

Dimensionnement de stockage embarqué dans un tramway

OBJECTIFS DU PROJET:

- Mettre en œuvre une démarche d'optimisation pour la conception d'un système
- Comprendre le principe de l'alimentation électrique des tramways
- Découvrir l'optimisation multi-critères et le concept d'optimalité au sens de Pareto
- Mettre en œuvre l'algorithme génétique NSGA-2.

Référence pour en savoir plus sur le dimensionnement des systèmes d'alimentation électrique de tramway et les algorithmes génétiques :

« Outils pour l'optimisation du dimensionnement des infrastructures d'alimentation électrique de tramway ou de métro », Anass Boukir, Thèse de doctorat de Sorbonne Université, décembre 2023, Sorbonne Université – lien de téléchargement : <https://theses.fr/2023SORUS668>

1 – PRESENTATION DU SYSTEME DE TRAMWAY ETUDIE

Ce projet porte sur l'étude en simulation d'une ligne de tramway très simple, et plus précisément sur l'intérêt d'un système de stockage par batterie à bord afin de faire de la récupération d'énergie au freinage. On souhaite dimensionner et piloter un système de stockage de façon à réduire les chutes de tension aux bornes du train. Pour cela, il faut réaliser un compromis entre coût et performance du système de stockage.

1.1 Principe des réseaux électriques ferroviaires

Un réseau électrique ferroviaire est constitué des différents matériels qui permettent d'acheminer l'énergie depuis le réseau public jusqu'aux trains. La Figure 1 schématise le schéma d'alimentation. L'énergie est prélevée sur le réseau public de distribution par des sous-stations qui adaptent le niveau de tension à l'alimentation ferroviaire. Les charges du réseau sont les trains, qui se déplacent. Ces charges sont reliées aux sous-stations par l'intermédiaire de la ligne aérienne de contact (LAC) et des rails, qui ferment le circuit électrique au niveau du contact roue/rail. Quand il y a plusieurs voies en parallèle, il existe également des postes de mise en parallèle qui permettent de réduire la résistance électrique globale du système.

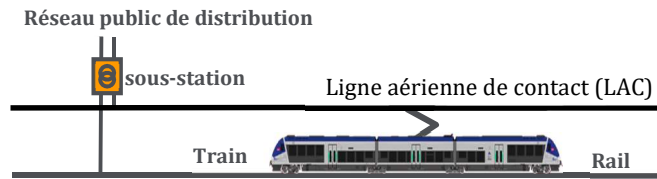


Figure 1 : Schéma de principe de l'alimentation électrique d'un train

Différents systèmes d'alimentation co-existent sur les réseaux ferroviaires, selon qu'on est en milieu urbain, sur une ligne régionale ou sur une ligne à grande vitesse. C'est ainsi qu'au cours de son trajet de Paris vers Lyon, un TGV est successivement alimenté en 1500 V DC quand il quitte Paris sur le réseau RER, puis en 25 kV AC quand il circule le réseau grandes lignes, et enfin en 2x25 kV AC sur la ligne grande vitesse. Les puissances transmissibles, et donc les vitesses possibles, sont d'autant plus grandes que la tension de ligne est élevée.

Les réseaux électriques ferroviaires sont des systèmes complexes (nombreuses lignes, nombreux trains en mouvement) et leur étude s'appuie sur la simulation. Les simulateurs procèdent généralement suivant le même schéma. Les données d'entrée sont les informations sur les infrastructures de la ligne et sur le trafic. Le simulateur construit alors et résout en pas à pas sur le temps les équations de la dynamique des trains et les équations de circuit du réseau afin de déterminer la puissance nécessaire à l'avancement des trains, puis les différentes grandeurs électriques qui en découlent : potentiels aux différents nœuds du circuit et courant dans les branches. Des modèles thermiques peuvent être mis en œuvre pour calculer les échauffements dans les conducteurs et les transformateurs. Ces simulateurs sont utilisés pour concevoir et dimensionner les différents éléments du système d'alimentation électrique (nombre, position et puissance des sous-stations, par exemple).

Les réseaux électriques ferroviaires se distinguent des réseaux électriques de distribution classiques, d'une part parce qu'ils contiennent des charges mobiles (les trains) et d'autre part parce qu'ils fonctionnent avec des chutes de tension aux bornes des charges importantes (jusqu'à 30% contre 5% pour un réseau classique !). Le déplacement des trains impose de mettre à jour les équations de circuit électrique à chaque pas de temps, avec une topologie de circuit susceptible de changer d'un pas de temps à l'autre. De plus, la grande variation des tensions interdit toute approximation linéaire des équations du système.

1.2 Système étudié : tramway en mouvement entre deux sous-stations

Nous allons nous intéresser ici au cas des tramways, alimentés en 750 V DC. L'alimentation se fait à partir du réseau public HT 20 kV par l'intermédiaire de transformateurs associés à des redresseurs (Figure 2).

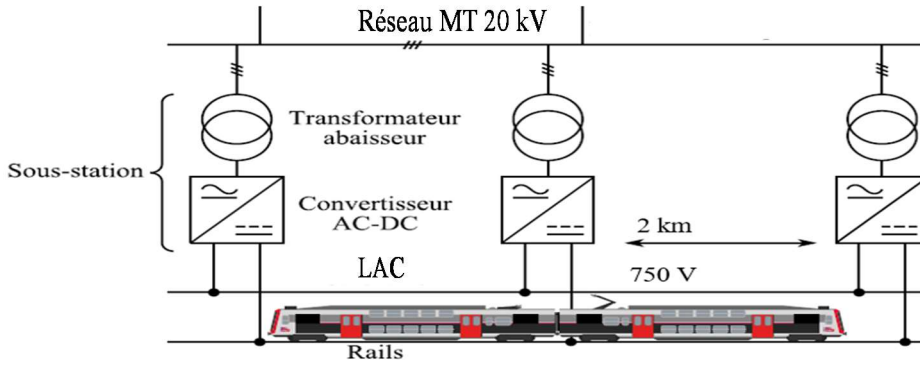


Figure 2. Alimentation électrique d'une ligne de tramway

Vu du réseau électrique du tramway, les sous-stations d'alimentation se comportent comme des générateurs de tension caractérisés par une source de tension V_{sst} en série avec une résistance interne R_{sst} . La LAC et le rail sont des conducteurs caractérisés chacun par une certaine résistance linéique ρ_{LAC} et ρ_{rail} . Les trains sont des charges caractérisées à chaque instant par leur position et leur puissance, qui peut être positive (accélération ou maintien de la vitesse du train) ou négative (freinage).

Le but de la simulation est de déterminer la tension aux différents nœuds du réseau, puis les courants dans les conducteurs et les pertes Joule. On examinera également les puissances fournies par chaque sous-station.

Dans le cadre de ce projet, nous allons commencer par simuler et étudier une ligne très simple, alimentée par une sous-station à chaque extrémité, et sur laquelle un train fait des allers-retours d'une extrémité à l'autre, avec quelques arrêts intermédiaires. La Figure 3 montre le modèle électrique du système. A l'instant considéré, le train est situé à la distance x de la sous-station 1. $R_{LAC 1}(x)$ et $R_{rail 1}(x)$ représentent les résistances des portions de LAC et de rail comprises entre la sous-station 1 et le train. De la même manière, $R_{LAC 2}(x)$ et $R_{rail 2}(x)$ représentent les résistances des portions de LAC et de rail comprises entre la sous-station 2 et le train. Le train est modélisé par sa position et sa puissance P_{train} fonction du temps. Les profils $x(t)$ et $P_{train}(t)$ sont les données d'entrée du problème à partir desquelles on peut déterminer les potentiels en tout point du circuit à tout instant.

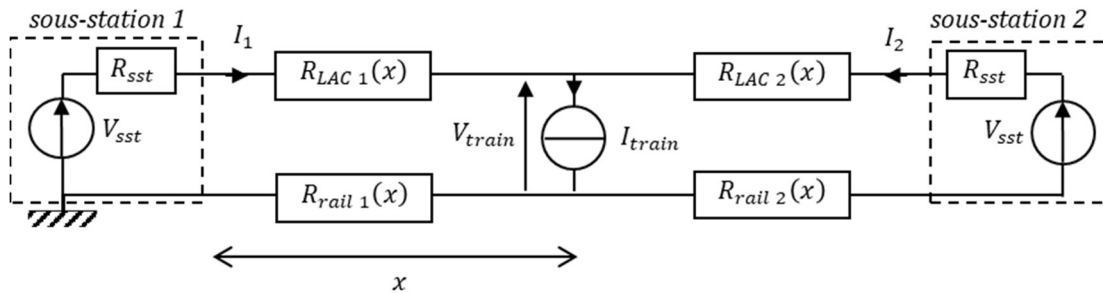


Figure 3 : Modèle électrique du système quand le train est à la position x .

Les courbes de la Figure 4 montrent les profils $x(t)$ et $P_{train}(t)$ pour le trajet aller. Le train parcourt une distance de 5 km avec des arrêts réguliers aux stations-voyageurs. Sa puissance varie entre +1,1 MW en phase d'accélération et -0,6 MW en phase de freinage.

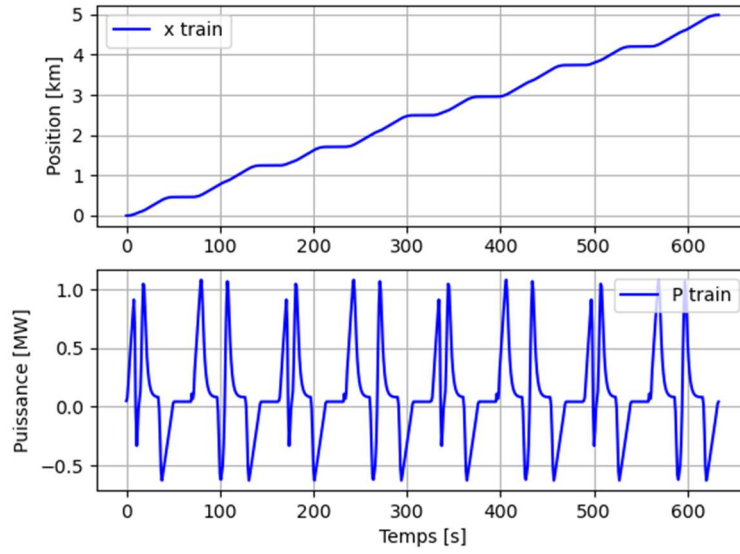


Figure 4 : Marche du train – en haut : position du train – en bas : puissance motrice .

1.3 Détermination du potentiel aux bornes du train :

Le théorème de Thévenin permet de simplifier le schéma précédent et d'aboutir au schéma de la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Il est alors très facile de calculer la tension aux bornes du train, pour une position et une puissance appelée données.

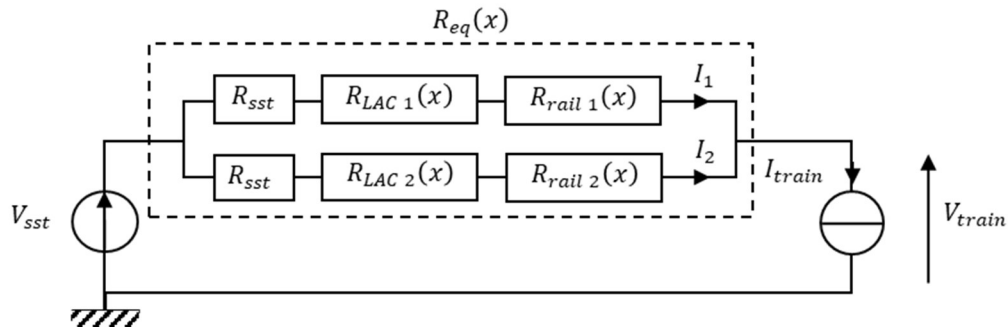


Figure 5 : Modèle équivalent du système.

$$I_{train} = \frac{V_{sst} - V_{train}}{R_{eq}} \quad \text{et} \quad P_{train} = V_{train} \cdot I_{train} = V_{train} \cdot \frac{V_{sst} - V_{train}}{R_{eq}}.$$

On en déduit que V_{train} est solution de l'équation de degré 2 :

$$V_{train}^2 - V_{sst} \cdot V_{train} + R_{eq} \cdot P_{train} = 0.$$

Le discriminant vaut : $\Delta = V_{sst}^2 - 4 R_{eq} \cdot P_{train}$.

L'équation n'admet pas de solution si $\Delta < 0$, c'est-à-dire si $P_{LAC} > \frac{V_{sst}^2}{4 R_{eq}}$. En d'autres termes, pour une position donnée du train, la LAC ne peut pas fournir une puissance supérieure à $\frac{V_{sst}^2}{4 R_{eq}}$.

$$\text{Si } \Delta \geq 0 : V_{train} = \frac{1}{2} \left(V_{sst} + \sqrt{V_{sst}^2 - 4 R_{eq} \cdot P_{LAC}} \right)$$

On peut alors calculer toutes les autres grandeurs dans le circuit : $I_1, I_2, P_{sst 1}, P_{sst 2}, \dots$

1.4 Freinage et récupération d'énergie

Lors des phase d'accélération ou de vitesse constante, le moteur du train absorbe de la puissance, fournie par les sous-stations. En revanche, lors des phases de freinage, le moteur du train fonctionne en génératrice et fournit de la puissance (freinage récupératif). Supposons qu'à un instant donné, un train est en train de freiner. Si à cet instant d'autres trains ont besoin d'être alimentés, la puissance de freinage du premier train peut contribuer naturellement à cette alimentation. En revanche, si la puissance de freinage dépasse les besoins des autres trains l'excès d'énergie doit être soit dissipé, soit renvoyé vers le réseau de distribution. Ce renvoi d'énergie du réseau électrique ferroviaire vers le réseau de distribution est possible dans les réseaux ferroviaires AC, mais pas dans les réseaux DC, car les sous-stations qui redressent et adaptent le niveau tension sont irréversibles. Dans le cas du système de tramway auquel ce projet s'intéresse, avec un seul train en circulation, le renvoi d'énergie du train vers la LAC est impossible. Lorsque le train freine, toute la puissance générée par le moteur est dissipée par freinage rhéostatique installé sur le toit du train.

Une solution technique pour récupérer l'énergie de freinage consiste à utiliser une batterie embarquée : celle-ci est chargée lors des phases de freinage, puis l'énergie stockée est utilisée ultérieurement pour alimenter le moteur du train. On constitue ainsi un système d'alimentation hybride LAC/batterie, dont le schéma de principe est représenté sur la Figure 6. Quand le train consomme de l'énergie, celle-ci est fournie conjointement par la LAC et la batterie. Quand le train produit de l'énergie, celle-ci est conjointement stockée dans la batterie ou dissipée dans un rhéostat.

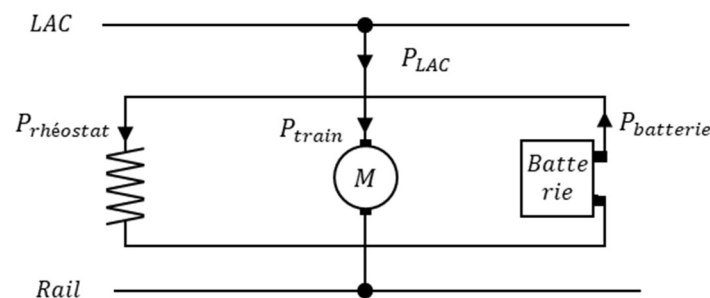


Figure 6 : Flux de puissance de l'alimentation hybride LAC/batterie

Avec les orientations indiquées sur la Figure 6, à chaque instant $P_{train}(t) = P_{LAC}(t) + P_{batterie}(t) - P_{rhéostat}(t)$. Il n'y a pas de renvoi de puissance possible vers le réseau, donc $P_{LAC}(t) \geq 0$. Le rhéostat ne peut que consommer de la puissance, donc $P_{rhéostat}(t) \geq 0$. En revanche, le train et la batterie peuvent consommer ou produire de la puissance, donc $P_{train}(t)$ et $P_{batterie}(t)$ sont des grandeurs algébriques pouvant être positives ou négatives.

L'énergie stockée dans la batterie évolue au cours du temps selon l'équation :

$$E_{batterie}(t) = E_{batterie}(t_0) - \int_{t_0}^t P_{batterie}(t). dt$$

En l'absence de batterie, on a obligatoirement $P_{LAC}(t) = P_{train}(t)$ quand le train consomme de l'énergie et $P_{rhéostat}(t) = -P_{train}(t)$ quand le train freine. Quand il y a une batterie, la question est de savoir comment la puissance P_{train} , imposée par les besoins du train, doit être répartie entre la batterie, la LAC et le rhéostat. Il paraît évident qu'il faut stocker autant d'énergie que possible au freinage. En revanche, il n'est pas évident de savoir quelle est la manière la plus efficace d'utiliser l'énergie stockée dans la batterie. On peut également envisager de charger la batterie par la LAC lors des phases de faible consommation du train, puis d'utiliser la batterie pour limiter les appels de puissance lors de phases de forte consommation du train... Un tel système d'alimentation hybride nécessite un système de contrôle de la batterie. Il existe des méthodes de contrôle optimal, mais dans le cadre de ce projet, vous mettrez en place une gestion à base de règles simples, que vous proposerez. Par exemple, si le train a besoin de puissance et que la batterie n'est pas vide, alimenter le train par la batterie. Si le train freine et que la batterie n'est pas pleine, stocker l'énergie de freinage dans la batterie.

2 – TRAVAIL A REALISER

2.1 Mise en place du modèle du système (à faire impérativement avant le TP4)

Il s'agit ici de simuler le déplacement du train le long de la ligne, c'est-à-dire de calculer les grandeurs électriques à chaque pas de temps : tension aux bornes de train, courant consommé par le train, courant dans chaque branche du réseau, puissance fournie par chaque sous-station.

Dans un premier temps, le système sera simulé sans batterie. Vous vous intéresserez en particulier à l'évolution de la tension $V_{train}(t)$ au cours du temps pour retrouver les résultats présentés dans les slides de présentation du projet.

Dans un deuxième temps, le stockage batterie sera ajouté, avec une capacité que vous choisirez. Vous jouerez avec quelques règles de gestion de la batterie et analyserez les conséquences sur l'évolution de la tension $V_{train}(t)$ au cours du temps.

Données :

$$V_{sst} = 790 \text{ Volts}, \quad R_{sst} = 33 \text{ mOhm} \quad \rho_{LAC} = 131 \times 10^{-6} \text{ Ohm/m} \quad \rho_{rail} = 18 \times 10^{-6} \text{ Ohm/m}$$

Le déplacement du train est connu à partir des données $t, x(t)$ contenues dans le fichier 'marche_train.m' fourni.

La puissance mécanique nécessaire à l'avancement du train est obtenue à partir du déplacement du train et du principe fondamental de la dynamique.

A chaque instant : $M \cdot \frac{dv}{dt} = F_{motrice} - M \cdot g \cdot \sin \alpha - F_{resistive}$, où M est la masse du train, v est sa vitesse instantanée, $F_{motrice}$ est la force exercée par les roues sur la voie, α est la pente de la voie comptée positivement en montée, $F_{resistive}$ est la force de résistance à l'avancement, qui dépend de la masse du train et de sa vitesse.

$$F_{resistiv} = (A_0 + A_1 \cdot M) + (B_0 + B_1 \cdot M) \cdot v + (C_0 + C_1 \cdot M) \cdot v^2$$

$$M = 70 \text{ tonnes} \quad A_0 = 780 \text{ N} \quad A_1 = 6,4 \text{ N/tonne}$$

$$B_0 = 0 \quad B_1 = 0.14 \text{ N/tonne/(km.h}^{-1}) \quad C_0 = 0.3634 \text{ N/(km.h}^{-1})^2 \quad C_1 = 0$$

La puissance mécanique à fournir est : $P_{mécanique} = F_{motrice} \cdot v$

Elle est produite par un moteur électrique réversible, avec un rendement de l'ensemble de la chaîne de conversion (moteur + convertisseurs) supposé constant et égal à 80%.

Par ailleurs, il faut alimenter différents systèmes à bord pour une consommation supposée constante et égale à 35 kW.

2.2 Dimensionnement du système de stockage (à commencer au plus tard pendant le TP4)

Comme le montrent les résultats de simulation, la tension d'alimentation du train varie selon la position de train et la puissance fournie par la LAC. Une tension trop basse est préjudiciable au bon fonctionnement du groupe moteur et les normes ferroviaires imposent que la tension d'alimentation du train ne doit jamais être inférieure à une certaine valeur $V_{min} = 500 \text{ V}$. En pratique, il est préférable de ne pas trop approcher cette valeur car les pertes Joule sont alors très importantes. Par ailleurs, un imprévu concomittant avec un fonctionnement près des limites du système peut facilement conduire à franchir ces limites. Un indicateur de la qualité de l'alimentation électrique du train est donc la différence entre la tension nominale et la tension aux bornes du train. Plus précisément, on se focalise sur la valeur maximale de cet écart au cours du trajet et on utilise cette valeur comme critère pour qualifier la robustesse de l'alimentation électrique du train tout au long de son trajet.

Dans un premier temps, l'objectif est de construire l'ensemble des solutions non dominées pour les critères « Capacité en énergie de la batterie » et « Chute de tension maximale ». Dans un premier temps, vous utiliserez la méthode de Monte-Carlo, fondée sur l'utilisation bête et méchante de la force de calcul brute. Il s'agit simplement d'échantillonner l'espace de décision avec un grand nombre de points, de calculer les performances de ces points et de les reporter dans l'espace des objectifs.

Une fois compris la notion de solutions non dominées et de solutions Pareto-optimales, vous vous intéresserez à l'algorithme génétique NSGA2 afin d'essayer de construire l'ensemble des solutions non-dominées avec moins d'évaluations de solutions.