Modélisation générique de réseaux électriques ferroviaires

Boris Desjouis, Florence Ossart, Soha Saad, Jean Bigeon, Etienne Sourdille

▶ **To cite this version:**

Boris Desjouis, Florence Ossart, Soha Saad, Jean Bigeon, Etienne Sourdille. Modélisation générique de réseaux électriques ferroviaires. 2nd Symposium de Génie Électrique (SGE 2016), Jun 2016, Grenoble, France. hal-01361582

HAL Id: hal-01361582
https://hal.science/hal-01361582

Submitted on 7 Sep 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modélisation générique de réseaux électriques ferroviaires

Boris Desjouis[1,2,3], Florence Ossart[2,] Soha Saad[1], Jean Bigeon[1], 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 et de systèmes multi-agents, 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; ingénierie dirigée par les modèles; systèmes multi-agents

1. INTRODUCTION

Le dimensionnement et l'exploitation des infrastructures électriques ferroviaires s'appuient sur des simulateurs résolvant les équations électriques du réseau d'alimentation couplées aux équations dynamiques de déplacement des trains [1]. La longévité des infrastructures a conduit à la coexistence de différents systèmes d'électrification, reflet de l'histoire de l'évolution des technologies et des choix stratégiques des états. C'est ainsi que le TGV Paris-Grenoble passe successivement par des portions de réseau électrifiées en DC 1500 V (ligne conventionnelle Paris Sud), puis AC 2x25 kV (ligne grande vitesse) et AC 1x25 kV (ligne conventionnelle Lyon-Grenoble). Il en est de même dans les autres pays, qui ont pu faire d'autres choix techniques (AC 16,7 Hz en Allemagne et dans d'autres pays du nord, par exemple).

Avec la construction de l'Europe, la tendance est à la standardisation des systèmes, mais l'importance des investissements en jeu fait que celle-ci concerne essentiellement les nouvelles lignes. Pour les lignes anciennes, la modernisation est très progressive et la problématique est plutôt d'exploiter au mieux les infrastructures en place. Cela peut passer par le renforcement des systèmes existants [2] [3] ou par l'amélioration de l'efficacité énergétique du réseau grâce à des dispositifs de récupération et de stockage d'énergie bien gérés [4] [5] [6] [7]. De nombreux travaux portent également sur l'optimisation du flux des trains sur la base de critères énergétiques (éco-conduite et synchronisation [8] [9]).

Quelle que soit la problématique étudiée, il est nécessaire de disposer d'un outil de simulation du réseau électrique ferroviaire afin d'étudier ses performances et sa capacité à fournir l'énergie électrique requise par les trains. Par rapport à un réseau de distribution classique, un réseau ferroviaire se caractérise par des charges de forte puissance mobiles, une topologie de ligne fortement variable dans l'espace et le temps, et une exploitation du système beaucoup plus près de ses limites physiques, que ce soit pour des raisons structurelles (zone difficile à raccorder au réseau national) ou conjoncturelles (panne ou maintenance d'équipement). Il en résulte des chutes de tension localement importantes, avec des normes très différentes de celles des réseaux de distribution publics. Par exemple, dans le cas du système AC 25 kV, les normes imposent une tension moyenne utile supérieure à 22,5 kV, avec une valeur instantanée comprise entre 19 et 27,5 kV, pouvant même descendre jusque 17,5 kV pendant une durée inférieure à 2 minutes. Ces particularités nécessitent de modéliser précisément les détails de la topologie du réseau et de réaliser un couplage entre les équations de circuit électrique et celles régissant la dynamique des trains.

L'existence de nombreux systèmes d'électrification a conduit au développement de simulateurs dédiés, utilisant chacun des modèles et des méthodes de résolution spécifiques [10] [11] [12]. 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. Par ailleurs, le développement d'outils d'optimisation et d'aide à la conception doit s'appuyer sur des simulateurs ferroviaires robustes, rapides, fiables et faciles à interfacer.

L'objectif du travail présenté ici est de développer de tels simulateurs, polyvalents et évolutifs, en exploitant les méthodes de l'ingénierie logicielle développées pour les systèmes complexes. Une architecture logicielle originale et efficace est proposée en s'appuyant sur une démarche d'ingénierie dirigée par les modèles associée à un modèle multi-agents. *L'apport de ce travail est de proposer non pas un simulateur particulier (code de calcul), mais un modèle abstrait de simulateur (modèle de code de calcul) utilisé pour générer rapidement le simulateur associé à n'importe quel réseau électrique ferroviaire défini par ses modèles de composants et leurs interactions.* Ce niveau d'abstraction permet de définir et programmer les modèles de composants *a posteriori* : il devient alors très simple d'implanter de

nouveaux modèles de composants (amélioration de la modélisation de l'existant), des modèles de nouveaux composants (modélisation de nouveaux matériels, comme le stockage ou les sous-stations réversibles), voire de nouvelles technologies de distribution électrique (introduction d'un feeder en DC, par exemple). On peut également étendre le domaine des comportements modélisés, en intégrant par exemple des modules de calcul thermique ou d'optimisation.

L'article commence par rappeler les principes généraux de la simulation ferroviaire. Il présente ensuite les concepts de l'ingénierie dirigée par les modèles et des systèmes multi-agents qui ont conduit à l'architecture proposée pour réaliser des simulateurs polyvalents, robustes, évolutifs et ouverts. Cette architecture est mise en œuvre dans le cas d'un système DC et, 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. Ce trafic regroupe un certain nombre de trains exécutant des missions, définies chacune par un ensemble de points (arrêts et points de passage) et des temps de trajet entre ces points. A partir de ces données, on établit la marche du train, c'est à dire l'ensemble des consignes que le conducteur appliquera au cours du trajet (accélération, maintien de vitesse, marche sur l'erre, freinage). Chaque train en circulation prélève sur le réseau électrique la puissance nécessaire à la réalisation de sa mission, mais si la puissance effectivement disponible est insuffisante le train ne peut atteindre la vitesse attendue, entraînant de fait un décalage entre la mission prévue et la mission réalisée. Il faut alors réviser le trafic, puisque celui-ci dépasse les capacités d'alimentation du réseau considéré.

Les simulateurs procèdent quasiment toujours 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 qui en découlent. Tant que la puissance requise par les trains ne dépasse pas celle effectivement disponible sur le réseau, cela se traduit par un couplage faible : l'état électrique du système est calculé à partir de son état mécanique sans rétroaction. En revanche, quand la puissance demandée par les trains ne peut être satisfaite, celle-ci doit être régulée, entrainant un couplage fort entre les équations dynamiques et les équations de circuit : l'état mécanique agit sur l'état électrique et réciproquement, ce que certains simulateurs ne prennent pas en compte.

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). Ces simulateurs sont souvent réalisés via des macro-composants électriques paramétrés de façon à représenter au mieux la réalité : par exemple, un poste de sectionnement pourra être modélisé par une impédance très grande et au contraire un poste de mise en parallèle entre caténaires par une impédance très petite. Ces artifices permettent de garder une topologie de circuit fixe tout au long de la simulation, mais génèrent des matrices d'impédance potentiellement mal conditionnées du fait des valeurs numériques extrêmes de certains éléments. Par ailleurs, la puissance de description du simulateur est limitée par le choix des macro-éléments, ce qui rend difficile l'introduction de nouveaux composants très différents. Soulignons enfin qu'il faut modéliser le fait que 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.

Pour une représentation la plus fidèle possible du système physique, nous avons choisi de modéliser le réseau ferroviaire par un *circuit électrique dont la topologie et les caractéristiques évoluent au cours du temps en fonction de l'avancement des trains*. Ce circuit est le résultat des interactions entre les différents éléments qui le composent. L'architecture du simulateur élaboré est décrite dans la section qui suit. Elle est fondée sur une approche d'ingénierie dirigée par les modèles associée à un modèle de système multi-agents.

3. ARCHITECTURE D'UN SIMULATEUR FERROVIAIRE EVOLUTIF

3.1. Ingénierie dirigée par les modèles et métamodélisation

L'ingénierie dirigée par les modèles (IDM) est une forme d'ingénierie générative dans laquelle tout ou partie d'une application informatique est engendrée à partir de modèles de cette application. Il s'agit de modéliser le processus de conception et de codage que suit traditionnellement un ingénieur afin qu'il soit automatiquement reproduit par une machine. On diminue alors significativement les temps de développement des différentes versions d'une application, en particulier pour l'adapter à différentes plateformes d'exécution, tout en augmentant la fiabilité du processus.

L'IDM est basée sur le concept de *méta-modèle*, c'est-à-dire de "modèle de modèle". Les définitions suivantes sont données dans [13]. *"Un modèle est une abstraction d'un système, modélisé sous la forme d'un ensemble de faits construits dans une intention particulière. Un modèle doit pouvoir être utilisé pour répondre à des questions sur le système modélisé". "Un méta-modèle est un modèle qui définit le langage d'expression d'un modèle, c'est-à-dire le langage de modélisation"*. Dans notre cas, le système modélisé est un réseau ferroviaire; le modèle est le simulateur de réseau; le méta-modèle décrit comment construire le simulateur à partir des données qui décrivent le réseau. Dans le cas de l'ingénierie dirigée par les modèles, les données sont les caractéristiques physiques des différents éléments du réseau ferroviaire (lignes, infrastructures, trains), mais aussi leurs modèles de comportement (par exemple, relation courant-tension d'une sous-station ou d'un train). En termes simplifiés, on peut dire que dans un simulateur classique les processus de simulation sont codés « en dur » : les méthodes de construction et de résolution du problème sont prédéfinies. Pour cela, on utilise des modèles-types paramétrés afin d'étendre leur pouvoir de description, mais dès que la limite du modèle est atteinte, il faut recoder en dur les extensions. L'ingénierie par les modèles introduit un niveau d'abstraction supplémentaire : le simulateur n'est plus codé en dur, mais réalisé par assemblage dynamique des modèles nécessaires (et seulement ceux-là). Le méta-modèle décrit le procédé de construction d'un simulateur à partir des modèles qui le composent.

Une technique efficace de méta-modélisation est la mise en place d'un système multi-agents. Les agents réagissent à des stimuli (données et modèles de composants ferroviaires) pour créer le simulateur. Dans notre cas, ils savent comment construire la matrice d'admittance du circuit, puis appeler les

bons algorithmes de résolution, gérer l'avancement des trains, écrire les données de sortie... Ceci passe par une spécification amont abstraite mais très précise des interfaces et des rôles des agents, mais l'avantage est qu'on peut alors coder un nouveau modèle ferroviaire sans avoir besoin de connaître le fonctionnement interne du simulateur, du moment que l'on respecte le formalisme du méta-modèle.

Pour atteindre l'objectif visé, la modélisation du simulateur doit être suffisamment générale (abstraite) pour décrire l'ensemble des simulateurs de réseau, indépendamment des aspects technologiques liés en particulier au type de système d'électrification. Il faut donc analyser le système et définir les concepts fondamentaux qui seront utilisés par le méta-modèle.

Un réseau électrique ferroviaire peut être défini comme un ensemble d'éléments (sous-stations, trains, caténaires, rails, ...) connectés entre eux en fonction de la position qu'ils occupent et selon des règles propres à chaque type d'élément. Outre la notion d'élément, apparaît la notion de polarité, qui va permettre de préciser les relations que chaque élément peut établir : dans un système DC classique ou AC 1x25 kV, on peut définir un pôle "positif" et un pôle "neutre" (c'est-à-dire relié à la masse); une caténaire se connecte entre deux pôles positifs, un rail se connecte entre deux pôles neutres, une sous-station ou un train se connectent entre un pôle positif et un pôle neutre. Dans un système 2x25 kV, il faut introduire un troisième pôle, "négatif". Les sous-stations et les autotransformateurs se connectent alors entre les trois types de pôles. Il faut également pouvoir décrire le réseau ferré (lignes et voies interconnectées) ainsi que l'évolution dynamique des trains en fonction de la grille de circulation.

Le rôle du méta-modèle est de formaliser (modéliser) les différents concepts nécessaires à la description du simulateur ferroviaire, puis de définir les relations entre ces concepts. L'analyse des mécanismes en jeu dans la simulation ferroviaire montre qu'il faut traiter différentes problématiques, et donc construire le modèle associé à chacune. A cet effet, nous introduisons le concept de VUE, qui correspond au modèle associé à une problématique particulière. Le simulateur sera le résultat de l'assemblage d'un certain nombre de VUEs qui interagissent et collaborent pour réaliser la simulation. En l'état actuel des choses, quatre VUEs sont utilisées : représentation du réseau ferré, représentation du circuit électrique, représentation de l'évolution dynamique des trains, représentation des résultats de simulation. Ce nombre n'est pas limitatif car les différentes VUEs sont construites suivant un modèle commun qui pré-établit leur structure et leurs relations (modèle Agent-Groupe-Rôle, présenté dans la section suivante) de façon à pouvoir les construire dynamiquement suivant un modèle également pré-établi. Ce sont ces mécanismes d'abstraction (méta-modélisation) issus de l'ingénierie dirigée par les modèles qui vont permettre de générer des simulateurs évolutifs et robustes, capables d'intégrer n'importe quel nouveau modèle de composant ou de système, du moment qu'il est conforme aux méta-modèles implantés.

3.2. Systèmes multi-agents et modèles AGR

Nous avons choisi de modéliser un simulateur de réseau ferroviaire comme un système multi-agents, c'est-à-dire comme un ensemble d'entités fonctionnelles en interaction, suivant le paradigme de programmation orientée agent. Des modèles d'interaction sont définis *a priori* et l'organisation des agents se construit dynamiquement lors de la mise en œuvre d'un système particulier.

Le mode d'organisation choisi correspond au modèle Agent/Groupe/Rôle (AGR). Nous reprenons ci-dessous des définitions extraites de [14]. *Un* agent *est une entité autonome communicante qui joue des rôles au sein de différents groupes. Un* groupe *est un ensemble d'agents partageant des caractéristiques communes, un contenant pour un ensemble d'activités. Le* rôle *est une représentation abstraite d'une fonction, d'un service ou d'une identification d'un agent au sein d'un groupe particulier. Chaque agent peut avoir plusieurs rôles, un même rôle peut être tenu par plusieurs agents, et les rôles sont locaux aux groupes. Notons enfin que les groupes peuvent se recouper librement.*

Notre approche consiste à spécifier chaque VUE du système "réseau électrique ferroviaire" grâce à une implémentation particulière du méta-modèle AGR. Pour cela, nous devons définir quel type particulier d'interactions régit le fonctionnement du système pour la VUE considérée, afin d'établir un rôle commun au sous-ensemble des éléments du système actifs dans cette VUE. Ce rôle servira de base à l'implémentation du modèle AGR de la vue associée. Un élément du système électrique ferroviaire correspond à un agent et peut alors jouer les rôles proposés par les différentes implémentations du méta-modèle AGR, caractérisant chacune une VUE. Cette notion d'élément est à ce stade très abstraite et peut correspondre à des composants physiques (sous-station, train, ...) ou non (timer de simulation, zone à vitesse limitée, ...). Notre démarche de modélisation s'oriente alors vers la définition du rôle que doivent jouer les différents éléments du système pour traiter les problématiques associées aux différentes VUEs. La définition d'un rôle devra répondre à deux questions.

i. Quelles caractéristiques doivent avoir les agents pour s'insérer dans la représentation d'une VUE ? Par exemple, quelles propriétés doivent avoir les éléments pour permettre la modélisation électrique d'un circuit ?
ii. Quelles actions doivent mettre en œuvre les agents pour résoudre la problématique associée à une VUE ? Par exemple, comment calculer les grandeurs électriques dans le circuit à partir d'agents indépendants ?

3.3. Principes de l'architecture proposée

Nous définissons alors un SIMULATEUR comme un ensemble d'ELEMENTS en interaction au sein d'un système observé selon différents points de VUE. L'objet simulateur doit coordonner l'utilisation des VUES les unes par rapport aux autres. Il faut par exemple évaluer l'état électrique du circuit avant de calculer le déplacement des trains. Le simulateur est donc le contrôle central des VUEs. Pour garantir une certaine autonomie des éléments, nous devons leur permettre de communiquer avec ce contrôle centralisé pour activer l'une ou l'autre des VUEs et utiliser leurs représentations ainsi que leurs méthodes. Nous mettons pour cela en œuvre une inversion de contrôle (IOC en anglais) des modèles d'éléments vers le simulateur de manière à rendre ceux-ci autonomes et proactifs. Le diagramme UML de la Fig. 1 schématise le méta-modèle de simulateur proposé, et les interfaces nécessaires à l'implantation des modèles AGR associés aux différentes VUEs.

Rappelons que les modèles d'éléments sont définis *a posteriori* afin de conserver une certaine évolutivité dans le processus de simulation. Concrètement, le simulateur pourra faire appel aux modèles des éléments dans le cadre défini par les rôles associés aux VUES. Chaque modèle pourra quant à lui disposer de l'ensemble du simulateur. Cet article ne donne

pas davantage de détails sur l'implantation des principes décrits ici et le lecteur curieux est invité à se référer à la thèse de B. Desjouis [15].

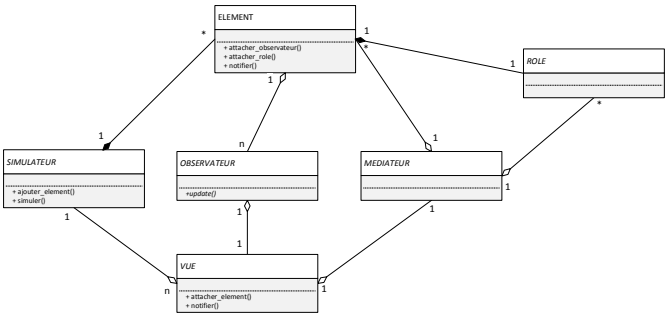

Fig. 1 : Diagramme UML simplifié du méta-modèle de simulateur

4. APPLICATION A LA GENERATION D'UN SIMULATEUR

Dans cette section, la démarche proposée est mise en œuvre pour assembler un simulateur à partir des modèles des différentes installations qui le composent. Les concepts sont présentés dans le cadre d'un système DC, mais ils sont généraux et s'appliquent aux autres types de systèmes d'électrification : il suffira de décrire les modèles de composants de chaque système.

4.1. Description du système

Un réseau ferré est constitué de lignes comprenant chacune un certain nombre de voies, éventuellement variable dans l'espace. Des sous-stations régulièrement réparties le long des voies alimentent le réseau électrique ferroviaire depuis le réseau public. La puissance électrique est acheminée vers les trains par les caténaires (une par voie) et les rails ferment le circuit. Un certain nombre d'équipements permettent de gérer les flux de puissance. Les postes de mise en parallèle, par exemple, permettent de réduire la résistance globale du circuit en mettant plusieurs caténaires en parallèle quand c'est possible. Les liaisons transversales agissent de même au niveau des rails.

La Fig. 2 montre un exemple de réseau très simple, avec une ligne comportant deux voies, une sous-station au point kilométrique PK0, un train sur la voie 1 au PK 3, une liaison transversale entre rails au PK5, un poste de mise en parallèles des caténaires au PK 7 et un poste de sectionnement au PK10. La Fig. 3 donne le schéma électrique associé, résultat de l'assemblage des différents éléments. A la position considérée, le train est soumis à une consigne de marche qui détermine la puissance électrique appelée. L'enjeu de la simulation est de décrire le système, de déterminer les grandeurs électriques et l'avancement du train au cours du temps en fonction des efforts résistifs qui s'exercent sur le train et de la puissance électrique que le réseau peut effectivement fournir au train.

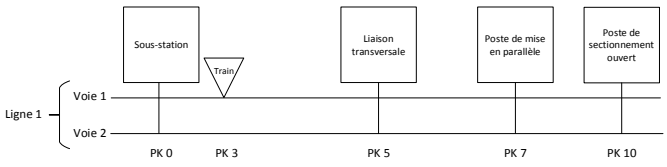

Fig. 2 : Schématisation d'une ligne ferroviaire à deux voies

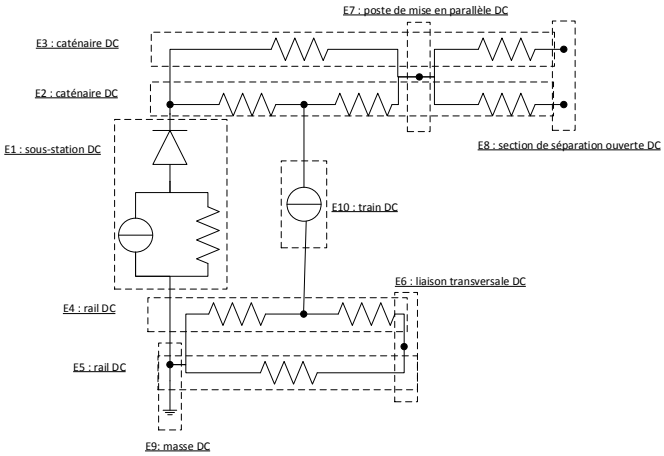

Fig. 3 : Modélisation de type circuit du réseau électrique de la Fig. 2

4.2. Vue réseau

L'objectif de la vue "réseau" est de permettre de localiser les différents éléments les uns par rapport aux autres, indépendamment de leur nature de manière à assurer le maximum d'évolutivité possible. Cette vue doit aussi fournir un outil efficace pour déterminer l'ensemble des éléments situés en un même point du réseau et susceptibles d'interagir (création de nœuds électriques, application d'une limite de vitesse, ...).

La représentation du réseau passe par la localisation des éléments qui le constituent. Ces éléments incluent les équipements électriques, mais aussi des informations liées au profil des voies ou aux limitations de vitesse. De manière standard, un élément peut être localisé au sein d'un réseau ferroviaire à partir de trois types d'informations : ligne(s) d'appartenance, voie(s) d'appartenance relative à une ligne, points kilométriques de début et de fin de l'élément.

La Fig. 4 montre un exemple de réseau et la nomenclature utilisée pour référencer les positions des différents éléments. Le réseau est constitué de deux lignes L1 et L2; la ligne L1 comporte deux voies référencées L1,V1 et L1,V2. Une sous-station est située aux PK34 des voies L1,V1 et L1,V2 de la ligne L1, et au PK50 de la voie L2,V1 de la ligne L2. A l'instant considéré, un train se situe au PK10 de la voie L1,V1 de la ligne L1. Enfin, une limitation de vitesse s'applique entre les PK0 et PK40 de la voie L1,V1 de la ligne L1. Les trois éléments (sous-station, train, limitation de vitesse) disposent d'une base commune pour définir leur position.

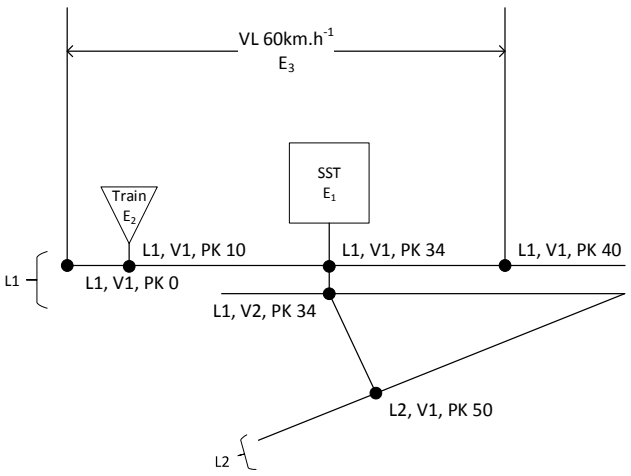

Fig. 4 : Positionnement de trois éléments de natures différentes sur un réseau

Outre fournir un système de coordonnées commun, la vue réseau doit répondre efficacement au problème de détermination du voisinage d'un élément : tout élément doit pouvoir interroger la vue réseau pour connaître les éléments qui interagissent avec lui. Par exemple, le train a besoin de connaître la limitation de vitesse qui s'applique à la voie sur laquelle il circule. Pour cela, les notions de ligne et de voie doivent exister indépendamment de la notion d'élément.

Le rôle associé à la vue réseau consiste à gérer les positions des différents éléments au sein du réseau. Le résultat est qu'une voie peut communiquer tous les éléments qui lui sont associés tandis qu'un élément peut fournir les voies sur lesquelles il se situe. On peut alors déterminer dynamiquement tous les éléments qui sont situés au même endroit et susceptibles d'interagir.

4.3. Vue électrique

La vue électrique a pour rôle de déterminer les grandeurs électriques dans le système à un instant donné. Pour cela, elle s'appuie sur la vue réseau pour construire le système d'équations électriques associé au circuit d'alimentation ferroviaire puis elle le résout.

4.3.1. Analyse modale modifiée

Les grandeurs électriques du circuit sont calculées par analyse nodale modifiée [17]. Cette méthode met en œuvre la loi des nœuds sur l'ensemble du circuit, tout en prenant en compte d'éventuelles contraintes de différence de potentiel imposée entre nœuds. Elle aboutit à un système d'équations en général non linéaire, dont les inconnues sont les potentiels aux nœuds, ainsi que les courants associés aux contraintes en tension. L'application de la méthode au circuit de la Fig. 5 illustre la construction du système d'équations à partir des éléments, telle qu'elle est implantée dans la vue électrique.

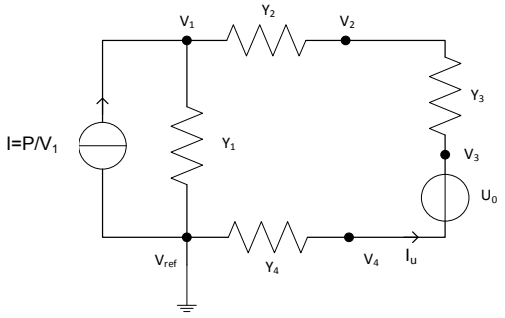

Fig. 5: Analyse nodale modifiée : exemple d'application

Le circuit comporte un nœud de référence, où le potentiel est nul, et quatre nœuds dont les potentiels $(V_i)_{i=1,4}$ sont à déterminer. Le circuit comporte une source de tension entre les nœuds 3 et 4, ce qui introduit comme inconnue supplémentaire I_u, qui est le courant traversant la source. Le système d'équations se met sous forme matricielle donnée par l'équation (1), où X est le vecteur des cinq inconnues, A est une matrice 5×5 construite à partir des admittances des différents éléments du circuit et des contraintes en tension, et b le second membre, lié aux sources.

$$A.X = b(X) \tag{1}$$

Le remplissage de la matrice A et du second membre b se fait composant électrique par composant électrique. Une admittance Y_{ij} connectée entre deux nœuds i et j contribue à quatre termes de la matrices selon les relations (2).

$$\begin{cases} A_{ii} = A_{ii} + Y_{ij} \\ A_{jj} = A_{jj} + Y_{ij} \end{cases} \quad \begin{cases} A_{ij} = A_{ij} - Y_{ij} \\ A_{ji} = A_{ij} - Y_{ij} \end{cases} \tag{2}$$

Une source de puissance P connectée entre deux nœuds i et j est modélisée par une source de courant dont l'intensité dépend de la différence de potentiel à ses bornes. Ce type d'élément contribue au second membre suivant les relations (3).

$$\begin{cases} b_i = b_i + \frac{P}{V_i - V_j} \\ b_j = b_j + \frac{P}{V_j - V_i} \end{cases} \tag{3}$$

Une contrainte en tension entre les nœuds i et j s'exprime sous la forme $V_i - V_j = \Delta V_{ij}$ et se traduit par un courant dans la branche ij, orienté par exemple du nœud j vers le nœud i, et qu'il faut déterminer. Soit c, l'indice de ce courant dans le vecteur du second membre. La contrainte $V_i - V_j = \Delta V_{ij}$ constitue alors l'équation $n°c$ du problème, alors que le courant est injecté aux nœuds i et j. Avec ces conventions, le remplissage du problème s'effectue comme indiqué par les formules (4).

$$\begin{cases} A_{ci} = 1 & A_{cj} = -1 & b_c = \Delta V_{ij} \\ A_{ic} = 1 & A_{jc} = -1 \end{cases} \tag{4}$$

Pour les composants connectés à la masse, il suffit d'ignorer les termes correspondant à ce nœud particulier. Pour l'exemple considéré, le problème matriciel final est donné par (5). C'est un système non linéaire puisque le second membre dépend des inconnues.

$$\begin{pmatrix} Y_1 + Y_2 & -Y_2 & 0 & 0 & 0 \\ -Y_2 & Y_2 + Y_3 & -Y_3 & 0 & 0 \\ 0 & -Y_3 & Y_3 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & Y_4 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ I_u \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{P}{V_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ U_0 \end{pmatrix} \tag{5}$$

Cet exemple montre que les équations de circuit sont faciles à construire automatiquement, sous réserve de disposer de la liste des nœuds auxquels chaque composant est connecté. Le composant peut alors placer sa contribution dans la matrice globale et le second membre du système. On conçoit aisément qu'il sera facile d'implanter n'importe quel modèle de comportement du moment qu'il se présente sous la forme d'une certaine relation entre courant et tension aux bornes du composant. La difficulté réside donc essentiellement dans la détermination des nœuds à partir des informations sur la nature et l'emplacement des composants du réseau.

4.3.2. Graphe des relations électriques entre éléments

Le système d'équations est construit à partir d'un graphe qui représente les interactions électriques entre les différents composants électrique du circuit ferroviaire (sous-stations, caténaires, trains, ...) [16]. Les branches du graphe correspondent aux composants, alors que les nœuds correspondent aux interactions entre composants. L'existence d'un nœud est liée à la présence, sur la même position, de composants qui ont été conçus pour se connecter ensemble. Par exemple, une sous-station est conçue pour être connectée entre une caténaire et un rail, mais il est nécessaire de distinguer les polarités. Une sous-station et une caténaire partageant une position commune forment un nœud dit de type "caténaire", alors qu'une sous-station et un rail forment un nœud dit de type "rail". De la même façon, deux caténaires peuvent être reliées par des nœuds de type "caténaire", deux

rails peuvent être reliés par des nœuds de type "rail", mais la connexion directe entre un rail et une caténaire n'est pas possible.

Le graphe est construit par les éléments électriques eux-mêmes, à partir des informations de position de chacun et d'attributs de connectivité, qui définissent les connexions que peut établir un élément avec ses voisins. Ces attributs sont les suivants :

- Types de connexions (notion de polarité)
- Nature : discrète (élément ponctuel comme une sous-station) ou continue (élément réparti comme une caténaire)
- Transversal : oui/non (caractérise la connectivité des postes de mise en parallèle ou des liaisons transversales)
- Effet mutuel : oui/non (prévu pour l'alternatif, afin de générer les nœuds nécessaires à la prise en compte des couplages par mutuel entre éléments longitudinaux)
- Séparateur : oui/non (caractérise la connectivité des séparateurs, qui isolent des secteurs de voies les unes des autres).

Les valeurs des attributs de connectivité des différents éléments font partie de leurs caractéristiques au même titre que les paramètres physiques (tels que l'impédance linéique d'une caténaire, par exemple) et sont indiquées dans les données d'entrée de la simulation.

A titre d'exemple, la Fig. 6 montre le graphe des relations associé au circuit de la Fig. 2. Les nœuds de type « caténaire » sont représentés par des cercles rouges et les nœuds de type « rail » par des cercles noirs. On peut vérifier que la sous-station E_1 et le train E_{10} sont connectés entre des nœuds "caténaire" et "rail" et que plusieurs nœuds "caténaires" se forment sur les caténaires E_2 et E_3. L'algorithme implanté permet de savoir quels éléments sont connectés à un nœud donné, et de manière duale quels nœuds sont formés par un élément donné.

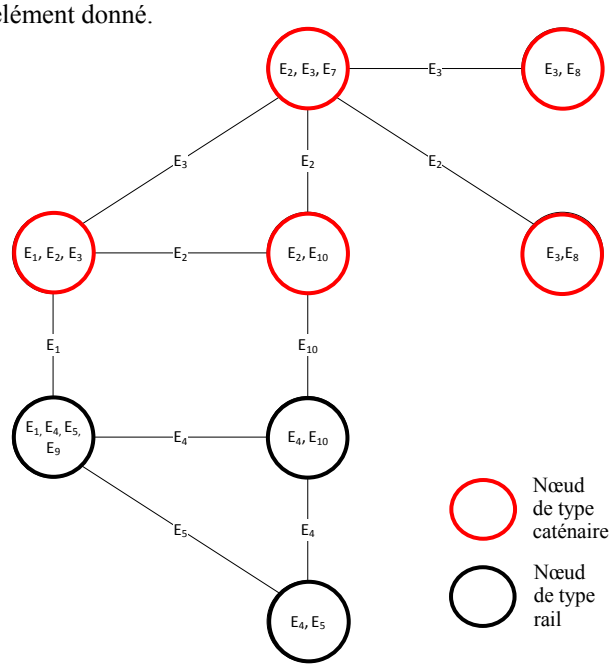

Fig. 6 : Exemple de graphe d'interactions électriques entre éléments

Certains éléments électriques représentent des objets qui se déplacent sur le réseau (trains) ou dont l'état modifie dynamiquement la topologie du circuit (diodes des sous-stations). Les événements liés à ces évolutions temporelles sont interprétés par le système, qui fait évoluer dynamiquement le graphe des interactions au cours de la simulation, en fonction des attributs précédemment définis et des informations de position et d'état des éléments électriques.

Il convient de souligner ici que les algorithmes de construction du graphe des relations utilisent des mécanismes suffisamment abstraits pour que les différents types de nœuds n'aient pas besoin d'être spécifiés « en dur » : ils feront partie des données d'entrée de la simulation. Par exemple, le système d'électrification 2x25 kV AC utilise trois types de connexion : « caténaire », « rail » et « feeder », qui pourraient tout aussi bien s'appeler « toto », « titi », « tata ». Ces informations sont fournies dans les données d'entrées, puis interprétées lors de la phase d'assemblage de la matrice d'admittance. C'est uniquement à ce niveau qu'il est nécessaire d'intervenir dans le code pour mettre en place un nouveau système d'électrification.

Ce mécanisme permet l'évolutivité des modèles ferroviaires à faible coût de développement, mais nécessite d'avoir bien prévu tous les mécanismes nécessaires à la construction du simulateur. Le découplage entre modèles ferroviaires et façon de construire le réseau constitue le fondement de notre approche IDM.

4.3.3. Récapitulatif sur le rôle de la vue électrique

La vue électrique a pour rôle ultime de déterminer les grandeurs électriques du circuit. Cela passe par la construction dynamique du graphe des interactions électriques, qui permet d'associer à chaque instant et à chaque élément les nœuds électriques auxquels il est connecté. Le système matriciel est ensuite construit, toujours élément par élément. La dernière opération concerne la résolution du système non linéaire est faite à l'aide de la bibliothèque de calcul numérique parallèle Petsc [18], qui propose une large palette de méthodes éprouvées et que nous avons testées lors de la validation du solveur [19]. Ces différentes opérations sont pilotées par la vue électrique.

4.4. Vue dynamique (au sens de la dynamique des trains)

Le train est l'élément central d'une simulation électrique ferroviaire. Son déplacement modifie le réseau électrique, tant par le positionnement des charges que par les puissances électriques qu'elles prélèvent. L'avancement du train est régi par une suite de consignes (vitesse, arrêt, marche sur l'erre) qui s'appliquent à des portions de voies, mais le déplacement effectif du train dépend de la puissance électrique disponible au niveau du pantographe. Simuler le déplacement des trains nécessite de réaliser un calcul en pas à pas sur le temps, et de résoudre à chaque instant l'équation de la dynamique des trains couplée aux équations de circuit du réseau électrique. Au cours de ce calcul, il est nécessaire de déterminer les pas de temps pertinents en se calant sur la dynamique des différents éléments. Il faut également reconfigurer la topologie du circuit électrique au fur et à mesure du déplacement des éléments. La gestion de tous ces aspects relève du rôle de la vue dynamique.

A chaque pas de temps de la simulation, l'interprétation de la consigne en vigueur à la position courante du train doit prendre en compte l'état du train, du réseau électrique et certaines contraintes extérieures. A titre d'illustration, supposons qu'à un instant donné le train soit soumis à une consigne de vitesse. Plusieurs situations sont alors possibles.

- Le train a une vitesse inférieure à la vitesse de consigne : il cherche alors à maximiser la puissance machine développée afin d'atteindre la vitesse de consigne le plus rapidement possible (phase de traction-accélération); l'accélération effectivement produite dépendra à la fois des efforts

extérieurs, des caractéristiques des moteurs électriques et de la puissance effectivement disponible le réseau.

- Le train a atteint la vitesse consigne : il applique alors l'effort nécessaire pour maintenir sa vitesse, soit en compensant les efforts résistifs (phase de traction maintien), soit en freinant s'il est en descente (phase de freinage maintien).
- Le train approche d'une zone de vitesse limite plus faible et doit anticiper (phase de freinage).

L'avancement du train est régi par la relation fondamentale de la dynamique (6) :

$$K_{train} \times M_{train} \times a = F_{jantes}(U_{train}, v) + F_{topographie}(x) + F_{avancement}(v) \quad (6)$$

avec les notations suivantes :

- a : accélération du train,
- M_{train} : masse statique du train,
- K_{train} : coefficient des masses tournantes, pondère la masse statique,
- $F_{topographie}(x)$: force liée à la pente et au rayon de courbure de la voie à la position courante du train x,
- $F_{résistance}(v)$: force de frottement, fonction de la vitesse du train v,
- $F_{jantes}(U_{panto}, v)$: force motrice, fonction de la vitesse v à puissance donnée et de la tension au pantographe U_{panto}.

Les modes « traction-accélération » et « traction-maintien » correspondent à différents mode de pilotage des engins moteurs, auxquels sont associés différents modèles de comportement $F_{jantes}(U_{panto}, v)$. Le couplage avec les équations de circuit intervient à ce niveau. Les modèles d'engin sont des modèles qualifiés internes à la SNCF et une contrainte forte est de les utiliser en boîte noire, sans aucun recodage. L'architecture de simulateur mise en place a permis de d'intégrer facilement ces programme de calculs unitaires dans chacun des modèles via une interface générique, et ce sans se préoccuper du reste du simulateur. C'est un des avantages de l'approche que nous proposons, qui sépare pleinement les préoccupations sur l'intégration d'un modèle de ses spécifications, ou des modifications ultérieures.

4.5. Autres Vues

D'autres vues peuvent être définies, mais cela nécessite de comprendre en détail l'architecture que nous avons mise en place. Citons en particulier la « vue de sortie » dédiée au post-traitement : écriture des résultats souhaités dans des fichiers, ou affichage graphique de différentes représentations des résultats. Dans le cadre de ce travail, cas nous nous sommes limités à des écritures dans des fichiers car la SNCF dispose de nombreux programmes de visualisation à partir de fichiers standardisés en interne.

5. EXEMPLES DE RESULTATS

5.1. Génération d'un simulateur 1500 V DC

Dans un premier temps, le méta-modèle a été mis en œuvre pour générer un simulateur de réseau 1500 V DC à partir des modèles des différents composants de ce type de système. Le processus de validation nécessite de vérifier d'une part la validité fonctionnelle des simulateurs générés (les résultats sont justes), d'autre part la capacité d'évolution des simulateurs (ajout facile de nouveaux modèles de composants). Le présent article est focalisé sur le premier point : à modèles équivalents, les résultats issus du nouveau simulateur doivent être identiques à ceux issus du simulateur historique de la SNCF, malgré les différences de représentation des circuits électriques (topologie dynamique, méthode nodale modifiée, méthodes numériques pour la résolution des équations de circuit et le traitement des non linéarités). L'objectif visé est une conformité totale des résultats, ou une explication irréfutable en cas d'éventuelles différences.

De nombreuses simulations de complexité croissante ont été réalisées et ont permis de valider le simulateur [15], mais nous ne montrons ici qu'un cas-test constitué d'une ligne à deux voies de 50 km de long, 8 sous-stations et un trafic de 6 trains (4 rapides, 1 train de banlieue et 1 train de fret). La configuration est testée en conditions nominales et en conditions dégradées, avec 5 sous-stations neutralisées.

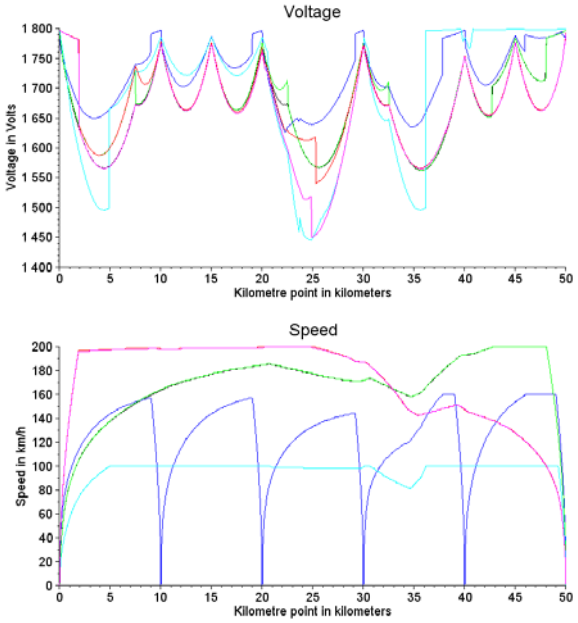

Fig. 7 : Tension au pantographe et vitesse des trains - conditions nominales.

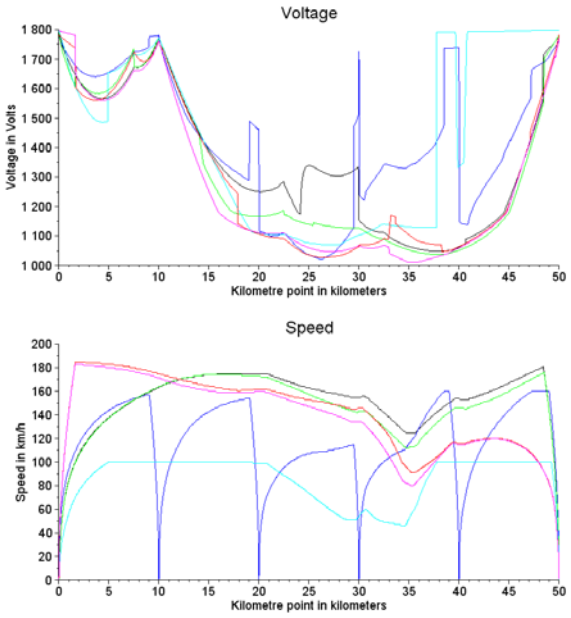

Fig. 8 : Tension au pantographe et vitesse des trains - conditions dégradées.

La Fig. 7 montre la tension au pantographe et la vitesse des différents trains en conditions nominales. La Fig. 8 montre clairement les conséquences d'une alimentation insuffisante : la tension au pantographe chute et la puissance transmise aux trains est insuffisante pour leur permettre d'atteindre leur vitesse de consigne. On se rapproche alors des limites physiques du réseau, avec des risques d'instabilité numérique qui nécessite des méthodes de calcul non linéaire robustes.

La comparaison entre résultats de l'ancien et du nouveau simulateur n'est pas toujours simple, car les différences de représentation peuvent conduire à des différences ponctuelles qui ne sont pas nécessairement significatives. La comparaison est donc faite sur la base de valeurs moyennes, et conduit à des écarts inférieurs à 2%, validant le nouveau simulateur. Ces résultats ont été détaillés dans [19].

5.2. Génération de simulateurs 1x25 kV AC et 2x25 kV AC

L'étape suivante est de générer des simulateurs pour d'autres systèmes d'électrification (1x25 kV AC et 2x25 kV AC). Le méta-modèle reste le même que précédemment et seuls les modèles des composants ont besoins d'être définis et codés. En particulier, il est nécessaire de passer en nombre complexe et de travailler en partie réelle et partie imaginaire afin d'obtenir un problème non linéaire dérivable et de pouvoir appliquer la méthode de Newton. Malgré des différences de modèle notables, les mécanismes d'assemblage des modèles de composants, et en particulier la gestion du graphe des interactions électriques, n'ont pas besoin d'être repris.

En l'état actuel des choses, la partie simulation en statique a été implantée et validée par des tests de complexité croissante que nous n'avons pas la place de développer ici. L'implantation des modèles de train est en cours et il sera alors possible de réaliser des simulations complètes, avec des trains en mouvement.

6. CONCLUSION

Cet article décrit une approche originale pour concevoir un modèle évolutif de réseau électrique ferroviaire : celle-ci s'inscrit dans une démarche d'ingénierie dirigée par les modèles, associée au paradigme de système multi-agents et au modèle Agent-Group-Role. L'idée sous-jacente est qu'une simulation consiste à faire interagir les différents composants du système pour réaliser les différentes tâches qui participent à la simulation. L'approche suivie, basée sur les modèles de composants, est dès le départ conçue pour intégrer des modèles définis a posteriori, de façon à assurer un maximum d'évolutivité du simulateur.

La démarche a été mise en œuvre pour générer un simulateur DC complet, lequel a été validée sur des cas d'études réels de la SNCF. Elle est en train d'être appliquée pour générer un simulateur AC, dont la partie statique a été validée.

Il faut noter qu'en l'état actuel des choses, la validation a porté sur des composants classiques et qu'il reste à montrer la puissance de notre approche pour effectivement intégrer des nouveaux modèles de composants.

7. REFERENCES

[1] 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.

[2] Aeberhard et al., « Railway traction power supply for the state of the art to future trends ». SPEEDAM 2010, 2010.

[3] Abrahamsson et al., « Optimal power flow (OPF) model with unified AC-DC load flow and optimal commintemnt for an AC-catenary railway power supply system fed by a HVDC transmission line ». 2012.

[4] L. Battistelli, F. Ciccarelli, D. Lauria, et D. Proto, « Optimal design of DC electrified railway stationary storage system », in *Clean Electrical Power, 2009 International Conference on*, 2009, p. 739–745.

[5] Bossi et al., « REV _ OIPE2014 - COMPEL - Bossi Pouget Retiere Gerbaud - OPF with Storage in DC Electrified Railways.pdf ». .

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

[7] 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 Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, n° 12, p. 4001‑4012, déc. 2010.

[8] M. Miyatake et H. Ko, « Optimization of Train Speed Profile for Minimum Energy Consumption », *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, vol. 5, n° 3, p. 263‑269, mai 2010.

[9] Kim and al, « A mathematical approach for reducing the maximum traction energy : the case of Korean MRT trains ». IMECS 2010, 2010.

[10] 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.

[11] T. K. Ho, B. H. Mao, Z. Z. Yuan, H. D. Liu, et Y. F. Fung, « Computer simulation and modeling in railway applications », *Comput. Phys. Commun.*, vol. 143, n° 1, p. 1‑10, 2002.

[12] A. Finlayson, C. J. Goodman, et R. D. White, « Investigation into the computational techniques of power system modelling for a DC railway », 2006, vol. 1, p. 735‑745.

[13] B. Combemale, « Ingénierie Dirigée par les Modèles (IDM) État de l'art », *Management*, p. 1–19, 2008.

[14] J. Ferber et A. Gutknecht, « Un méta-modèle organisationnel pour l'analyse, la conception et l'execution de systèmes multi-agents », in *Proceedings of Third International Conference on Multi-Agent Systems ICMAS*, 1998, vol. 98, p. 128–135.

[15] B. Desjouis, « Réalisation d'un simulateur évolutif, système multi-agents et approche dirigée par les modèles : application à la simulation électrique ferroviaire », Université Grenoble-Alpes, Grenoble, 2016.

[16] P. Arboleya, G. Diaz, et M. Coto, « Unified AC/DC Power Flow for Traction Systems: A New Concept », *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, n° 6, p. 2421‑2430, juill. 2012.

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

[18] « PETSc: Home Page ». [En ligne]. Disponible sur: https://www.mcs.anl.gov/petsc/. [Consulté le: 30-mars-2016].

[19] B. Desjouis, G. Remy, F. Ossart, C. Marchand, J. Bigeon, E. Sourdille, "A new generic problem formulation dedicated to electrified railway systems", in Proceedings of ESARS 2015 - DOI: 10.1109/ESARS.2015.7101437