

# Évaluation des performances d'un axe ferroviaire en fonction des caractéristiques fiabilistes de ses systèmes de signalisations

BUCHHEIT Grégory  
MALASSE Olaf  
A3SI  
Arts et Métiers ParisTech  
Metz, France

BRINZEI Nicolae  
CRAN  
Nancy Université  
Nancy, France

LALOUETTE Jérôme  
Direction de l'Infrastructure  
SNCF  
Paris, France

WALTER Max  
LRR  
Technische Universität München  
Munich, Allemagne

**Résumé** — L'évaluation des systèmes en termes de performances économiques, par notamment leur disponibilité, dépend des comportements dysfonctionnels et des politiques de maintenance de ses sous-ensembles. En abordant l'étude d'une ligne ferroviaire au travers de ses systèmes de signalisation de nombreux challenges sont à relever. Nos premiers pas dans cette exploration sont ici présentés.

**Mots-clés:** Réseau de Pétri Coloré Temporisé ; évaluation quantitative; maintenance; FMDS;

## I. INTRODUCTION

La libéralisation des échanges, avec pour corolaire la multiplication des opérateurs ferroviaires et la volonté d'amélioration de la performance économique, exigent une rationalisation des infrastructures ferroviaires et des règles d'usages riches de la diversité des compétences et expériences des opérateurs historiques nationaux. En France, la SNCF (Société Nationale des Chemins de Fer Français) a développé et perfectionné un des systèmes de signalisation les plus performants et sûrs, permettant un transit souple grâce aux possibilités d'informations élevées (nombre de types de signaux), en l'occurrence BAL/KVB (Block Automatique Lumineux / Contrôle de Vitesse par Balises) avec circuits de voies sur lignes classiques pour détecter la présence d'un train et les rails brisés, et TVM (Transmission Voie-Machine) sur LGV (Ligne à Grande Vitesse) (« Fig. 1 »).



Figure 1. Signalisation BAL/KVB avec circuit de voie

L'Europe a souhaité définir un nouveau système de signalisation, réputé interopérable (ERTMS - European Rail Traffic Management System), décliné en 3 niveaux d'évolution du contrôle-commande (ETCS - European Train Control System 1 à 3) (« Fig. 2 »).

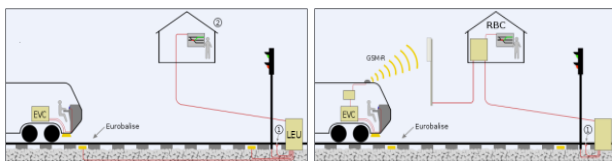


Figure 2. Signalisation ETCS niveaux 1 et 2

Ce système (fonctions sol et bord) a vocation à coexister pour plusieurs décennies avec les systèmes historiques. Cette coexistence induit une adaptation nationale d'ERTMS garante de la cohérence des circulations. Réseau

Ferré de France (RFF), le gestionnaire d'infrastructure français a choisi d'équiper ses corridors fret internationaux d'ETCS niveau 1, ses LGV d'ETCS niveau 2. D'autres réseaux ont adopté des tactiques différentes avec équipements de leurs lignes classiques en ETCS niveau 1 ou 2. Certains axes du Réseau Ferré National (RFN) supporteront donc un double système de signalisation et seront parcourus par des circulations aptes à l'un ou l'autre, voire les 2 systèmes. Aussi, est-il important d'évaluer l'impact de cette superposition de 2 systèmes de signalisation, de philosophies différentes, sur les performances de l'infrastructure (préservation des débits, robustesse des grilles horaire).

Vu les coûts de conception, de validation, de certification, de mise au point et de déploiement des installations, les grandes infrastructures, à l'image de l'industrie du procédé, veillent au maintien en conditions opérationnelles de leurs équipements sur plusieurs décennies. Il en résulte une coexistence assumée de plusieurs générations technologiques (relais électromécaniques, calculateurs de diverses époques), dont les plus récents avatars posent des problèmes de sécurité et d'obsolescence de par leur niveau d'intégration, leur complexité, la réduction concomitante des coûts de développement et l'emballement du processus de renouvellement des produits. Il s'agit donc de modéliser des systèmes E/E/EP (Electrique /Electronique /Electronique Programmable) hétérogènes, associant des parties discrètes (signaux et balises fixes) et continues (GSM-R - Global System for Mobile communications for Railways, TVM), gérant les modes dégradés conformément aux normes et règlements en vigueur.

L'exploitation ferroviaire est tributaire des possibilités et de la qualité de l'infrastructure, des matériels roulants, de l'organisation et des personnels des opérateurs, ainsi que des conditions environnementales et de la topologie des lieux. Une même infrastructure supporte des profils de missions forts différents (Fret, TER – Transport Express Régional, TGV – Train à Grande Vitesse, Trains de Travaux), et sa configuration d'usage est modifiée par le tracé d'itinéraires, ou des zones en maintenance. Le modèle doit donc tenir compte du plan de voie, de l'implantation de la signalisation, des possibilités d'itinéraires, du type de circulation et des caractéristiques des convois (longueur, masse, capacités de freinage et de traction), du profil de mission, du profil de ligne, et du couple véhicule/infrastructure (adhérence, transmission de données ou visibilité des signaux...) dans l'environnement du moment.

Certes, l'idéal reste une asymptote que seule l'utopie peut espérer taquiner, le modèle développé ne peut prendre rigoureusement en considération toutes ces exigences. Il doit demeurer un outil métier, d'usage aisé, avec des durées de traitement raisonnables. L'objectif est d'évaluer la productivité, ou débit imposé par le flux des circulations à écouler, d'axes ferroviaires en fonction des caractéristiques fiabilistes (fiabilité des composants, politiques de maintenance) de leurs systèmes de signalisation (BAL/KVB et ETCS) afin d'optimisation économique sous contraintes de sûreté et de sécurité. Vérifier, en termes probabilistes, la non régression des performances opérationnelles des axes du RFN suppose l'utilisation de méthodes et d'outils adaptés et permettant une décomposition des phases d'analyse.

Les universités de Brunswick, Berlin, Naples,... ont réalisé de nombreux travaux dans le cadre du développement et de la vérification des propriétés d'ERTMS. De nombreuses études [3][4][5] concernent la vérification du respect des exigences fonctionnelles et de leurs complétudes. Il s'agit d'approches hiérarchisées et modulaires, pouvant faire appel à plusieurs types de formalisation. La validation du réseau GSM-R a fait l'objet d'une évaluation probabiliste [8] à partir d'un modèle fonctionnel/dysfonctionnel utilisant des réseaux de Petri. Ce même formalisme a servi de support à une analyse comparée des performances des systèmes BAL/KVB et ETCS 1 sur un projet de corridor fret européen [1].

## II. ARCHITECTURES D'INFRASTRUCTURE ET DU SYSTEME DE SIGNALISATION

L'infrastructure ferroviaire comprend généralement une plateforme, une interface avec la voie (ballast, dalle béton...), la voie ferrée (ensemble rails, attaches, traverses) avec ses raccordements et bifurcations, les câbles faible puissance et télécommunication, des armoires et boîtiers systèmes (circuits de voie, signalisation, piles...), éventuellement complétée d'une infrastructure de puissance pour l'alimentation directe en énergie électrique des trains. Dans le cadre de ce projet, notre intérêt se porte sur le plan de voie, le cantonnement et le profil de ligne, ainsi que le système de signalisation. Le système de signalisation assure la protection des itinéraires et circulations. En fonction des systèmes, plusieurs modes de fonctionnement coexistent, pour ERTMS ont été définis le mode FS (Full Supervision), les modes dégradés OS (On Sight) et SR (Staff Responsible) où la sécurité repose sur le respect de procédures communes à l'ensemble des systèmes présents sur le ligne. Regroupés au sein du groupe de travail Unisig, les principaux équipementiers ferroviaires ont travaillé à la convergence de l'interprétation des spécifications européennes, garante d'une réelle interopérabilité. Trivialement, une dichotomie basée sur la topologie sol/bord permet la ségrégation suivante :

1. **Fonctions sol** : elles sont réalisées par des équipements de contrôle-commande communs aux 2 systèmes de signalisation, ou spécifiques à chacun. En deçà du niveau des systèmes de commande centralisée (supervision des réseaux régionaux, nationaux, européen) assurant la gestion du trafic et des sous-

stations (alimentation en énergie du réseau) via, pour le RFN, des IHM (Interface Homme Machine) (technologie Mistral...) et des modules GOC (Gestion Opérationnelle et Commandement), la gestion des itinéraires est assurée par des postes d'enclenchements de diverses technologies (PRS – Poste tout Relais à transit Souple, PAI – Poste d'Aiguillage Informatisé...). A partir du second niveau d'ERTMS, des RBC (Radio Block Centre) seront associés aux postes d'enclenchements, transmettant les autorisations de mouvement aux matériels roulant par liaison GSM-R à la fréquence de 3 liaisons sol/bord par seconde. Au niveau terrain (gestion des composants), des centres de campagne hébergent les systèmes de gestion (commande et contrôle) de la signalisation lumineuse, des aiguilles (moteurs et verrouillages) et circuits de voie (cantonnement), ainsi que les codeurs KVB pour le contrôle de vitesse. Avec la mise en œuvre d'ETCS, l'équipement de ces centres sera complété par des LEU (Lineside Electronics Unit) (codeurs Eurobalise).

2. **Transmission sol/bord** : hors les équipements spécifiquement BAL/KVB (crocodiles et brosses pour la répétition en cabine de la signalisation lumineuse, balises et antennes pour le KVB), la signalisation lumineuse latérale est commune BAL/ETCS 1. La mise en œuvre d'ETCS 1 nécessite l'équipement de l'infrastructure en Eurobalises et des matériels roulant en antennes associées. ETCS 2 implique en sus, au sol, le déploiement de relais radio et d'antennes GSM-R sur le matériel roulant.

3. **Fonctions bord** : outre le conducteur et le système train, la signalisation BAL impose la présence d'un système simplifié de répétition des signaux en cabine et de boutons d'acquiescement, complété d'un module KVB (capteurs odométriques, rack informatique, console) pour le contrôle de vitesse, ainsi que d'un système d'Acquisition Temporelle des Évènements de conduite Statique de Sécurité (ATESS). ETCS implique la présence en cabine d'une IHM informatique et d'un calculateur spécifique (EVC - European Vital Computer). Des modules d'interface avec les autres systèmes de signalisation (STM - Specific Transmission Module) permettent, lorsque cela est autorisé, le partage des ressources ETCS. Si le contrôle de vitesse permanent est une fonction d'ETCS, la commande des freins est une fonction dépendant du système train.

L'évaluation des performances d'infrastructures, dépendante des matériels la fréquentant, doit faire l'objet d'une étude en propre. Une même infrastructure, si elle supporte des types de circulations fort variées (types de missions, état et performances des matériels), ne constitue souvent qu'une partie des itinéraires de missions. Quant au matériel roulant, fréquentant généralement plusieurs lignes, ce sont les exigences de ligne les plus restrictives qui devront être retenues lors de son évaluation. Le système étudié sera par conséquent circonscrit aux enclenchements de sécurité (PRS, PAI) en amont, aux interfaces sol/bord (feux de signalisation, balises) en aval. Le modèle du matériel roulant sera réduit à une expression simplifiée de sa partie système de signalisation.

### III. MODÉLISATION DU SYSTÈME

#### A. Approche de modélisation

L'approche proposée se veut modulaire et hiérarchisée, à l'image des modèles développés à l'université de Naples [2] pour une étude sur ETCS. Il s'agit ici de modéliser une ligne ferroviaire, avec ses fonctions de signalisation sol et bord, dans un formalisme permettant d'évaluer les performances en termes de débit.

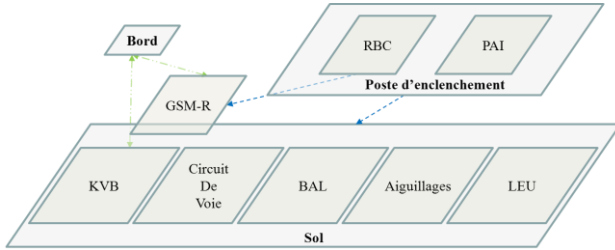


Figure 3. Vue hiérarchique des équipements "sol"

Dans la représentation des différents équipements sol (« Fig.3 ») de l'architecture globale, chaque sous-système possède une couche sous-jacente permettant de gérer ses fonctionnalités propres. Selon le mode utilisé (ETCS ou BAL), différents équipements seront utilisables et les interactions entre équipements seront également représentées.

La partie bord modélisée (« Fig. 4 ») se limitera aux fonctions de communication des systèmes de signalisation BAL/ETCS (état de l'information réceptionnée à bord).

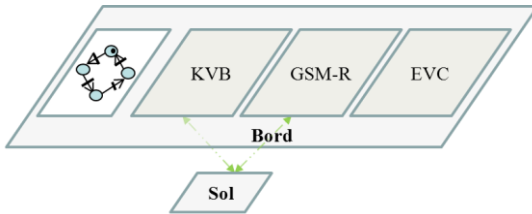


Figure 4. Vue hiérarchique des équipements "bord"

Si sur un corridor fret, les systèmes BAL/ETCS seront superposés, des basculements temporaires ETCS/BAL et réciproquement se produiront en cas d'incident, ou de passage sur un itinéraire non équipé de la sorte. Le protocole de transition, de fait ou assimilable à un mode dégradé, impactera la capacité en débit de la ligne.

L'évaluation de la productivité d'une ligne, requière la prise en considération, pour chacun des sous-systèmes, bord et sol, des aspects fonctionnels (mode de fonctionnement nominal, dégradé), dysfonctionnels (Fiabilité, Disponibilité et Sécurité), de maintenance (préventive ou curative) (« Fig. 5 »).

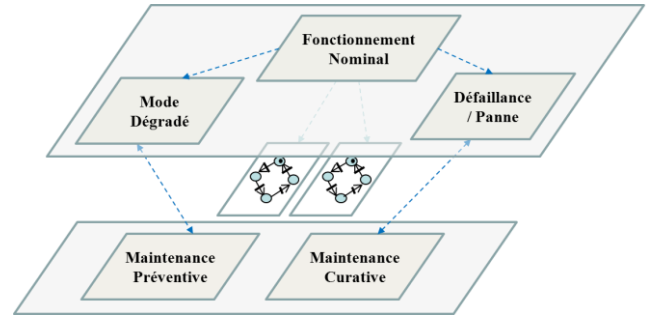


Figure 5. Modes de fonctionnement des sous-systèmes

La constitution d'un modèle fonctionnel a déjà été abordée lors d'une étude précédente [1]. Aujourd'hui, nous proposons une décomposition modulaire plus rationnelle du modèle. En intégrant les aspects fiabilistes, les modes dégradés limitant les performances capacitaires de la ligne pourront s'exprimer. Ils induisent une modification des modes de fonctionnement, accroissant souvent la part procédurale, obligeant à une opération de maintenance immédiate, ou différée. Des procédures de maintenance préventive permettent de reconditionner le système (niveau As Good As New). Le mode défaillance/panne s'applique à une perte de fonctionnalité du système, ou d'un sous-système. Dans ce cas, une recherche des chemins menant à des modes non sûrs pouvant compromettre la sécurité sera réalisée. Une démarche de maintenance curative est alors nécessaire dont l'efficacité peut être volontairement variable (maintenance imparfaite par contrainte de temps, de stock, de coûts).

Le cas de la maintenance est particulier, car elle doit maintenir les performances en termes de débit, mais aussi de niveau de sécurité (Globalement Au Moins Equivalent). La sensibilité du vieillissement des matériels aux conditions d'usage et d'environnement, implique des choix de lois multi-phases associées aux transitions probabilistes des modèles.

Un autre point de vue sera de fixer des objectifs quantifiés en terme de politique et de capacité de maintenance et de voir quel est l'impact sur le débit de la ligne afin d'ajuster le couple coût/débit.

#### B. Cas d'étude

Le modèle obéit à une approche objet dont la granularité est calquée sur le découpage architectural en sous-systèmes et composants. Plusieurs niveaux d'abstraction réalisés sous la forme d'instances permettant de modifier facilement la topologie et les paramètres du modèle permettront une manipulation aisée des sous-ensembles compréhensibles aux acteurs métiers. Pour la modélisation d'un tronçon de ligne, le découpage retenu (« Fig. 6 »), permet une adaptation aisée aux différents scénarii, tracés et niveaux d'équipement.

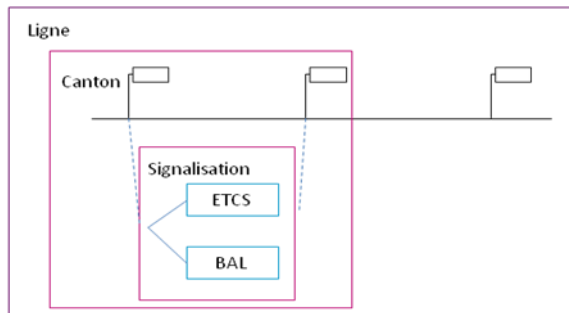


Figure 6. Niveaux d'abstraction du modèle

- Le premier niveau hiérarchique est constitué par le tracé de la ligne ferroviaire, par exemple, de gare (entrée de tronçon) à gare (sortie de tronçon).
- Le deuxième niveau correspond au cantonnement, avec ses liaisons entre cantons (occupation, état de la signalisation...).
- Le troisième niveau d'abstraction est constitué des types de systèmes de signalisation présents sur le canton. Le matériel roulant présent sur ledit canton utilisant, s'il est présent, le système ETCS par défaut, peut réarmer, s'il en est équipé, un autre système en cas de défaillance avérée du premier. Le modèle développé sera en capacité de prendre en compte cette hypothèse.

Le caractère évènementiel (discret) des informations échangées au sein d'un système de signalisation, de ses changements de modes et des évènements les induisant se satisfait d'une modélisation par RdPC (Réseaux de Pétri Colorés Temporisés), permettant l'usage d'outil logiciel tel CPN Tools (<http://cpntools.org>) qui est activement maintenu et largement partagé. Les aspects stochastiques pouvant y être également intégrés. Les systèmes de transmission d'informations continus (GSM-R, TVM) peuvent user de ce type de parangon par discrétisation du temps.

L'élaboration du modèle est scindée en plusieurs parties. Partant des éléments fonctionnels d'une ligne, nous nous intéressons à la gestion des autorisations de mouvement et du choix de signalisation entre BAL/KVB et ETCS 1 (« Fig. 7 »).



Figure 7. Allure du modèle d'infrastructure

Il s'agit ici d'un tracé de ligne simple, en ligne droite sans déviation, découpée en sept cantons avec une gare de départ et une gare d'arrivée, sans aiguilles, ni poste d'enclenchement. Sur chaque canton, il est laissé la possibilité de choisir le système à utiliser en fonction de sa disponibilité (ETCS ou BAL/KVB).

Puis nous intégrons, dans un modèle simplifié (« Fig. 8 »), la gestion d'un aiguillage (« Fig. 9 ») avec moteur et enclenchement, en prenant en compte les aspects dysfonctionnels.

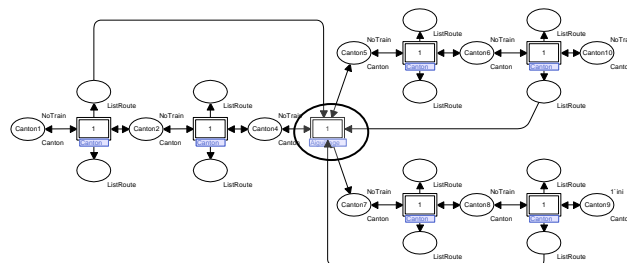


Figure 8. Représentation d'un tronçon de ligne avec aiguillage

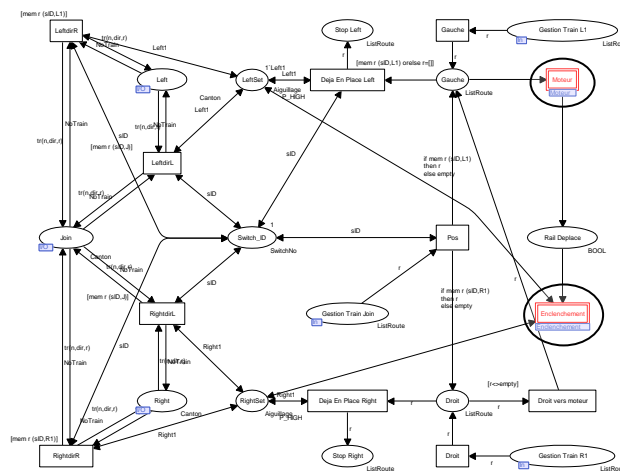


Figure 9. Représentation de la gestion de l'aiguillage

Concernant les aspects dysfonctionnels, la disponibilité du moteur ou de l'enclenchement sont décrits par un ensemble de lois probabilistes et associés à une politique de maintenance (« Fig. 10 »).

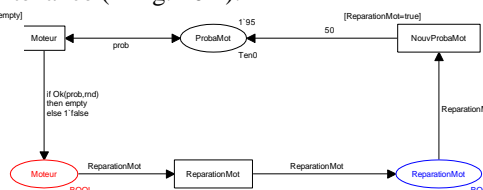


Figure 10. Modèle d'utilisation du moteur d'aiguillage

La gestion des feux de signalisation avec leurs modes de replis a également été modélisée.

Les éléments « bord » ne sont pas instanciés, mais les caractéristiques du train sont paramétrables et sont modélisés à l'aide de jetons et leurs couleurs. Il s'agit principalement du type de train, de ses caractéristiques de freinage et d'accélération, de vitesse maximale ainsi que de sa longueur et poids.

Les différents sous-systèmes sont modélisés par implémentation successive et seuls les temps de séjour dans les différents cantons sont pour l'instant quantifiables.

La hiérarchisation par blocs fonctionnels des différents sous-systèmes facilitera une génération automatisée du modèle à l'aide de fonctions ML intégrées dans CPN Tools, ou alors à l'aide de boîte à outils externe utilisable avec ce logiciel, comme proposé dans [6]. De plus, cela facilitera également la parallélisation des traitements.

Une interface de programmation permettra aux gens du métier de décrire aisément une infrastructure.

#### IV. PERSPECTIVES

La construction du modèle étant une tâche complexe et délicate pour les systèmes de grande taille, nous allons poursuivre notre travail par l'évaluation de l'impact de la maintenance sur le débit pour la ligne simplifiée, puis complexifier les possibilités d'itinéraires, et ajouter un poste d'enclenchement. Des observateurs seront intégrés au modèle pour l'évaluation des performances fiabilistes.

L'approche se veut généraliste et convient à un système ferroviaire, mais pourrait être adaptée à d'autres systèmes, moyennant une adaptation certaine.

#### REMERCIEMENTS

A nos mentors techniques des directions de l'Infrastructure et de l'Ingénierie SNCF : R. Caron, F. Sherb, M. Antoni.

Remerciements également à Mickaël Thibaud pour sa collaboration.

#### REFERENCES

- [1] Lalouette J., Brinzei N., Malassé O., « Evaluation des performances du système de signalisation ferroviaire européen superposé au système français, en présence de défaillances », Congrès Lambda-Mu 17, La Rochelle, Octobre 2010.
- [2] Flammini F., "Model-based dependability evaluation of complex critical control systems", Thèse de Doctorat, Université de Naples, Novembre 2006
- [3] Barger P., Schön W., Bouali M., "A study of railway ERTMS safety with colored Petri nets", The European Safety and Reliability Conference ESREL 2009, Prague, septembre 2009.
- [4] Jansen L., Meyer zu Horste M., Schnieder E. "Technical issues in modeling the European train control system (ETCS) using coloured Petri nets and the Design/CPN tools", Proceedings of the Workshop on Practical Use of Coloured Petri Nets and Design/CPN, Aarhus, Danemark, 1998, pp. 103-115.
- [5] Meyer zu Horste M., Schnieder E. "Modelling and simulation of train control systems using Petri nets", FM'99 Formal Methods. World congress on formal methods in the development of computing systems. Lecture Notes in Computer Science, vol. 1709, pp. 1867-1883, 1999.
- [6] Ingrid Chieh Yu, "A Layered Approach to Automatic Construction of Large Scale Petri Nets – Modelling Railway Systems", Thèse de Doctorat, Université d'Oslo, août 2004