la voie, l'effet souhaité est qu'un court-circuit se produise, empêchant l'arrivée du courant de l'émetteur vers le récepteur. Pour cela, il faut un bon contact roue-rail. Ce contact correspond au cadre physique de l'interface multi-contact métal/métal, avec un aspect dynamique.

On doit alors prendre en compte l'état de surface pour établir la résistance de l'interface, un travail de recherche a précisé ce cadre fournissant une correction à la théorie de la résistance de constriction de Holm^[6]. Le contact métal/métal, du fait de la rugosité des surfaces, est constituée de plusieurs contacts distants en moyenne d'une centaine de micromètres les uns des autres. Chaque contact peut être idéalisé par une interface circulaire d'un diamètre de l'ordre de quelques micromètres. La théorie de holm prévoir un calcul impliquant une approximation couteuse : en effet, elle induit que le flux électrique ne traverse jamais l'interface. Ce travail de recherche propose d'effectuer l'étude en considérant que le flux électrique traverse effectivement l'interface, et parvient à retrouver la résistance de constriction.

A terme, l'étude permet de retrouver le comportement électrique des interfaces multi-contacts en fonction d'une force de compression appliquée entre deux métaux. Une modélisation de surfaces réelles déterminées par profilométrie permet de déduire la résistance de contact réelle avec le bons ordres de grandeur^[7]

Aussi, une étude sur le contact métal/métal propose d'approcher le problème à l'aide de la thermodynamique par le concept d'entropie de contact^[8].

3 Méthode dite de score

3.1 Approche statistique causale

L'approche statistique amenant à établir la méthode néerlandaise permet de substituer à notre méconnaissance de la complexité des processus en jeu et des causes possibles du déshuntage une approche « non causale » de ces phénomènes basé sur des critères probabilistes. Il faut affiner les critères d'évaluation de l'aptitude des trains au shuntage à la lumière des phénomènes physiques qui les encadrent, et donc adopter une approche « causale » du problème du déshuntage.

Comme bon nombre d'approches statistiques, l'approche du problème du déshuntage initiée par PRORAIL^[9] (organisme public néerlandais chargé de la gestion de l'infrastructure ferroviaire

nationale) permet de substituer à notre méconnaissance de la complexité des processus en jeu et des causes possibles du déshuntage, une approche ‘non causale’ basée sur un ensemble de critères ou d’indicateurs probabilistes. Par essence même, cette approche présuppose que les situations étudiées relèvent de la notion mathématique de risque et non de l’incertitude, renvoyant à des événements singuliers (i.e. rares) et donc non probabilisables.

L’analyse critique des approches non causales du risque dans le domaine ferroviaire suggère en effet un programme de recherche pouvant permettre à terme de les affiner en sélectionnant les critères adéquats et de les compléter à l’aide d’une approche ‘causale’ reposant sur la physique du contact roue/rail et ses défauts. Il s’agit d’une interface mécanique complexe, sensible à certaines altérations de l’infrastructure ou de la machine, perméable aux courants électriques (et aux flux thermiques) mais leur opposant une résistance spécifique qui dépend des conditions de sollicitation mécanique (et donc du poids de l’essieu, de la machine), de l’état physico-chimique de la surface de la voie, de la vitesse et de l’organisation des spots mécaniques mésoscopiques constituant le contact.

3.2 Interprétation géométrique et utilité de cette méthode

Inspirés par la méthode belge et néerlandaise, nous proposons une refondation de la notion de score permettant de quantifier l’aptitude au shuntage des trains. Cette méthode revient à faire entrer les caractéristiques physiques mesurables d’un train, d’un circuit de voie, et d’une exploitation dans une fonction, ainsi que l’analyse statistique de la tension résiduelle des circuits de voie sur lesquels ces trains circulent pour établir une probabilité de shuntage.

La fonction en cours de conception qui vise à refonder le score scalaire permettra de corrélérer ces éléments à la physique du shuntage pour quantifier son aptitude au shuntage sur une base scientifique établie. L’analyse statistique servira à prendre en compte les paramètres aléatoires qui ne sont pas maîtrisables, comme par exemple, la pollution intempestive qu’une voie par la chute des feuilles en automne.

On peut alors voir cela comme un cadre géométrique dans un espace abstrait dont les dimensions sont formées par ces paramètres physiques mesurables. De l’ensemble train/circuit de voie, avec le cadre mécanique, on peut se ramener à un point dans cet espace abstrait qui correspond à une zone minimum de la probabilité de déshuntage. Le caractère probabiliste de cette méthode d’évaluation de l’aptitude au shuntage permet de prendre en compte des phénomènes inconnus et/ou imprédictibles tels que la météo par exemple.

Pour simplifier la présentation de ce score et mieux cerner les conditions de son élaboration, nous nous appuyerons sur une interprétation géométrique de celui-ci dans le cas où les trains ne sont définis que par deux caractéristiques quantitatives notés C1 et C2 (nombre d’essieux et masse par exemple).

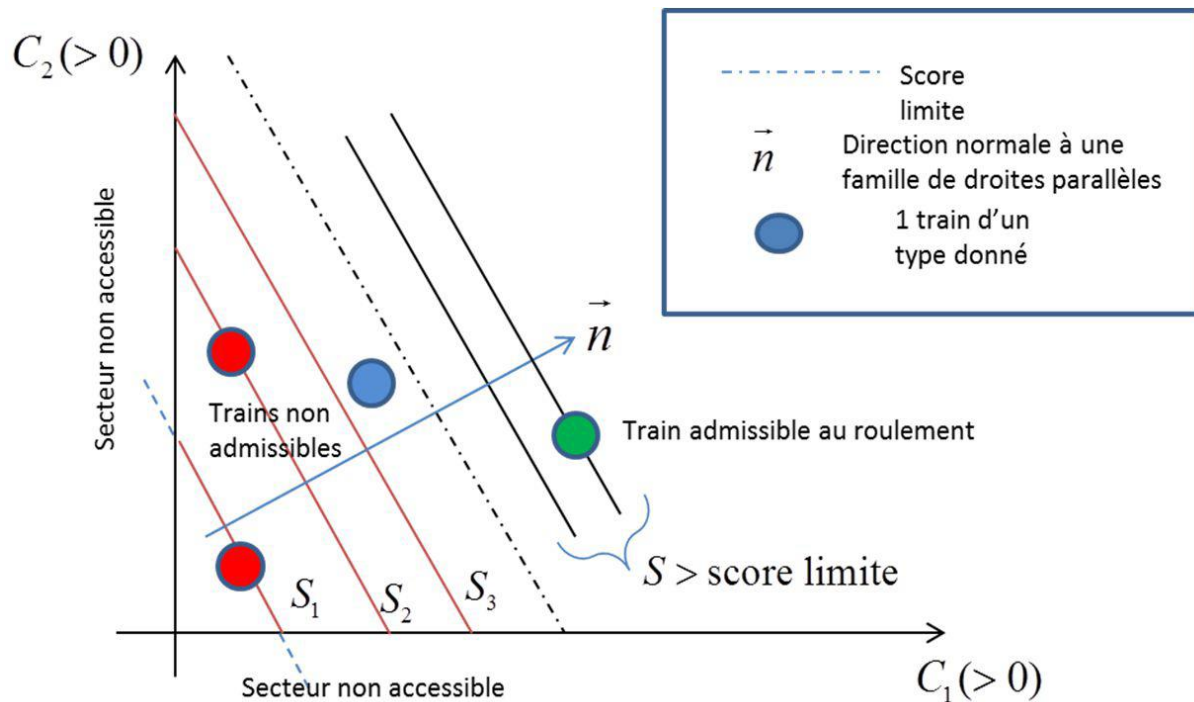


Fig 1. Schéma simplifié illustrant le contenu géométrique de la notion usuelle de score.

L'ensemble des caractéristiques engendre un espace (ici un plan) limité en général à un secteur 'utile' contraint par la positivité de ces nombres (ou d'autres contraintes) : un point (disques sur la figure) de cet espace ayant pour coordonnées ces caractéristiques représente alors un type de matériel roulant. Plus le nombre de contraintes imposées aux caractéristiques est grand (relations additionnelles entre les caractéristiques) et plus le domaine accessible sera restreint. Une droite quelconque de ce plan (la portion située dans le quadrant utile) définit un choix arbitraire de score ou, plus précisément, un choix de pondération linéaire des caractéristiques. Des familles de droites parallèles correspondent alors à une même définition du score. Une famille de droites parallèles admet une même direction normale (le vecteur n de la figure) de sorte que l'inclinaison des droites ou de la normale correspondante est liée au choix de la pondération. Les droites d'une famille donnée sont paramétrées par un nombre S dont certaines réalisations S_1 , S_2 , S_3 sont indiquées sur la figure : ce nombre est le score et chaque droite est définie par une valeur particulière du score. De la sorte, tous les points situés sur une même droite sont associés à des trains ayant un même score dans la pondération choisie. Le sens des scores croissants est obtenu en parcourant les droites de la famille de gauche à droite ($S_1 < S_2 < S_3$). Selon notre interprétation géométrique de la notion de score nous pouvons donc retenir les définitions suivantes :

- Un point de l'espace des caractéristiques définit un type de matériel roulant.
- Dans l'espace des caractéristiques (types de trains), une direction n quelconque définit une notion arbitraire de score comme un type de pondération linéaire des caractéristiques.
- A un choix d'une direction n correspond une famille de droites parallèles paramétrées par un nombre croissant, les valeurs possibles du score. Tous les points d'une même droite ont même score.

La méthode du score est une méthode d'évaluation par seuil (tout ou rien) basée sur un critère d'admissibilité au roulement fixé par une valeur seuil du score: Ayant identifié la droite (dans le cas général un hyperplan) définissant le score limite (pointillés de la figure), celle-ci partage le plan des caractéristiques en 2 régions. A gauche de la droite limite figurent les trains non admissibles au roulement au regard de ce critère, à droite ceux qui peuvent être admis au roulement. Dans la situation réelle d'un nombre de caractéristiques plus grand (espace des caractéristiques de dimension supérieure

à 2), il faut remplacer les droites par des hyperplans, du moins dans l'approche géométrique du score la plus simple.

Conclusion

L'analyse critique d'un grand nombre de données dans une étude statistique mise en relation avec une étude physique du contact roue/rail dynamique constitue un programme de recherche qui peut amener à une refondation des méthodes d'évaluation dites « à points ». Un travail unificateur de ces aspects est en cours et s'inspire du potentiel thermodynamique pour établir un potentiel de déshuntage. Ce concept peut permettre de quantifier l'aptitude au shuntage du matériel roulant et de chercher les caractéristiques qu'il est possible d'améliorer par la minimisation du potentiel de déshuntage.

Références

- [1] H. Chollet, F. Houzé, P. Testé, F. Loëte, X. Lorang, S. Debuquoi « Observation of Branly's effect during shunting experiments on scaled wheel-rail contacts » 9th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems, 2012
- [2] S. Descartes, M. Renouf, N. Fillot, B. Gautier, A. Descamps, Y. Berthier, Ph. Demanche « A new mechanical–electrical approach to the wheel-rail contact » *Wear*, 2008
- [3] E. van Wonderen, Gertjan van Rhee, Henk Scholten « Admission of rolling stock on track circuit based train detection systems » *Signal + Draft International*, 2007
- [4] F. Sun, S. Aout, JP De Coninck « Détection de voie libre & enregistrement de passage, Matériel roulant - - CV aptitude au shuntage, Analyse du contexte (justification de la procédure d'évaluation) » Document normatif d'Infrabel, 17/11/2014
- [5] A. Sakli, L. Cebulski, R. Bouzerar, V. Bourny, J. Fortin « Vers la définition d'un modèle français sur l'aptitude au shuntage des matériels roulants » Rapport de stage interne à l'UPJV, 2015
- [6] N. Foy, R. Bouzerar, P. Dassonville, V. Bourny, J. Fortin, A. Rabdane, B. Jonckheere « Theory of metal/metal multi-contact interfaces : implications of the coupling between the electrical and thermal transfer processes » International Conference on Mesoscopic and Condensed Matter Physics, Boston, USA, June 22-24 2015
- [7] N. Foy : Soutenance de thèse prévue en 2017
- [8] E. Chevallier, J. Fortin, O. Durand Drouhin, R. Bouzerar « Définition d'indices de qualité du contact glissant métallique : signatures électriques de l'état de surface » Thèse soutenue le 07/07/2014
- [9] ProRail Guideline RLN00018