# Modélisation générique de réseaux électriques ferroviaires

Boris Desjouis[1,2,3], Soha Saad[1], Jean Bigeon[1], Florence Ossart[2], Etienne Sourdille[3]
[1]G-SCOP – CNRS UMR 5272; Grenoble INP-UJF; 38000 Grenoble - France
[2]GEEPS - CNRS UMR 8507 – CentraleSupélec – UPSud – Sorbonne Université UPMC; 91192 Gif sur Yvette – France
[3]SNCF, Direction de l'ingenierie, 6 avenue François Mitterrand, 95574 La Plaine St-Denis

**RESUME - L'évolution des réseaux électriques ferroviaires, en particulier pour améliorer leur efficacité énergétique, impose d'adapter les simulateurs afin de prendre en compte de nouveaux matériels ou de permettre l'optimisation de ces systèmes. Nous proposons une approche originale, fondée sur le concept de méta-modèles, afin de construire des modèles de réseaux génériques et développer un simulateur polyvalent, robuste et évolutif. La généricité de l'architecture garantit une modélisation facile de différents systèmes d'alimentation, ce qui a déjà été testé pour les systèmes 1500 V DC et 1x25 kV 50 Hz et validé sur des cas d'études réels de la SNCF. Il sera aussi facile d'implanter des modèles de nouveaux matériels, non définis à ce jour.**

***Mots-clés—Simulation ferroviaire; réseaux électriques; architecture logicielle;***

## 1. INTRODUCTION

Le dimensionnement des infrastructures électriques ferroviaires s'appuie sur des simulateurs résolvant les équations électriques du réseau d'alimentation couplées aux équations dynamiques de déplacement des trains. L'existence de nombreux systèmes d'électrification (continu / alternatif / différents niveaux de tension et de fréquence) a conduit au développement de simulateurs dédiés, chacun utilisant des modèles et des méthodes de résolution spécifiques [1] [2] [3] [4]. Du fait de leur spécialisation, ces simulateurs évoluent difficilement pour intégrer des modèles de nouveaux matériels, tels que les dispositifs de stockage et de récupération d'énergie [5] [6]. Par ailleurs, le besoin d'outils d'optimisation et d'aide à la conception nécessite d'améliorer la robustesse et la fiabilité des simulateurs.

Le but du travail présenté ici est de construire un simulateur ferroviaire moderne polyvalent, robuste et évolutif. Pour cela, le concept de méta-modèles est exploité, afin de proposer une formulation générique des problèmes de réseaux ferroviaires. On peut alors développer un simulateur qui modélise naturellement les différents systèmes d'électrification et qui a la capacité d'intégrer facilement n'importe quel modèle de composant, y compris des composants définis *a posteriori*. La qualité de cette approche garantit la robustesse et l'évolutivité du nouveau simulateur.

Après quelques généralités sur la simulation ferroviaire, l'article présente la notion de méta-modèle et le principe de construction du simulateur. Des résultats de simulation valident les performances de l'approche proposée et mise en œuvre.

## 2. MODELISATION DES RESEAUX ELECTRIQUES FERROVIAIRES

Les principes de la simulation ferroviaire sont bien établis. Le but est d'établir la capacité d'un réseau d'installations donné à fournir l'énergie nécessaire à l'alimentation d'un trafic défini par une grille de circulation. Celle-ci est composée de l'ensemble des états de traction des trains circulant sur le réseau. Les simulateurs procèdent tous suivant le même schéma : résolution en pas à pas sur le temps des équations de la dynamique des trains couplées aux équations électriques du réseau, de façon à déterminer la puissance nécessaire à l'avancement des trains et les différentes grandeurs électriques. Si la puissance requise par le train dépasse celle effectivement disponible au niveau du pantographe, la vitesse de train doit être régulée, ce que ne permettent pas tous les simulateurs.

Les réseaux électriques ferroviaires sont habituellement modélisés sous la forme d'un bus représentant les éléments dits longitudinaux (caténaires, rails), auquel sont connectés en parallèle les éléments transversaux (sous-stations, trains, transformateurs). Cette approche limite la finesse de représentation des réseaux ferroviaires, car en pratique la structure du bus d'alimentation varie fortement le long des voies en fonction des installations présentes. De plus, le système se reconfigure en permanence, selon le déplacement des trains et l'état des équipements de mise en parallèle ou d'isolation de secteurs.

## 3. FORMULATION GENERIQUE DU PROBLEME

Nous avons choisi de modéliser le réseau ferroviaire par un circuit électrique dont la topologie et les caractéristiques évoluent au cours du temps. La construction automatique du circuit s'appuie sur la théorie des graphes [7], associée à une représentation générique des différents types de composant du réseau : sous-station, caténaire, train... Cette généricité permettra d'intégrer facilement de nouveaux modèles de composants, définis a posteriori. Pour cela, un méta-modèle de composant a été créé : il s'agit d'un modèle abstrait qui établit une syntaxe commune pour définir l'ensemble des modèles de composants Ce méta-modèle défini les propriétés de connectivité qui permettent de construire à chaque instant le graphe des relations entre les composants du réseau, ainsi que par les patrons des méthodes qui seront utilisées pour remplir la matrice et le terme source associés au problème.

La Fig. 1 montre un exemple de réseau élémentaire, composé d'un train (E8) qui se déplace sur des rails (E4-E5) en étant alimenté par deux sous-stations (E1, E6) via les caténaires (E2-E3).

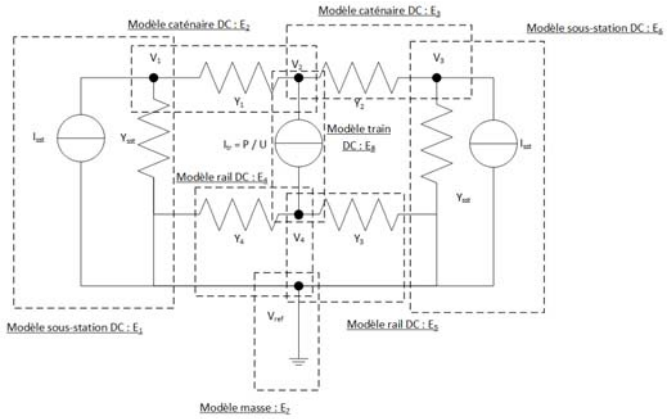


Fig. 1. Exemple de réseau ferroviaire élémentaire avec un seul train

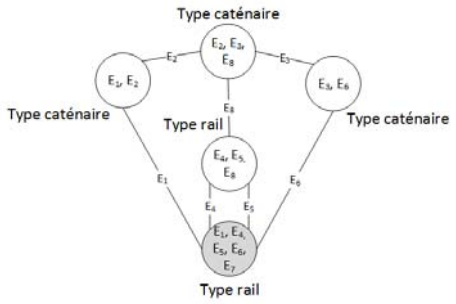


Fig. 2. Graphe des relations entre composants du réseau de la Fig. 1. Les arêtes correspondent aux modèles de composants et les sommets aux connexions entre composants, de type "caténaire" ou "rail".

La Fig. 2 donne le graphe des relations associé au réseau de la Fig. 1 : les arcs correspondent aux composants, et les sommets aux relations entre deux composants ou plus.

Le graphe de relation est construit dynamiquement en partant des composants : les informations de position et les propriétés de connectivité de chacun sont utilisées pour construire les connexions qui peuvent s'établir entre eux. Il faut souligner ici que ce sont les propriétés du méta-modèle qui interviennent. Cela signifie que si l'on implante ultérieurement un nouveau type de composant, il suffira de renseigner ses propriétés de connectivité pour qu'il hérite des mécanismes de construction du graphe des relations.

Une fois la topologie du circuit établie, les grandeurs électriques sont calculées par analyse nodale modifiée [8]. Les inconnues sont les potentiels aux nœuds, ainsi que les courants liés **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** et le système à résoudre est de la forme :

$$A.X = b(X) \qquad (1)$$

où $A$ représente la matrice d'impédance du circuit, $X$ est le vecteur des inconnues et $b$ le second membre, lié aux tensions d'alimentation des sous-stations et aux puissances des trains ou de certains éléments tels que les survolteurs. La matrice d'admittance et le terme source sont complétés grâce aux méthodes génériques du méta-modèle, particularisées pour chaque type de composant. Là encore, cette architecture logicielle est conçue pour garantir la possibilité d'intégrer facilement de nouveaux composants.

La résolution du système non linéaire (1) est faite à l'aide de la bibliothèque de calcul numérique parallèle Petsc [9], qui propose une large palette de méthodes éprouvées et que nous avons testées lors de la validation du solveur.

## 4. Exemples de resultats

Le simulateur a été mis en œuvre pour les systèmes d'alimentation 1500 V DC, puis 1x25 kV 50 Hz. L'efficacité de l'approche générique a ainsi pu être vérifiée et le solveur testé. Le 2x25 kV est en cours d'implantation. De nombreuses simulations ont été faites, mais nous ne montrons ici qu'un cas-test 1500 V DC constitué d'une ligne à deux voies, 8 sous-stations, avec un trafic de 6 trains. Cet exemple, ainsi que d'autres, seront présentés plus en détail dans l'article complet.

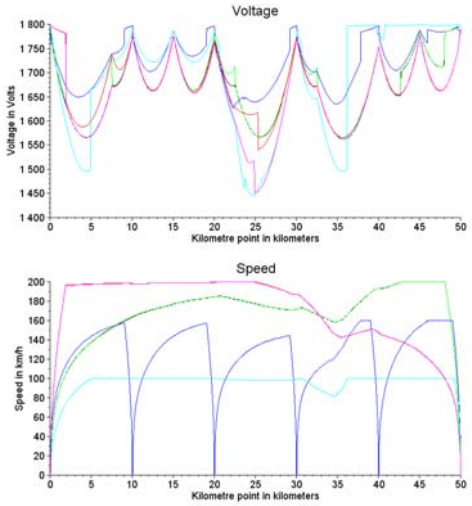


Fig. 3. Profil de tension au pantographe et profil de vitesse des différents trains du trafic simulé (alimentation 1500 V DC)

## 5. References


[1] M. Baohua, J. Wenzheng, C. Shaokuan, et L. Jianfeng, « A computer-aided multi-train simulator for rail traffic », in *Vehicular Electronics and Safety, 2007. ICVES. IEEE International Conference on*, 2007, p. 1–5.

[2] T.K. Ho, B.H. Mao, Z.Z. Yuan, H.D. Liu, Y.F. Fung, "Computer simulation and modeling in railway applications", *Computer Physics Communications*, Volume 143, Issue 1, 1 February 2002, Pages 1-10.

[3] C. J. Goodman, L. K. Siu, et T. K. Ho, « A review of simulation models for railway systems », in *International Conference on Developments in Mass Transit Systems 1998*, 1998, vol. 453.

[4] A. Finlayson, C. J. Goodman, et R. D. White, « Investigation into the computational techniques of power system modelling for a DC railway », *Computers in Railways X*, 2006, vol. 1, p. 735-745.

[5] C. H. Bae, « A simulation study of installation locations and capacity of regenerative absorption inverters in DC 1500V electric railways system », *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 17, n° 5, p. 829-838, mai 2009.

[6] A.-L. Allegre, A. Bouscayrol, P. Delarue, P. Barrade, E. Chattot, et S. El-Fassi, « Energy Storage System With Supercapacitor for an Innovative Subway », *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no 12, p. 4001-4012, déc. 2010.

[7] P. Arboleya, G. Diaz, et M. Coto, « Unified AC/DC Power Flow for Traction Systems: A New Concept », *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, n° 6, p. 2421-2430, juill. 2012.

[8] C.-W. Ho, A. E. Ruehli, et P. A. Brennan, « The modified nodal approach to network analysis », *Circuits and Systems, IEEE Transactions on*, vol. 22, n° 6, p. 504–509, 1975.

[9] http://www.mcs.anl.gov/petsc