

Vers la conception optimale d'une électrification ferroviaire

Olivier BOSSI

SNCF Innovation & Recherche, 40 Avenue des Terroirs de France, 75611 Paris Cedex 12
G2ELab, UMR 5529 BP 46 - 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex

olivier.bossi@sncf.fr

Résumé : Ces travaux visent à optimiser le coût sur cycle de vie d'une infrastructure électrique ferroviaire en déterminant le meilleur compromis entre les coûts d'investissement et le coût des pertes liées à l'exploitation de réseau. Un modèle quasi-statique du réseau électrique a été développé. Il intègre le cadencement des trains et le calcul des flux de puissance pour l'estimation des pertes. Un modèle économique simplifié a été utilisé pour calculer la section optimale de la ligne de contact ainsi que le positionnement des sous-stations. L'objectif de l'optimisation est d'avoir un coût minimal, tout en respectant certains critères normatifs. Les modèles développés ont permis d'utiliser un algorithme génétique pour l'optimisation.

1. Introduction

L'électrification des réseaux ferroviaires a permis d'améliorer leurs performances et de leur offrir une excellente compétitivité par rapport aux autres modes de transport. Ainsi, la traction ferroviaire électrique est aujourd'hui exploitée pour le transport urbain, régional, grande ligne et grande vitesse. Le dimensionnement des infrastructures d'électrification concerne principalement la caténaire et les sous-stations d'alimentation. Il est effectué pour les périodes de pointes du trafic par des études en simulation sur des logiciels comme ESMERALDA pour la SNCF [1].

Une évolution importante du trafic voyageurs est prévue dans les années à venir [2], ayant pour conséquence une demande énergétique croissante de la traction ferroviaire. Afin de répondre à cette nouvelle demande, une évolution des réseaux d'alimentation électrique ferroviaires est nécessaire. Dans ce contexte, il est envisagé une solution smart-grids, intégrant de nouveaux composants tels que de la production à base d'énergies renouvelables (éolien, hydraulique...), des éléments de stockage, ou des systèmes de conversion à base d'électronique de puissance [3] [4]. Cette évolution des réseaux électriques ferroviaires nécessite de nouvelles méthodes de conception capables de répondre aux problèmes soulevés par un niveau accru de complexité.

Dans ce cadre, nous proposons une approche de conception par optimisation. Grâce à une modélisation dédiée, elle prend en compte les éléments qui font la spécificité et la complexité du système ferroviaire : le cadencement des trains, la récupération d'énergie de freinage et les architectures particulières des réseaux

ferroviaires [5]. Les méthodes de modélisation et d'optimisation ont été appliquées sur un cas simplifié dans l'objectif de valider la méthodologie proposée. La première partie présente une méthode permettant d'écrire le modèle électrique du réseau ferroviaire. Elle prend en compte les caractéristiques topologiques de l'infrastructure et le déplacement des trains. Dans une deuxième partie, un modèle économique simplifié est présenté. Enfin, la troisième partie porte sur l'optimisation du problème. Ainsi, un algorithme génétique basé sur les théories de l'évolution [6] est employé pour déterminer la meilleure solution vis-à-vis du coût sur le cycle de vie de l'installation tout en respectant les contraintes d'exploitation.

2. Modélisation du système ferroviaire

Les réseaux d'alimentation ferroviaires présentent de nombreuses particularités vis-à-vis des réseaux électriques traditionnels. La plus remarquable est la mobilité des charges que constituent les trains. Cet aspect modifie la topologie du réseau et nécessite donc un modèle différent pour chacune des positions des trains. Ainsi, pour évaluer les pertes et l'évolution du plan de tension, le modèle du réseau ferroviaire doit pouvoir représenter successivement les circuits électriques correspondants aux différentes configurations.

2.1. Modélisation du réseau électrique

2.1.1. Principe méthodologique

Nous proposons une méthode qui permet de prendre en compte la mobilité des charges sur une ligne électrique.

Celle-ci consiste à discrétiser la ligne pour créer un nombre suffisant de nouveaux nœuds dits mobiles. Ces derniers permettent le raccordement de chacun des trains qui circulent sur la ligne. Lorsqu'un nombre suffisant de nœuds est créé pour permettre le raccordement de tous les trains, la topologie de la ligne peut alors être fixée. La méthodologie repose alors sur une modification des valeurs des impédances afin de prendre en compte le déplacement des charges mobiles. Ces impédances, ainsi que les nœuds de raccordement correspondant aux différents trains, sont donc calculés en fonction de la position des trains. Cette méthodologie est décrite dans les paragraphes suivants, au travers d'un exemple simple.

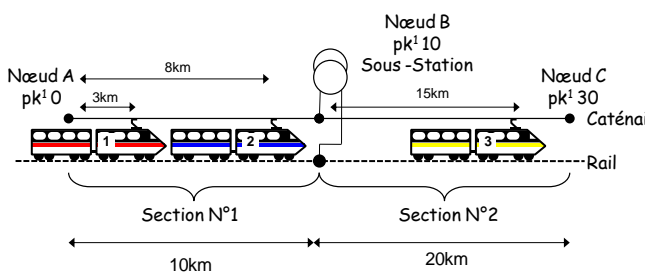


Figure 1 : Détermination des nœuds fixes

La Figure 1 présente cet exemple réseau ferroviaire avant la création des nœuds mobiles et l'écriture du circuit électrique correspondant. Cet exemple comporte deux sections¹ : la section 1 délimitée par les nœuds A et B, et la section 2 délimitée par les nœuds B et C. Ces nœuds correspondent aux points où des installations fixes, comme les sous stations² ou des interrupteurs de sectionnement, sont reliés à la caténaire.

Les lignes électriques sont modélisées par un réseau monophasé. Les impédances de la caténaire et du rail sont alors agrégées dans une seule impédance série. La possibilité de prendre en compte les éléments parallèles a été étudiée mais non exploitée. En effet, les longueurs de ligne et les niveaux de tension sont trop faibles pour que les éléments capacitifs aient un impact.

La Figure 2 décrit le réseau de la Figure 1 une fois que l'approche a été appliquée. Dans un premier temps, deux nœuds mobiles ont été créés par section (11, 12, 21 et 22). Ces nœuds correspondent au nombre maximal de trains pouvant être présents sur une section. A l'origine, ces nœuds sont géographiquement équidistribués. Les trains sont alors affectés aux nœuds les plus proches de leurs positions. Cette approche pouvant affecter deux trains au même nœud, une procédure de résolution de conflit est ensuite exécutée afin de s'assurer que le nombre maximal de trains par nœud est égal à un.

Une fois les trains affectés aux nœuds, leur position étant connue, les valeurs des impédances peuvent être calculées à partir des longueurs de section entre deux nœuds et de l'impédance linéique \bar{Z}_{km} de l'ensemble caténaire-rail.

Cette approche devant être appliquée à chaque déplacement d'un train, elle a été implantée sous forme d'un programme informatique. Celui-ci a été développé avec l'objectif d'apporter un maximum de généralité, pour pouvoir traiter un maximum de cas de réseaux ferroviaires.

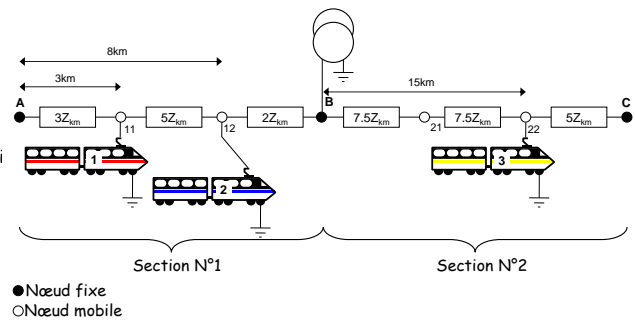


Figure 2 : Introduction des nœuds mobiles

2.1.2. Mise en équation du réseau électrique

La Figure 3 présente le circuit électrique correspondant au schéma d'alimentation ferroviaire de la Figure 2. La mise en équation du circuit électrique ainsi constitué est effectuée par une méthode nodale proche de celle utilisée par les logiciels de modélisation de circuit comme SPICE [7] [8]. La modélisation du réseau se fait en quasi-statique, supposant que pour chaque instant étudié le réseau est en régime permanent. Ceci nous permet de décrire les grandeurs du réseau en complexe.

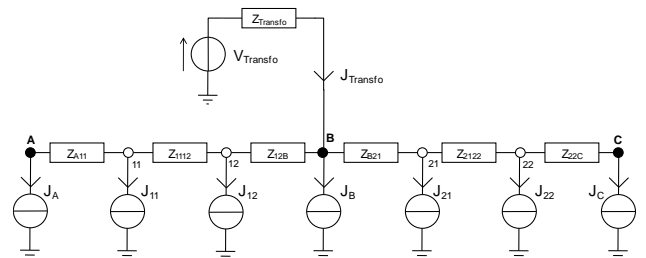


Figure 3 : Circuit électrique mis en équation

Le circuit peut être mis en équation sous la forme matricielle suivante (voir Tableau 1):

$$[\bar{Y}][\bar{V}] = -[\bar{J}] \quad (1)$$

¹ Dans le domaine ferroviaire la position d'un système sur la ligne est définie selon le Point Kilométrique (PK).

² Point de connexion entre le réseau de transport ou de distribution et le réseau ferroviaire électrique.

Où :

- $[\bar{Y}]$ est la matrice d'admittance, contenant à la fois l'information sur les impédances et la topologie du circuit ;
- $[\bar{V}]$ est le vecteur des tensions (inconnues) aux nœuds ;
- $[\bar{J}]$ est le vecteur des sources de courant nodales.

Par la suite, afin de simplifier l'écriture de la matrice $[\bar{Y}]$, on notera \bar{Y}_n l'inverse de l'impédance d'indice n \bar{Z}_n :

$$\bar{Y}_n = \frac{1}{\bar{Z}_n} \quad (2)$$

La modélisation de la sous station par une source de tension se fait par ajout d'une équation supplémentaire (3).

$$V_B + J_{Transfo} \cdot Z_{Transfo} = V_{Transfo} \quad (3)$$

Où :

- V_B est la tension du nœud B ;
- $J_{Transfo}$ le courant fourni par le transformateur de la sous station ;
- $Z_{Transfo}$ l'impédance série du transformateur de la sous station ;
- $V_{Transfo}$ la tension à vide au secondaire du transformateur de la sous station.

Tableau 1 : Expressions de la matrice des admittances et des vecteurs des tensions et des sources de courant

Matrice des admittances						
$[\bar{Y}] =$	\bar{Y}_{A11}	$-\bar{Y}_{A11}$	0	0	0	0
	$-\bar{Y}_{A11}$	$\bar{Y}_{A11} + \bar{Y}_{1112}$	$-\bar{Y}_{1112}$	0	0	0
	0	$-\bar{Y}_{1112}$	$\bar{Y}_{1112} + \bar{Y}_{12B}$	$-\bar{Y}_{12B}$	0	0
	0	0	$-\bar{Y}_{12B}$	$\bar{Y}_{12B} + \bar{Y}_{B21}$	$-\bar{Y}_{B21}$	0
	0	0	0	$-\bar{Y}_{B21}$	$\bar{Y}_{B21} + \bar{Y}_{2122}$	$-\bar{Y}_{2122}$
	0	0	0	0	$-\bar{Y}_{2122}$	$\bar{Y}_{2122} + \bar{Y}_{22C}$
	0	0	0	0	0	$-\bar{Y}_{22C}$
Vecteur des tensions						
$[\bar{V}] = \begin{bmatrix} \bar{V}_A \\ \bar{V}_{11} \\ \bar{V}_{21} \\ \bar{V}_B \\ \bar{V}_{21} \\ \bar{V}_{22} \\ \bar{V}_C \end{bmatrix}$						

Vecteur des sources de courant	
$[\bar{J}] =$	$\begin{bmatrix} \bar{J}_A \\ \bar{J}_{11} \\ \bar{J}_{12} \\ \bar{J}_{21} \\ \bar{J}_{22} \\ \bar{J}_C \end{bmatrix}$

2.1.3. Mise en équation des charges

Les trains sont modélisés par des sources de puissance active et réactive variant dans le temps. Leur mise en équation implicite est effectuée sous la forme d'une source de courant dépendant de manière non linéaire de la tension :

$$\begin{cases} \bar{V}_{T1} \bar{J}_{T1}^* = P_{T1} + jQ_{T1} \\ \bar{V}_{T2} \bar{J}_{T2}^* = P_{T2} + jQ_{T2} \\ \bar{V}_{T3} \bar{J}_{T3}^* = P_{T3} + jQ_{T3} \end{cases} \quad (4)$$

Où :

- \bar{V}_{Ti} est la tension d'alimentation du train i ;
- \bar{J}_{Ti} est le courant absorbé par le train i ;
- P_{Ti} et Q_{Ti} sont respectivement les puissances actives et réactives consommées par le train i .

2.1.4. Prise en compte du déplacement des charges

A partir de l'allocation des trains aux nœuds, la liaison des équations des trains aux équations du réseau se fait en introduisant une matrice d'interconnexion $[I]$. La taille de cette matrice est fixe et seulement ses valeurs changent en fonction de la position des trains. Pour la configuration présentée Figure 2, $[I]$ est donnée par (5).

$$[I] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Le passage entre les valeurs des sources de courant du réseau ainsi qu'entre les tensions des nœuds et les tensions d'alimentation des trains se fait par les équations suivantes :

$$[\bar{J}'] = \begin{bmatrix} \bar{J}_A \\ \bar{J}_{11} \\ \bar{J}_{12} \\ \bar{J}_B \\ \bar{J}_{21} \\ \bar{J}_{22} \\ \bar{J}_C \end{bmatrix} = [I] \cdot [\bar{J}_{T1} \quad \bar{J}_{T2} \quad \bar{J}_{T3}] \quad \begin{bmatrix} \bar{V}_{T1} \\ \bar{V}_{T2} \\ \bar{V}_{T3} \end{bmatrix} = ([I] \cdot [\bar{V}])^T \quad (6)$$

Enfin, les différentes impédances sont calculées en fonction de la distance entre les nœuds et de l'impédance kilométrique de l'ensemble caténaire-rail \bar{Z}_{km} . Les valeurs des admittances pour la configuration de la figure 2 sont données par (7).

$$\begin{aligned} \bar{Y}_{A11} &= \frac{1}{3\bar{Z}_{km}} \bar{Y}_{1112} = \frac{1}{5\bar{Z}_{km}} \bar{Y}_{12B} = \frac{1}{2\bar{Z}_{km}} \\ \bar{Y}_{B21} &= \frac{1}{7.5\bar{Z}_{km}} \bar{Y}_{2122} = \frac{1}{7.5\bar{Z}_{km}} \bar{Y}_{22C} = \frac{1}{5\bar{Z}_{km}} \end{aligned} \quad (7)$$

2.1.5. Résolution des équations

Les équations (1), (2), (3) et (4) constituent un système d'équations non linéaire. Les inconnues sont alors la tension aux différents nœuds, ainsi que les courants dans les sources de puissance et les transformateurs. Leur détermination nécessite la résolution de ce système.

Pour effectuer cette résolution, un algorithme de type Newton-Raphson a été utilisé. Cet algorithme ne sachant travailler qu'avec des grandeurs réelles, les parties réelles et imaginaires des grandeurs complexes sont séparées.

Le circuit est étudié pour chaque point de fonctionnement, ces points étant définis par le cadencement des trains.

2.2. Modélisation dynamique simplifiée d'un train

Un modèle cinématique simplifié a été développé pour créer des « marches types » afin de générer les données d'entrée pour traiter le problème. L'objectif étant d'avoir une allure de courbe représentative et non des résultats précis, un nombre important de paramètres physiques n'a pas été considéré : le profil de la ligne est supposé plat, et les frottements sont négligés. Ces hypothèses conduisent à l'ensemble d'équations dynamiques suivant pour le train: la vitesse du train, l'accélération de celui-ci et la position du train

$$V_{t+\Delta t} = V_t + A_t \times \Delta t \quad (8)$$

$$Pos_{t+\Delta t} = Pos_t + V_t \times \Delta t$$

Où :

- V_t est la vitesse du train à l'instant t ;
- A_t est son accélération à l'instant t ;
- Pos_t est sa position à l'instant t ;
- Δt est le pas de temps choisis pour la simulation.

Il convient de préciser que dans le domaine ferroviaire, la marche du train est constituée des cinq phases suivantes :

- Phase 1, accélération à couple constant : celle-ci est fixée par la limite d'adhérence de la roue avec le rail, les limites de résistance mécanique de la transmission ou le courant maximal supporté par les moteurs de traction ;
- Phase 2, accélération à puissance constante : puissance limitée par les convertisseurs d'électronique de puissance alimentant les moteurs ;
- Phase 3, marche sur l'erre³ : aucun effort de traction n'est appliqué, le train avance sur son importante inertie ;
- Phase 4, freinage à couple constant : le couple est fixé par l'adhérence ou les performances des freins ;
- Phase 5, arrêt : le train est en stationnement.

La puissance électrique consommée par le train est considérée égale à la puissance mécanique à la jante, notée PM_t , correspondant à l'effort d'accélération ou de freinage, au rendement η de la chaîne de traction près. On y rajoute une puissance constante $PAux$ correspondant à la consommation des auxiliaires tels que la climatisation, les circuits de refroidissement, l'éclairage... Le calcul de cette puissance est donné ci-dessous :

$$PM_t = V_t \times A_t \times M \quad \text{avec} \quad (9)$$

$$\begin{cases} PE_t = PM_t \times \eta^{-1} + PAux \text{ si } PM_t > 0 \\ PE_t = PM_t \times \eta + PAux \text{ si } PM_t < 0 \end{cases}$$

Où :

- M est la masse du train.

Une hypothèse forte est que les performances du train ne dépendent pas de la tension d'alimentation. Le fonctionnement réel des trains limite puissance lorsque la tension atteint un seuil bas prévu par les normes [1].

Le profil de consommation ainsi que la marche du train présenté à la Figure 4, correspondant à l'application de ce modèle sur une ligne à caractéristique urbaine dont les vitesses sont modérées et les arrêts fréquents. Les caractéristiques d'une unité multiple (deux trains accouplés) à deux niveaux Z20500 ont servies de base pour la calibration de l'outil.

³ Les phases de marche sur l'erre sont déterminées à partir du logiciel MARECO développé par la SNCF depuis 1980.

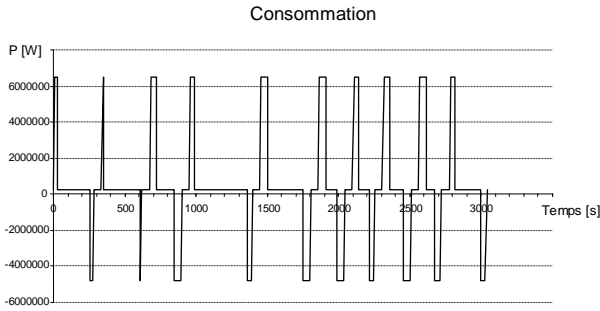


Figure 4a : Profil de puissance du train

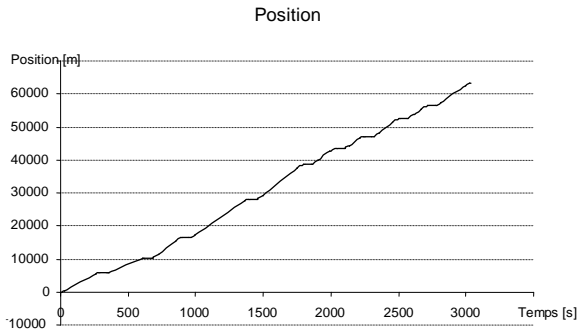


Figure 4b : Profil de marche du train

On y distingue bien les contraintes de modélisation des applications ferroviaires, que sont les variations rapides de puissance (de 0 à 6MW en une vingtaine de secondes), et, en même temps, la nécessité de simuler sur une longue durée (ici une heure).

2.3. Modélisation de l'ensemble du réseau et processus de simulation

Le pas de temps entre deux points de fonctionnement est choisi afin que la discrétisation du déplacement des trains n'apporte pas une erreur trop importante. Un pas de temps d'une seconde a été choisi. Au niveau des déplacements, cela correspond à un déplacement d'environ 25m pour un train de banlieue ou 75m pour un TGV en vitesse commerciale. Ceci est à opposer aux dimensions supérieures à la dizaine de kilomètre d'un réseau ferroviaire. Du point de vue de la dynamique, une accélération ou un freinage dure environ 30 secondes. Ce pas de temps permet donc de bien décrire ces deux phases. Le schéma du réseau électrique est alors calculé et résolu pour un ensemble de points de fonctionnement correspondant à la marche du train.

Une fois l'ensemble des configurations résolues, les résultats sont exploités afin de déterminer les informations utiles à l'optimisation. Cela concerne principalement les pertes dans les lignes et les niveaux de tension extrêmes atteints aux différents nœuds (utiles pour vérifier le respect des normes).

L'ensemble des étapes du processus de simulation est décrit sur la Figure 5.

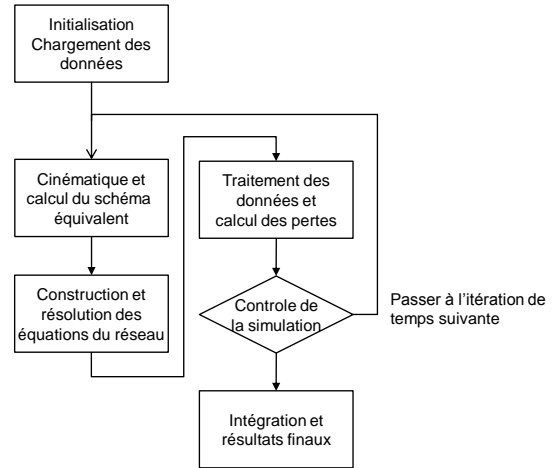


Figure 5 : Processus de simulation

Dans l'objectif d'une exploitation du modèle pour une démarche de conception optimale, le processus de résolution doit posséder de bonnes performances en termes de temps de calcul et de convergence. Dans le cas présenté dans le paragraphe 4, le temps de simulation est d'environ 5 secondes pour 3000 points de déplacement des trains.

3. Modèle économique

Le coût d'une infrastructure ou d'un équipement est généralement décomposé en deux parties :

- le coût d'investissement correspondant à son achat et à sa construction ;
- le coût d'exploitation correspondant aux frais engagés afin d'assurer son fonctionnement et sa maintenance.

Le coût d'investissement C_{inv} est composé d'une partie fixe représentant les frais fixes dus à son installation (main d'œuvre, immobilisation d'engins, terrassement...), et d'une partie variable proportionnelle à la quantité de matières premières utilisées. Dans notre cas, la partie variable correspondra au coût du cuivre nécessaire à la construction de la ligne électrique de contact de la caténaire.

Un modèle économique simplifié a été utilisé pour le coût d'exploitation. Le coût de l'énergie est représenté par une suite géométrique, afin d'intégrer son augmentation annuelle sur la durée de vie de l'infrastructure. L'équation (10) permet de déterminer le coût d'un Wh de pertes après N années

$$Cup_N = Cup_0 \frac{(1+a)^N - 1}{a} \quad (10)$$

Où :

- Cup_0 est le coût de l'énergie lors de la première année ;
- a est le taux d'actualisation correspondant à l'inflation annuelle du prix de l'énergie.

Le coût total de l'infrastructure est donc :

$$C_{total} = C_{inv} + Cup_N \quad (11)$$

4. Optimisation sur cycle

Notre approche a été testée sur une structure représentative d'une ligne urbaine électrifiée en 25kV alternatif [9]. Sa longueur est de 63,2km et elle comporte des arrêts espacés d'environ 5km. Le schéma de l'architecture étudiée est donné sur la Figure 6 :

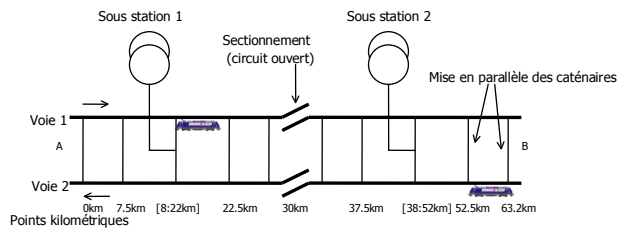


Figure 6 : Schéma du cas étudié

La ligne comporte deux sous-stations d'alimentations, ainsi qu'un ensemble de mises en parallèle entre les deux lignes. Deux trains circulant dans des directions opposées ont été modélisés. La combinaison d'un train faisant de nombreux arrêts avec un train circulant à vitesse constante permet d'étudier les effets d'une asymétrie des circulations. Les marches de trains et leurs consommations sont données sur la Figure 7 et les résultats de simulation associés sur la Figure 8. Le coût total sur le cycle de vie est supposé être la somme d'un coût fixe d'installation et du coût variable. Celui-ci est donné par (11).

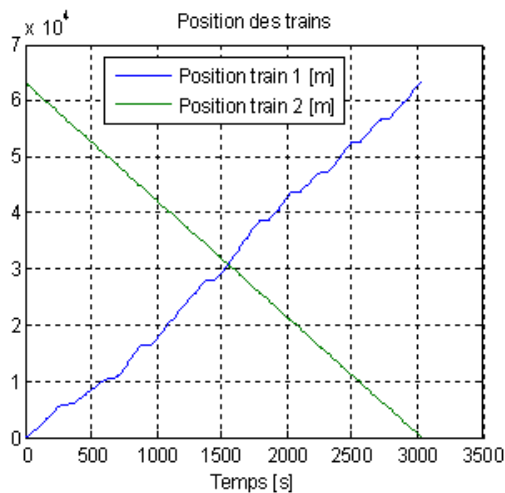


Figure 7a: Marche des trains

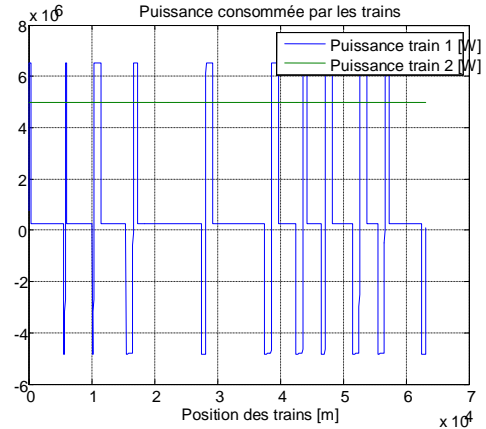
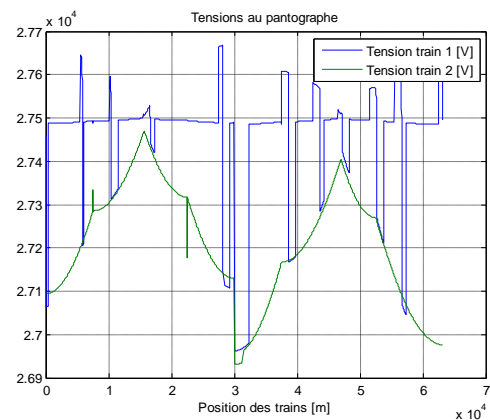
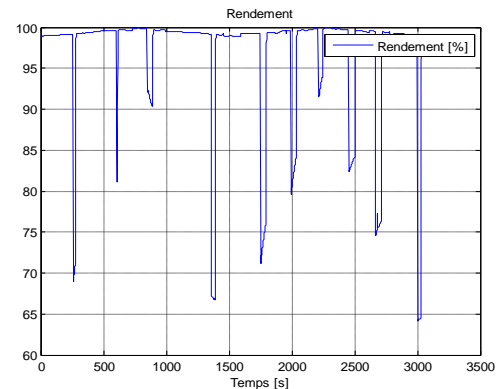


Figure 7b : Consommation des trains



Tension au pantographe des trains



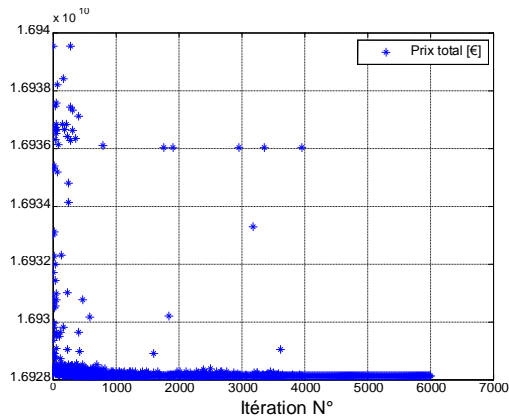
Rendement de la caténaire

Figure 8 : Résultats de simulation

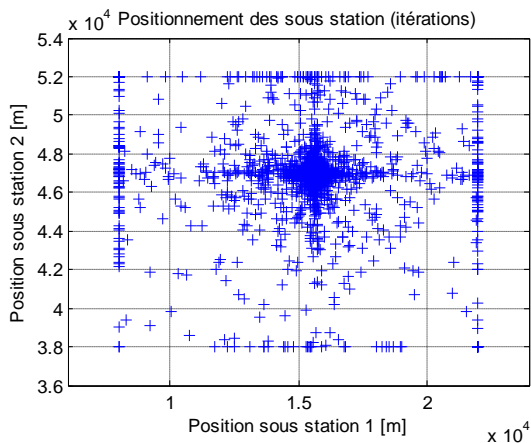
Le modèle a été implémenté via l'environnement Java™ et intégré à la plateforme d'optimisation CADES sous la forme d'un composant logiciel [10]. L'utilisation d'algorithmes d'optimisation dits déterministes basés sur les dérivées du modèle étant impossible, celle-ci n'ayant pas été calculées, il a donc été choisi d'utiliser un algorithme génétique « Evolution Strategy » intégré dans CADES [11].

Les paramètres de l'optimisation sont donnés dans le tableau 2. Le paramétrage de l'algorithme ES est

présenté dans le Tableau 3 et les résultats sont fournis dans le Tableau 4. Enfin, l'évolution des solutions déterminées par l'algorithme génétique est donnée dans la Figure 9.



Evolution du coût total



Convergence de la position des sous stations

Figure 9 : Evolution des solutions

Tableau 2 : Paramètres de l'optimisation

Nombre de paramètres d'entrée : 11. Paramètres variables :	
Position de la sous-station 1	8km < pos1 < 22km
Position de la sous-station 2	38km < pos2 < 52km
Section de la caténaire	25mm ² < sect < 250mm ²
Coût d'investissement fixe	10M€
Prix du cuivre	10€/kg
Coût initial des pertes	876€/kW/an
Pertes fixes	100kW
Durée de vie de l'installation	30 Ans
Taux d'actualisation	6%

Tableau 3 : Paramètres de l'algorithme génétique

Type d'optimiseur :	Evolutionary Strategy
Nombre de parents :	10
Nombre d'enfants :	60
Nombre de génération :	100
Sub optimum :	100

Tableau 4 : Résultats de l'optimisation

Position de la sous-station 1	16,2km
Position de la sous-station 2	47,4km
Section de la caténaire	100.9mm ²
Tension maximale	27582V
Tension minimale	26760V
Coût total :	16,9M€

L'optimisation a été effectuée sur une machine équipée d'un CPU Intel® Core™ i7 cadencé à 3.40GHz avec 4Go de RAM et exécutant le système d'exploitation Windows XP. Le temps de calcul est de l'ordre de 6h pour le paramétrage de l'algorithme génétique fourni dans le Tableau 3.

5. Conclusion et perspectives

Les simulations donnent des pertes faibles dans la ligne de contact. Ceci peut être expliqué par les niveaux de tension élevés par rapport à la puissance des charges modélisées, les pertes dans le système de caténaire étant inférieures à 1% de la consommation totale. Une des conséquences sur l'optimisation est que la sensibilité des pertes par rapport à la position des sous-stations est très faible. Le gain entre la position intuitive (au milieu des sections) et la position optimisée est alors pratiquement nul. Le seul paramètre ayant un impact significatif est la section de la caténaire. Toutefois, cette application a permis de valider les modèles retenus.

Ces travaux visaient à définir une nouvelle méthode de dimensionnement des réseaux d'alimentations ferroviaire. En utilisant un modèle du réseau électrique prenant en compte l'infrastructure et la circulation des trains, les pertes ont été évaluées sur un cycle de fonctionnement et la meilleure solution de dimensionnement a été obtenue pour un coût minimal.

Toutefois, on constate que les gains apportés par l'optimisation sont faibles. Cela peut être expliqué par l'impact réduit des pertes et le nombre réduit de degrés de liberté pour le dimensionnement dans le cas d'étude simpliste qui a été considéré. Des études sur des cas réels et apportant de nouveaux degrés de liberté par l'ajout de production décentralisée, de stockage et

d'électronique de puissance vont être réalisées dans le cadre du projet ANR CONIFER [12]. Les travaux présentés dans cet article constituent le premier pas dans cette direction. Ils valident la méthode proposée, basée sur la modélisation électrique du réseau ferroviaire ainsi que l'optimisation à l'aide de modèles dédiés.

6. Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'une convention CIFRE entre le G2ELab et la SNCF, et s'insèrent dans le projet CONIFER financé par l'Agence Nationale de la Recherche.

7. Références

- [1] C. Courtois, J. Coumel, "Traction électrique ferroviaire, Dynamique ferroviaire et sous-station", Techniques de l'Ingénieur, 2009, D5501.
- [2] SNCF, "Le TER en 2030". Dossier de presse du 17 juin 2008.
- [3] Faranda, R. & Leva, S., "Energetic sustainable development of railway stations", Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE, 2007, 1 -6
- [4] Hayashiya, H.; Yoshizumi, H.; Suzuki, T.; Furukawa, T.; Kondoh, T.; Kitano, M.; Aoki, T.; Ishii, T.; Kurosawa, N. & Miyagawa, T., "Necessity and possibility of smart grid technology application on railway power supply system Power Electronics and Applications (EPE 2011)", Proceedings of the 2011-14th European Conference on, 2011, 1-10
- [5] Chapas, P. & Petit, J.-M., "Dimensionnement du matériel roulant ferroviaire", Techniques de l'ingénieur, 2004, D5520.
- [6] H.Nguyen-Huu, B.Sareni, F.Wurtz, N.Retière, X.Roboam, "Comparison of self-adaptive evolution algorithms for multimodal optimization", OIPE'2008 (Optimization and Inverse Problem in Electromagnetism), Ilmenau, GERMANY, September 14 - 17, 2008.
- [7] Bryant, P., "The algebra and topology of electrical networks", Proceedings of the IEE - Part C: Monographs, 1961, 108, 215 -229
- [8] Ho, C.-W.; Ruehli, A. & Brennan, P., "The modified nodal approach to network analysis Circuits and Systems", IEEE Transactions on, 1975, 22, 504 – 509
- [9] White, R., "AC 25kV 50 Hz electrification supply design Railway Electrification Infrastructure and Systems", 2009. REIS 2009. 4th IET professional Development Course on, 2009, 93 -126
- [10] B. Delinchant, D. Duret, L Estrabaut, L. Gerbaud, H. Nguyen Huu, B. du Peloux, H.L. Rakotoarison, F. Verdier, F. Wurtz, "An Optimizer using the Software Component Paradigm for the Optimization of Engineering Systems", COMPEL, the international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, Volume 26, Number 2, 2007, pp 368-379
- [11] HaJJI, O., "Contribution au développement de méthodes d'optimisation stochastiques. Application à la conception des dispositifs électrotechniques", Ecole Centrale de Lille, 2003[12] Nguyen-Huu, H.; Sareni, B.; Wurtz, F.; Retière, N. & Roboam, X., "Comparison of self-adaptive evolutionary algorithms for multimodal optimization", 10th International Workshop on Optimization and Inverse Problems in Electromagnetism (OIPE'2008), Ilmenau, Germany, 2008, 54-5
- [12] J. Pouget, P. Pankovits, O. Bossi, L. Gerbaud, N. Retiere, S. Brisset, C. Saudemont, B. Robyns, J.-P. Ricaud, V. Delcourt, G. Vrignaud, J. Chabas, "CONIFER Project : Innovative concept and tools for Future Electrical Infrastructure railway will integrate delocalized renewable production sources and storages systems", WCRR2013 (World Congress on Railway Research, Sidney, Australia, November 25-28, 2013