

Modélisation et évaluation des performances d'un système de signalisation ferroviaire intégrant BAL et ETCS par réseaux de Petri colorés

Jérôme LALOUETTE¹, Nicolae BRINZEI², Olaf MALASSE³,
Régis CARON¹, Francis SCHERB¹, JEAN-FRANÇOIS AUBRY²

¹ SNCF, Direction de l'Ingénierie
6 avenue François Mitterrand, 93514 La Plaine Saint-Denis Cedex, France
Jerome.lalouette@sncf.fr, Regis.Caron@sncf.fr, Francis.Scherb@sncf.fr

² Centre de Recherche en Automatique de Nancy,
UMR 7039 – Nancy-Université, CNRS
2, avenue de la forêt de Haye, 54516 Vandœuvre, France
Nicolae.Brinzei@cran.uhp-nancy.fr, Jean-Francois.Aubry@cran.uhp-nancy.fr

³ Arts et Métiers ParisTech
4, rue Augustin Fresnel, 57078 Metz Cedex 3, France
Olaf.Malasse@ensam.eu

Résumé — Le futur système de signalisation ferroviaire ETCS (European Train Control System) qui doit assurer au niveau de l'Union Européenne l'interopérabilité des corridors ferroviaires européens sera superposé, en France, aux systèmes de signalisation nationaux déjà existants. L'impact de cette coexistence doit être évalué, notamment en termes de performances et de robustesse. Dans ce but, un modèle de cantonnement BAL (Block Automatique Lumineux) puis ETCS niveau 1 ont été développés sous forme de réseaux de Petri colorés. Ce modèle permet de prendre en compte toutes les spécifications fonctionnelles et, ensuite, d'évaluer quantitativement le comportement dynamique de la ligne ferroviaire et des systèmes de signalisation. Pour valider notre approche, nous l'avons appliquée à une ligne ferroviaire réelle, la ligne Zoufftgen-Woippy située à la frontière franco-luxembourgeoise.

Mots-clés — Signalisation ferroviaire, BAL, ERTMS/ETCS, modélisation, évaluation des performances, réseaux de Petri colorés (RdPC).

I. INTRODUCTION

La plus part des pays européens a désormais développé son propre réseau ferré régis par ses propres principes. Dans le même temps, la création de l'Union Européenne ainsi que l'établissement de nombreux accords commerciaux ont favorisé les échanges transfrontaliers. Mais au niveau du transport ferroviaire, comme chaque pays a développé son réseau indépendamment de ceux de ses voisins, cet échange n'est actuellement possible que sous certaines conditions. Certains éléments changent d'un pays à l'autre, comme par exemple la tension d'alimentation des caténaires, l'écartement des rails (c'est le cas en Espagne) ou encore d'autres plus péjorant car touchant à la sécurité, sont les principes de signalisation. Ce sont en effet ces derniers qui posent le problème le plus critique. Pour le contourner, nous avons actuellement le choix entre changer de locomotive à la frontière ou multiplier à bord les systèmes d'exploitation de la

signalisation correspondant à chaque pays traversé. Mais ces solutions ont soit pour effet une perte de temps non négligeable, soit de suréquiper le bord des locomotives de tractions qui favorise alors le risque d'erreur humaine dû à une mauvaise interprétation de la signalisation par le conducteur.

C'est pourquoi, dans un souci de favoriser l'interopérabilité et ainsi de développer d'avantage l'économie de l'Europe, l'Union Européenne [2] a défini une nouvelle signalisation européenne ayant pour but d'uniformiser la signalisation sur les lignes transfrontalières européennes et ainsi de les rendre interopérables. Cette signalisation s'appelle European Train Control System (ETCS) et devra à plus ou moins court terme être implantée par les états membres sur leurs lignes. Plusieurs niveaux d'implantation du système de signalisation ETCS ont été définis. Dans ce travail nous nous intéressons au niveau 1 [7].

Dans le désir de ne pas perturber son trafic déjà existant, la SNCF a choisi de superposer cette nouvelle signalisation à son ancienne. Ainsi les lignes destinées à recevoir la signalisation ETCS accepteront de faire circuler des trains équipés en ETCS et en BAL (Block Automatique Lumineux : signalisation française actuelle). Mais avant de faire circuler des trains interopérables sur le réseau français, il est important d'étudier l'impact, en termes de performances (débit, grilles horaires représentant l'évolution des trains dans l'espace en fonction du temps, robustesse face à des perturbations,...), de cette nouvelle signalisation qui intègre conjointement l'ETCS niveau 1 et le BAL. C'est l'objectif de notre travail présenté dans cet article.

Afin de pouvoir atteindre notre objectif, il est nécessaire de développer d'abord un modèle d'une ligne ferroviaire et de ses deux systèmes de signalisation. Comme l'évolution d'un système ferroviaire est événementielle, nous nous sommes dirigés vers une modélisation de type Système à Événements Discrets (SED). De plus, sa complexité peut provoquer une

explosion combinatoire et afin de pallier cet inconvénient tout en maîtrisant la complexité du système ferroviaire réel l'outil de modélisation doit permettre de développer des modèles à différents niveaux d'abstraction : d'abord un modèle abstrait représentant le système à une échelle macroscopique, qui sera ensuite enrichi au fur et à mesure de la prise en compte des sous-systèmes, des composants et de leurs spécifications détaillées. Et pour finir, les résultats que nous désirons obtenir nécessitent d'introduire une notion de « temporisation » à notre modèle et de pouvoir surveiller l'évolution du système en tout endroit et à tout instant. Dans ce but nous sommes orientés vers les réseaux de Petri colorés temporisés (RdPC) tel qu'ils ont été définis dans [4] car ce modèle formel permet la modélisation hiérarchique des SED à plusieurs niveaux tout en intégrant l'évolution temporisée du système étudié.

Plusieurs travaux ont déjà été réalisés sur la modélisation du système de signalisation ETCS par réseaux de Petri colorés. Ainsi nous pouvons citer d'abord les travaux de Jansen, Meyer zu Hörste et Schnieder [3] qui présente une approche globale de modélisation des spécifications fonctionnelles d'ETCS. Un modèle RdPC hiérarchique à plusieurs niveaux est développé : *composants*, différents *scénarios d'utilisation* d'un composant, ainsi qu'au niveau le plus bas de la hiérarchie les différentes *fonctions* mises en œuvre par chaque scénario. Ce modèle est utilisé dans [6] pour valider formellement la complétude des spécifications ETCS. Cette validation formelle est réalisée par l'analyse de l'espace d'états (graphe des marquages du RdPC). Ce travail montre la pertinence des RdPC pour de telles études, mais il se confronte également avec le problème connu de l'explosion combinatoire de l'espace d'états. Pour cette raison, seulement l'étude d'un scénario spécifique d'un composant isolé est présentée.

Lahlou, El-Koursi, Bon et Yim [5] présente un modèle RdPC pour modéliser les spécifications techniques d'interopérabilité et les règles d'exploitation d'ETCS. Même si les règles utilisées sont de haut niveau et un travail de raffinement serait nécessaire, cet article est une extension des travaux précédents [6]. La simulation du modèle permet de garantir que les exigences d'interopérabilité sont bien respectées au niveau des règles d'exploitation.

Barger, Scön et Bouali [1] utilisent les réseaux de Petri colorés pour modéliser les spécifications ERTMS/ETCS. Ils proposent de générer le graphe des marquages qui devra permettre ensuite de vérifier la cohérence des exigences de sûreté.

Les réseaux de Petri ont été également utilisés pour l'étude de la communication entre les composants du système ETCS. Zimmerman et Hommel [8] se sont intéressés à l'évaluation probabiliste de la sûreté de fonctionnement du réseau GSM-R. Ceci nécessite la prise en compte des défaillances du réseau et notamment l'occurrence de ces défaillances dans le temps. Pour réaliser cela, les auteurs ont développé un modèle de réseaux de Petri stochastiques qui permettent une évaluation quantitative probabiliste.

Par rapport aux travaux existants dans la littérature, nous nous proposons d'étudier un réseau ferroviaire qui ne dispose pas seulement d'ETCS, mais celui-ci est présent simultanément avec un autre système de signalisation, c'est-à-dire la signalisation latérale française BAL.

Afin de présenter notre travail, la deuxième partie de notre article illustre de manière succincte les principes de fonctionnement des deux systèmes de signalisation BAL et ETCS. La troisième partie présente le modèle RdPC d'une ligne ferroviaire et des systèmes de signalisation dont celle-ci dispose. La quatrième partie présente l'exploitation que nous faisons de ce modèle et les résultats obtenus. Enfin, nous concluons et nous donnerons des perspectives qui s'ouvrent à ce travail.

II. SYSTEMES DE SIGNALISATION FERROVIAIRE

A. La signalisation française : BAL

La signalisation de type Block Automatique Lumineux repose de manière simplifiée sur l'enchaînement de 3 signaux lumineux distincts :

- Vert / voie libre : le train ne subit aucune restriction ;
- Jaune / avertissement : le train devra s'arrêter à la fin du canton ;
- Rouge / sémaphore ou carré : le canton suivant est occupé. Si l'état du signal est sémaphore, le train est autorisé à entrer sur le canton dans un mode spécial appelé marche à vue, sinon il attend sa réouverture.

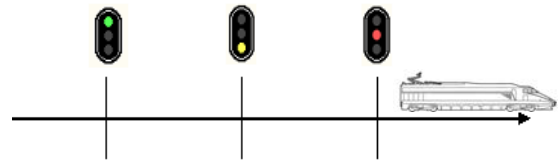


Figure 1 : Enchaînement de la signalisation BAL

Le mode marche à vue est nécessaire pour augmenter la disponibilité de la ligne en permettant à un train d'entrer sur un canton déjà occupé sous certaines conditions. La règle principale oblige le conducteur à ne pas dépasser la vitesse maximale de 30 km/h pour qu'il puisse arrêter son train dès l'observation d'un obstacle sur la voie. Ce mode évite ainsi un blocage complet du réseau.

Ces signaux lumineux servent à la fois à la protection de la circulation en régulant l'espacement et à la protection d'itinéraire en respectant l'enclenchement des aiguilles.

B. La signalisation Européenne : ETCS niveau 1

La signalisation ETCS est une signalisation de cabine réalisant uniquement la fonction d'espacement. C'est pourquoi elle s'appuie sur la signalisation latérale sans la remplacer. Au lieu de donner des renseignements sur l'état des cantons par un principe de signaux lumineux, ce système impose au conducteur une courbe de vitesse que le train doit suivre. Cette information est reportée sur une interface nommée « Driver Machine Interface » (DMI) et indique en temps réel la vitesse maximale autorisée.



Figure 2 : Drive Machine Interface (DMI)

Si le train ne respecte pas la condition de vitesse maximale, il sera pris en charge par le système ETCS qui redescendra sa vitesse en dessous de la vitesse limite. C'est le principe de l'Autorisation de mouvement (Mouvement Authority - MA). Pour calculer cette MA et cette courbe de vitesse, le train a besoin d'informations venant du sol concernant l'état de la signalisation et la description de la voie sur laquelle il circule. A chaque réception de ces informations, une nouvelle MA et une nouvelle courbe de vitesse sont recalculées. Ces renseignements sont reçus de façon ponctuelle lors du passage par des points d'information localisés à différents endroits de la ligne : au pied des signaux (PI) et en amont de ceux-ci (PI avancé). Chaque MA a une vitesse but nulle. La figure 3 montre un exemple d'attribution de MA et d'établissement de courbe de contrôle de vitesse en fonction de l'état de la signalisation BAL.

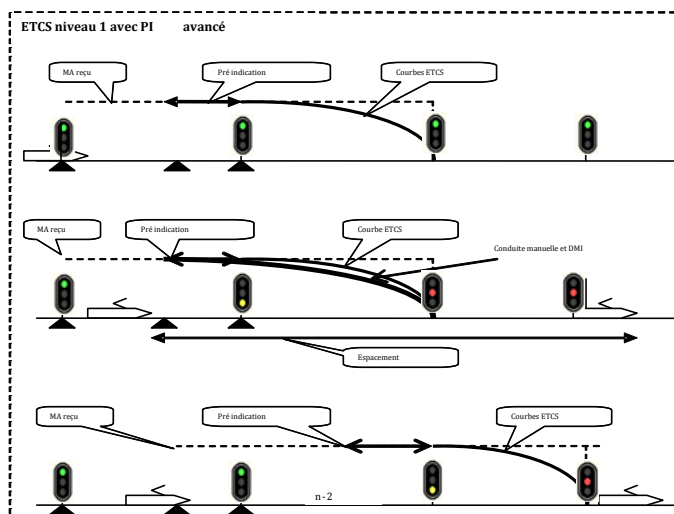


Figure 3 : Attribution de MA en fonction de l'état de la signalisation latérale

III. MODELISATION

A. Les Réseaux de Petri Colorés (RdPC)

Les réseaux de Petri forment un outil puissant pour étudier tous les aspects des systèmes à événements discrets. Ils permettent de modéliser simultanément la structure statique d'un système et son évolution dynamique en prenant en compte des phénomènes tels que le parallélisme, la synchronisation et le partage des ressources, phénomènes largement présents dans les réseaux ferroviaires. Dans cet article nous utilisons les réseaux de Petri colorés tels qu'ils ont été définis par Jensen [4]. Ces réseaux de Petri permettent une différenciation des jetons, ceux-ci contenant des informations. Ainsi, pour notre système, un jeton modélisant un canton contient un identifiant (numéro), ainsi que sa longueur, ou un jeton modélisant un train contient un identifiant, la vitesse courante et la vitesse maximale autorisée (Figure 4). Une transition est caractérisée par une condition de garde (expression booléenne qui doit être évaluée à vrai afin d'autoriser le franchissement de la transition), d'une durée permettant de mettre à jour l'attribut *temps* du jeton qui franchie la transition, ainsi que d'un champ qui permet d'ajouter du code (en langage (S)ML) qui sera exécuté lors du franchissement. Dans la figure 4 ce champ présente un mode de calcul simplifié de la vitesse du train et du temps de séjour

sur le canton, en fonction de la vitesse d'entrée du train, de l'état de la signalisation, du type de signalisation compris (BAL ou ETCS), des performances de freinage et d'accélération du train, de la déclivité de la voie ou encore de la longueur du canton. Ces réseaux de Petri colorés [4] sont également des réseaux de haut niveau, c'est-à-dire qu'ils permettent une modélisation hiérarchique à différents niveaux d'abstraction grâce à des transitions de substitution. Cet aspect nous a été également très utile dans notre travail car il nous a permis de construire des sous-modèles modulaires et de garder ainsi la généricité et la lisibilité du modèle RdPC global. Le logiciel *CPN Tools* (<http://wiki.daimi.au.dk/cpntools/cpntools.wiki>) implémente ce modèle formel des RdPC.

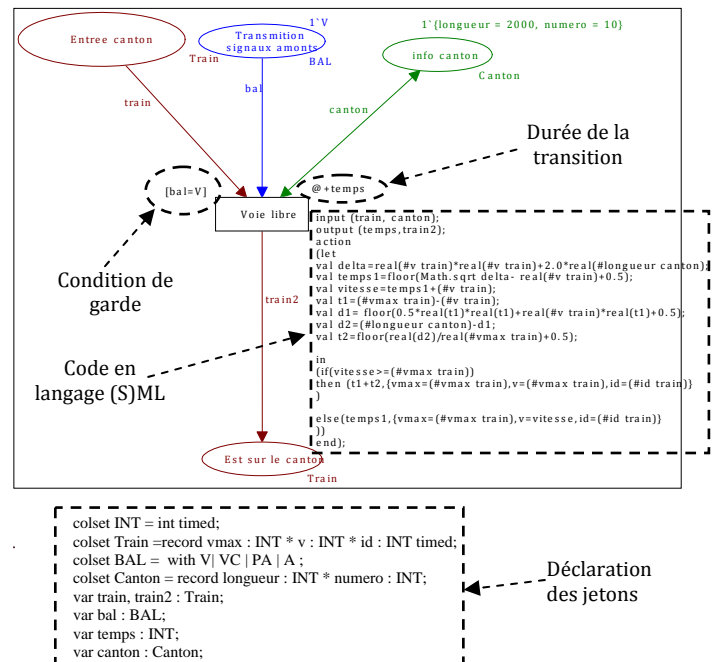


Figure 4 : Exemple de réseau de Petri coloré (extrait simplifié de la gestion du temps de séjour d'un train sur un canton)

B. Eléments à modéliser

A la suite de l'écriture des spécifications des deux systèmes de signalisation à modéliser, trois principaux éléments à prendre en compte ont été révélés. Il s'agit de la *signalisation*, du *comportement du train* et du *comportement du conducteur*. Comme nous l'avons vu dans la partie II, les deux types de signalisation que nous voulons modéliser ont des principes différents. Chacune fera alors l'objet d'une modélisation propre.

Les caractéristiques des trains qui déterminent les comportements réels et qui présentent un impact direct sur la circulation sont les suivantes :

- Les freins : suivant le type de train, le coefficient de décélération et le temps de mise en action des freins seront plus ou moins élevés.
- L'accélération : chaque type de train possède ses propres performances d'accélération.
- Profil de vitesse voie : suivant la catégorie du train, la vitesse maximale autorisée sur la ligne varie.

Concernant le comportement du conducteur, la réglementation guide en théorie les opérateurs, mais le comportement réel de

ces derniers peut se révéler erratique. Il a donc fallu déterminer un comportement type à l'aide d'experts. En voici un exemple concernant le principe de VISA (Vitesse Sécuritaire d'Approche) dans la signalisation BAL : lorsqu'un conducteur arrive à l'approche d'un signal d'avertissement, il doit appliquer le principe dit VISA. Cette réglementation impose au conducteur de commencer à freiner dès qu'il aperçoit le signal et d'avoir une vitesse inférieure à 30 km/h 200m avant la fin du canton. Le problème est alors principalement de savoir comment le conducteur va réaliser son freinage. L'expérience nous montre qu'en réalité, à distance de visibilité du signal d'avertissement, le conducteur va mettre en action les freins, puis opérer un freinage constant pour atteindre la vitesse de 30 km/h non pas à 200m avant la fin du canton, mais plutôt à 300m. La figure suivante montre la courbe de vitesse du train décrivant cette opération :

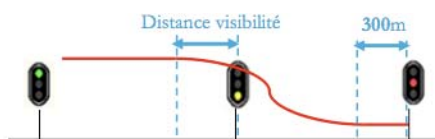


Figure 5 : Comportement du conducteur face au principe de VISA

C. Architecture du modèle

Pour appréhender la complexité d'un tel système, il est intéressant de travailler à différentes niveaux. Cela permet également de faciliter la compréhension du modèle réalisé. C'est pourquoi le choix de travailler à l'aide d'un réseau hiérarchisé à trois niveaux a été retenu. Ceux-ci classés par ordre de niveau d'abstraction décroissant sont les suivants :

- *Voie* : ce niveau est celui le plus haut. C'est ici que le plan de voie est représenté. On traitera alors les problèmes relatifs aux aiguillages et à l'enclenchement d'itinéraire.
- *Signalisation* : comme le modèle doit permettre la circulation de trains équipés soit du système ETCS soit du système BAL, et que le comportement conducteur est différent suivant ces deux cas, il est important de déterminer quel type de signalisation est affecté au train pour pouvoir lui donner le comportement adéquat. C'est donc à ce niveau que nous réaliserons cette sélection. De plus, comme la signalisation latérale est commune à ces deux systèmes (pour établir ses MA pour la signalisation ETCS et pour gérer l'espacement pour la signalisation BAL), c'est également à cet endroit quelle sera gérée.
- *Canton* : il traite la partie circulations, i.e. la gestion de la vitesse, la gestion du freinage, la gestion du temps de séjour des trains sur un canton, le calcul du temps de libération des aiguilles...

Voici un schéma récapitulatif de cette hiérarchisation :

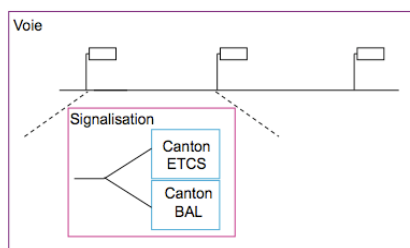


Figure 6 : Hiérarchisation du modèle RdPC

D. Description des parties fondamentales du modèle RdPC

Ne pouvant pas décrire l'ensemble du modèle, nous nous limiterons ici à une des parties essentielles de notre modélisation, à savoir la mise en œuvre de la signalisation latérale, car sans elle aucune circulation n'est possible (BAL ou ETCS). Cette gestion de la propagation de l'état des signaux lumineux est réalisée de canton en canton. Ce choix permet en effet le respect de l'enchaînement de l'état des signaux lumineux de type BAL comme le décrit la figure 1 et cette fonction sera réalisée au niveau 2 de la hiérarchisation du modèle.

La figure 7 présente une vue d'ensemble de la partie traitant ce problème. On peut distinguer deux parties sur cet extrait de réseau. La partie du haut sert à réceptionner l'état de la signalisation et celle du bas à le retransmettre vers les cantons précédents. Détaillons ces deux parties fondamentales du modèle :

- Retransmission de l'état de la signalisation (encadré b) :

Il y a deux manières de transmettre l'état de la signalisation : on vient de recevoir l'état de signalisation du canton suivant et il faut alors retransmettre cette information au canton précédent, ou un train est présent sur le canton et alors il faut initier une nouvelle vague de retransmission de l'état des signaux.

Pour différencier ces deux cas de transmission, deux places sont présentes : « présence train » et « envoie signal aval 2 ». Lorsqu'il s'agit d'une simple retransmission, seule la place « envoie signal aval 2 » enverra un jeton au canton précédent. Dans le cas de l'initiation d'une nouvelle vague de retransmission de l'état de signaux, les deux places enverront un jeton au canton précédent.

- Réception de l'état de la signalisation (encadré a) :

De même que pour la retransmission, il y a également deux manières distinctes de réceptionner l'état de la signalisation : soit le canton aval retransmet uniquement l'état de la signalisation qu'il a lui même reçu, soit il est à l'origine de la transmission de l'état de la signalisation.

- Réception d'un état de retransmission simple : dans ce cas il arrive uniquement un jeton dans la place « Signal aval ». Pour éviter la réception de plusieurs retransmissions simultanées (par exemple venant du canton + 2 et du canton + 3), les transitions « pour éviter l'accumulation des signaux » et « Fin retransmission » servent à ne conserver que la bonne information (avant de poursuivre le traitement) ou de supprimer l'information si celle-ci est inutile (réception d'un état voie libre alors que le canton y est déjà).

- Réception d'une nouvelle vague de retransmission : un jeton arrivera dans les deux places « Présence train » et « Signal aval ». Une fois la présence de ces deux jetons, l'état de la signalisation effective du canton est déduit. Pour éviter que le jeton présent dans la place « Signal aval » soit traité comme une retransmission simple, la place « Priorité » donne, comme son nom l'indique, la priorité de franchissement à la transition « Choix du signal prioritaire » par rapport à celle « Choix du signal de retransmission ».

Une fois la réception de l'état de signalisation du canton aval déterminé, un algorithme définit l'état dans lequel

doit se trouver le canton et le met à disposition dans la place « Transmission signaux amonts ».

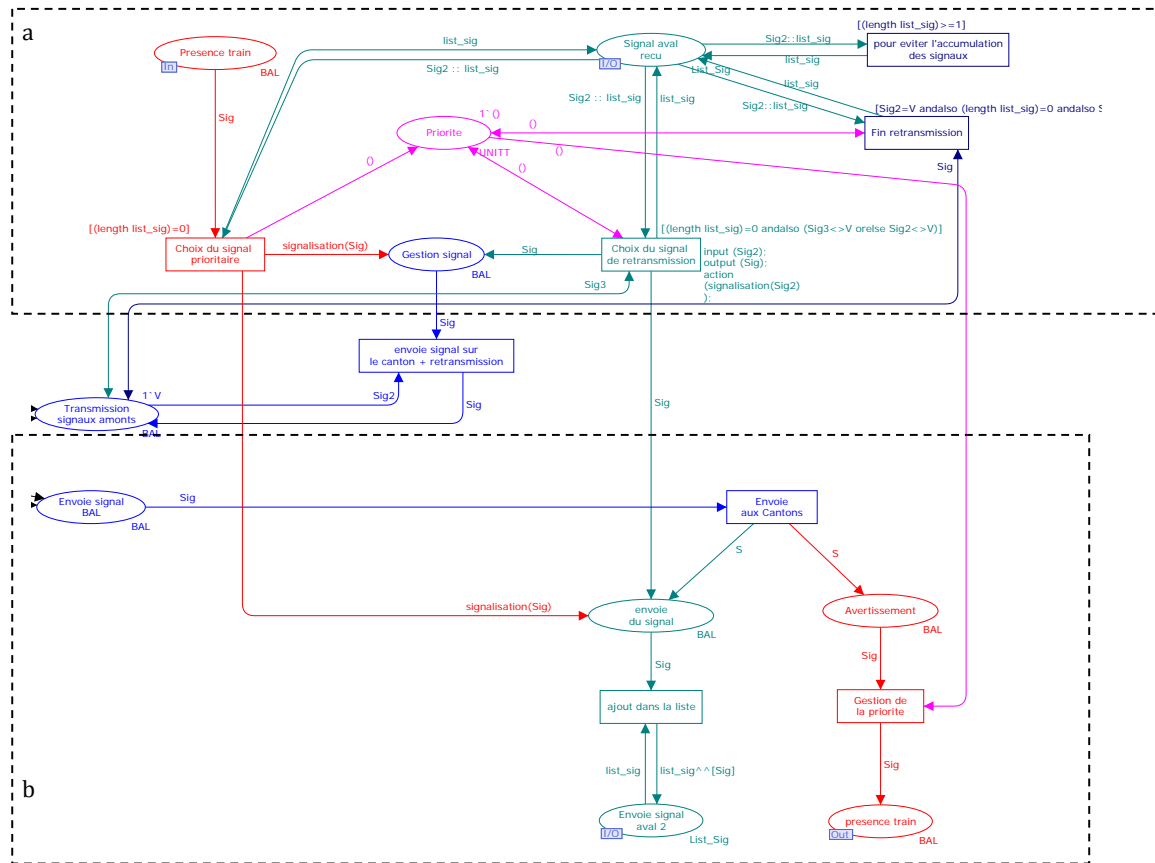


Figure 7 : Gestion de la signalisation latérale

E. Ligne ferroviaire étudiée

Après le développement des sous-modèles RdPC génériques pour tous les composants d'une ligne ferroviaire et de deux systèmes de signalisation, nous avons appliqué notre modélisation à une ligne ferroviaire réelle Zoufftgen-Woippy située à la frontière franco-luxembourgeoise. Cette ligne a été choisie car elle est représentative des corridors ferroviaire C et D, mais aussi car c'est sur celle-ci que la nouvelle signalisation européenne ETCS va être très prochainement installée en tant que projet pilote. La ligne Zoufftgen-Woippy correspond à environ 40km de voies divisée en 37 cantons et elle possède 4 entrées et 3 sorties, 8 aiguilles et 7 gares. Le modèle RdPC de cette ligne contient environ 550 places, 250 transitions, 20 couleurs de jeton différentes et 70 fonctions écrites en langage (S)ML.

IV. EXPLOITATION DU MODELE RDPC

A. Validation du modèle

Les différents résultats attendus de notre étude doivent être représentés sous forme graphique conformément aux grilles horaires de la SNCF, i.e. de représenter l'évolution spatiale du train en fonction du temps.

Mais, avant d'utiliser notre modèle pour obtenir des résultats qui permettront d'évaluer l'impact des deux systèmes de signalisation sur les performances de la ligne, il faut d'abord s'assurer de la bonne conception du modèle, de son bon respect par rapport aux spécifications et de sa fidélité par rapport au comportement réel de la ligne. Pour réaliser cela,

nous avons choisi de comparer les grilles horaires obtenues par observation de la ligne réelle (informations obtenues auprès du CRO (Centre Régional d'Observation) de Nancy correspondant à la circulation du 24 mars 2009 entre 6h et 9h) et de les comparer à des grilles horaires obtenues par simulation du modèle. La figure 8 présente les grilles horaires réelles et les grilles horaires simulées en circulation BAL obtenues par la simulation du modèle RdPC. La bonne superposition des courbes simulées et des courbes réelles démontre la validité de notre approche.

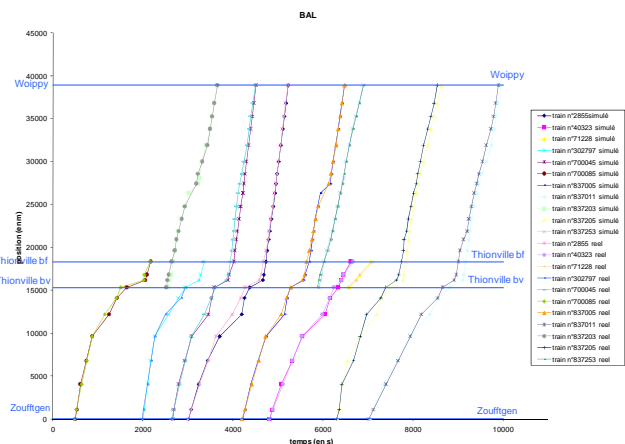


Figure 8 : Validation du modèle par rapport à la circulation réelle avec la signalisation BAL

B. Exploitation du modèle

Nous allons maintenant modifier le type de signalisation utilisé par les trains en laissant une partie de trains toujours en BAL et pour l'autre partie en associant une circulation en ETCS niveau 1. Les grilles horaires obtenues dans ce cas se superposent à nouveau très bien sur les grilles horaires (figure 9). Ce résultat est très intéressant car il montre que lors de la migration d'un parc de véhicules équipés BAL vers un parc ETCS (et cette migration prendra plusieurs années) n'affectera pas de manière négative les performances du réseau ferré.

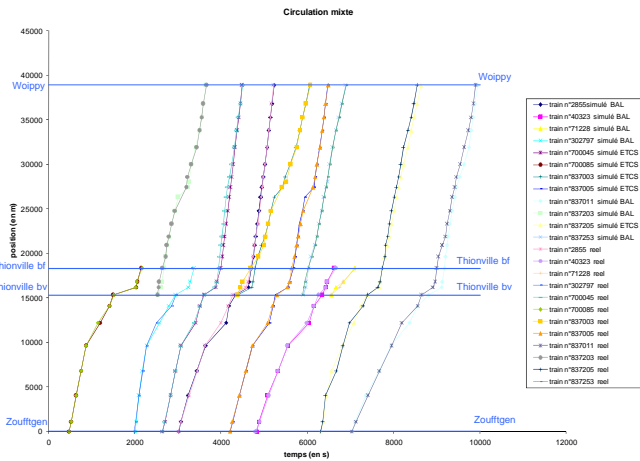


Figure 9 : Etude d'une circulation mixte BAL/ETCS par rapport à la circulation réelle

Les possibilités de notre modèle sont multiples car il nous est possible de déterminer le débit de la ligne en fonction du type de trafic circulant sur la ligne, ou encore voir l'influence de l'endroit d'implantation des Eurobalises sur les performances de la signalisation ETCS et ainsi de guider sa conception. Les résultats précédents ont été obtenus pour le fonctionnement nominal du réseau ferré. Le modèle RdPC nous permet également d'étudier des dysfonctionnements du système. La figure 10 montre l'influence d'un arrêt imprévu en pleine voie pendant 2 heures sur les comportements des trains lorsqu'ils utilisent une signalisation BAL ou une signalisation ETCS. Les délais entre les trains sont très courts et l'ETCS est meilleur car il permet aux trains de libérer plus vite le canton et évite ainsi la propagation de la perturbation.

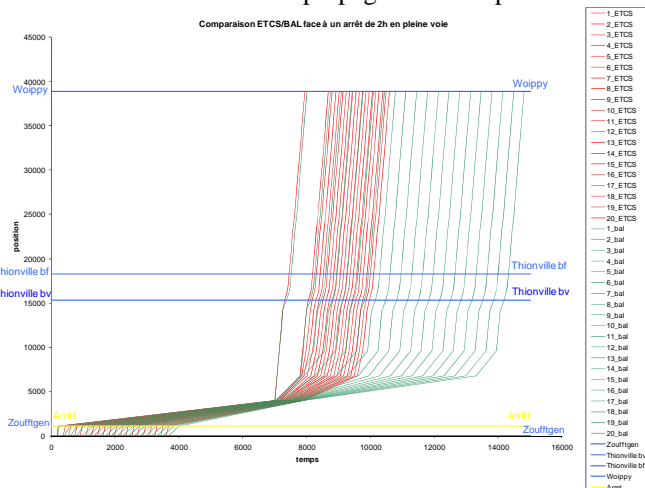


Figure 10 : L'influence d'un arrêt imprévu en pleine voie lors de la circulation en BAL et respectivement en ETCS 1

IV. CONCLUSION

Cet article présente une étude de modélisation et d'évaluation des performances d'une ligne ferroviaire équipée de deux systèmes de signalisation BAL et ETCS. L'outil de modélisation choisi, les réseaux de Petri colorés, permet de modéliser toutes les spécifications fonctionnelles de tous les composants d'un réseau ferroviaire : les deux systèmes de signalisation, le comportement du train, le comportement du conducteur. Le modèle obtenu est modulaire et composé de sous-réseaux de Petri génériques. Grâce à la puissance du langage (S)ML, nous avons pu modéliser tous les algorithmes nécessaires. Ensuite, la simulation du modèle RdPC nous a permis d'évaluer le comportement dynamique du système en déterminant les grilles horaires des trains. L'étude de la ligne ferroviaire réelle Zoufftgen-Woippy, nous a permis de montrer la pertinence de notre approche, ainsi que d'évaluer l'impact de l'introduction du nouveau système ETCS sur les corridors européens ferroviaires.

Nous avons également montré qu'une modélisation par des RdPC se prête à l'étude des modes dégradés de fonctionnement et d'évaluer quantitativement leur effet sur la circulation des trains. Nous nous proposons de continuer dans cette direction et d'étudier exhaustivement les différents modes dégradés et d'évaluer leurs effets. Une seconde perspective de notre travail concerne l'intégration dans le modèle RdPC des défaillances des différents composants du système et ensuite d'évaluer les paramètres de la sûreté de fonctionnement, tel que la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité du réseau ferré.

RÉFÉRENCES

- [1] 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.
- [2] EEIG ERTMS User Group ERTMS/ETCS System Requirements Specification, UIC, Bruxelles, 1999.
- [3] 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.
- [4] Jensen K. *Coloured Petri Nets. Basic concepts, Analysis Methods and Practical Use*, volume 1, Springer-Verlag, Berlin, 2nd edition, 1997.
- [5] Lahlou O., El-Koursi E., Bon P., Yim P. Evaluation des règles d'exploitation pour l'interopérabilité et la sécurité dans les transports ferroviaires, 6^{ème} Conférence Francophone de Modélisation et Simulation, MOSIM'06, Rabat, Maroc, 2006.
- [6] 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.
- [7] Réseau Ferré de France, *Corridors européens ETCS1. Cahier de charge fonctionnel. Principes de signalisation ETCS1*, Référence 07-3E060-RaiC, 2007.
- [8] Zimmermann A., Hommel G. A train control system case study in model-based real time system design, International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'03), Nice, France, 2003.