



**HAL**  
open science

# Optimisation énergétique de tables horaires de métros: une approche hybride

David Fournier, Denis Mulard, François Fages

► **To cite this version:**

David Fournier, Denis Mulard, François Fages. Optimisation énergétique de tables horaires de métros: une approche hybride. JFPC 2012 - Huitièmes Journées Francophones de Programmation par Contraintes, May 2012, Toulouse, France. hal-00814169

**HAL Id: hal-00814169**

**<https://inria.hal.science/hal-00814169>**

Submitted on 16 Apr 2013

**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.

# Optimisation énergétique de tables horaires de métros: une approche hybride

David Fournier<sup>1 2</sup>

Denis Mulard<sup>1</sup>

François Fages<sup>2</sup>

<sup>1</sup> General Electric Transportation ICS Delta  
Tour Europlaza 28D5, 20 avenue André Prothin 92063 Paris La Défense Cedex (France)

<sup>2</sup> INRIA Rocquencourt Equipe Contraintes  
Domaine de Voluceau Bâtiment 8 Rocquencourt BP 105 78153 Le Chesnay (France)  
{david.fournier, francois.fages}@inria.fr      denis.mulard@ge.com

## Résumé

Sur une ligne de métro, les trains sont capables de générer de l'énergie en freinant. Cette énergie est disponible immédiatement dans le troisième rail et est perdue si aucun métro accélérant dans le voisinage ne peut la capter. En synchronisant les freinages et les accélérations il est donc possible de diminuer la consommation d'énergie globale du système.

Nous décrivons un modèle permettant de ne pas altérer la qualité de service en jouant de façon subtile sur les temps de stationnement des métros tout au long de leur voyage.

Un algorithme hybride génétique-linéaire a été implémenté pour résoudre ce problème et calculer la fonction de distribution d'énergie des métros producteurs.

Sur un exemple représentatif, la consommation d'énergie est ainsi diminuée de plus de 6%.

## Abstract

In a metro line, metros are capable to generate electricity by braking. This energy, immediately available in the third rail, is lost if no metro in the neighborhood can consume it. Thus it is possible to decrease total energy consumption by synchronizing accelerations and brakings.

We describe a model which does not alter quality of service by subtly modifying dwell times.

A hybrid genetic/linear algorithm has been implemented to tackle this problem and compute the distribution of braking metros.

On a typical example, the savings are more than 6%.

## 1 Introduction

L'optimisation de la consommation d'énergie est une problématique majeure du XXI<sup>e</sup> siècle et les mé-

tros n'y échappent pas. Plusieurs solutions matérielles, telles que les volants d'inertie ou les super-capacités ont été développées pour réduire les pertes. Cependant, ces solutions impliquent la mise en place de nouveaux équipements coûteux sur les métros qu'il est parfois difficile de justifier financièrement.

Parallèlement, des solutions logicielles se contentant de modifier certains paramètres ont vu le jour. Cependant, optimiser une table horaire est réputé difficile et il a été prouvé que certaines instances se rapportent à des problèmes NP-complets connus [2]. Les optimisations sont donc par essence des recherches d'optima locaux dès que les instances sont de grande taille. Albrecht [1] implémente un algorithme génétique et montre qu'il est possible de diminuer la consommation d'énergie et plus particulièrement les pics de puissance en utilisant le temps de réserve des métros. Cependant cette optimisation se fait en modifiant les allures des trains, ce qui peut être compliqué à implémenter en temps réel. Kim et al. [4] proposent quant à eux un modèle en programmation linéaire mixte en nombres entiers pour optimiser les départs des métros. Cette modélisation est intéressante mais est trop simplifiée et les modifications sont trop simples pour pouvoir correspondre à la réalité. Ces simplifications sont néanmoins obligatoires dans ce genre de modélisation du fait des temps de calculs. Enfin, Nasri et al. [5] montrent qu'il pourrait être possible de diminuer la consommation d'énergie en modifiant les temps de stationnement.

Dans cette article nous décrivons une méthode se focalisant sur la synchronisation logicielle des freinages et accélérations des métros en jouant sur les temps

de stationnement, variables facilement modifiables en temps réel. Pour cela, nous utiliserons la programmation linéaire hybridée à un algorithme génétique pour réduire la consommation globale du réseau plutôt que de seulement lisser les pics de puissance et ce de façon rapide et efficace.

## 2 Problématique

L'énergie consommée dans une ligne peut être diminuée en synchronisant les freinages et les accélérations des métros. En effet, le moteur électrique d'un métro qui freine se comporte comme un générateur en transformant son énergie cinétique en énergie électrique directement disponible dans le 3<sup>e</sup> rail. Cette énergie est instantanée et se dissipe si aucun métro dans le voisinage ne peut l'absorber.

Un métro candidat ne peut de toute façon absorber qu'une partie de l'énergie générée par un métro au freinage. Le reste de cette énergie est dissipée dans le circuit électrique sous forme de chaleur.

La plupart des tables horaires ne tiennent pas compte des problématiques énergétiques. Elles ont été créées pour donner une qualité de service maximale aux usagers mais en tenant aussi compte, par exemple, des plages de travail des conducteurs, des heures de la journée ou de la période de l'année.

Il est bien souvent hors de question de modifier complètement une table horaire seulement pour prendre en compte des problématiques énergétiques. Il est cependant possible de modifier légèrement celles-ci pour inclure une optimisation de l'énergie consommée sur une période de temps donnée.

On cherchera ici à minimiser la consommation d'énergie d'une ligne de métro sur une tranche horaire précise en modifiant la table horaire hors-ligne.

## 3 Données

Le modèle est restreint à une ligne de métro simple (pas de fourche ou de boucle) composée de 31 stations dont deux terminus A et B. La totalité des métros effectue le trajet A vers B ou B vers A suivant leur orientation.

La table horaire, basée sur des données réelles, est un peu plus détaillée que celle donnée à l'usager. Outre les heures de départ en terminus et en station, elle se décompose en différents tableaux compilant entre autres :

- les temps de parcours entre chaque station
- les temps de stationnement à chaque station.

Le temps de stationnement représente le temps d'attente nominal d'un métro dans une station donnée. Ce temps peut être différent suivant les stations mais

on considère ici que tous les métros ont toujours le même temps de stationnement pour une station donnée, quelle que soit l'heure de la journée.

Pour chaque intervalle de temps (1 seconde dans le modèle), on connaît aussi la position du métro (entre quelles stations il se trouve) et son énergie, positive s'il en consomme et négative s'il en génère. Contrairement aux données de temps qui sont réelles, les données d'énergie ont été créées en suivant toutefois des modèles d'énergie comme dans [4]. Les unités sont arbitraires : une valeur de 1 dans ce système équivaut à l'énergie consommée par un train accélérant à pleine puissance pendant 1 seconde.

Une matrice d'atténuation compile les dissipations d'énergie entre différents points du réseau. Par exemple que si un train génère de l'énergie au point a, un train au point b ne pourra absorber que  $\tau\%$  de cette énergie, le reste étant dissipé dans la voie.

## 4 Modèle

### 4.1 Table horaire

L'objectif (1) est de minimiser la consommation d'énergie sur une période de temps donnée, donc de minimiser la somme des consommations d'énergie à chaque intervalle de temps. Si on prend  $T$  l'ensemble des intervalles de temps et  $y_t$  la consommation d'énergie du réseau à l'instant  $t$  on a donc comme fonction objectif :

$$\min \sum_{t \in T} y_t \quad (1)$$

Pour calculer  $y_t$ , on utilise un module de programmation linéaire. La minimisation de la fonction objectif, c'est-à-dire l'optimisation de la consommation d'énergie sur un horizon  $T$  se fait en modifiant les temps de stationnement pertinents sur cet horizon. Le fait de modifier les temps de stationnements sur l'horizon permet de décaler les horaires des trains par rapport aux autres et ainsi de mieux synchroniser les accélérations et freinages entre eux.

Le calcul des des temps de stationnements pertinents se fait d'abord en calculant l'ensemble des trains pertinents sur l'horizon comme suit :

### Ensembles

- $T$  : horizon de temps (intervalle).
- $I$  : métros.
- $S$  : stations.
- $\mathcal{I}_t$  : métros roulant (pertinents) à l'instant  $t \in T$ .
- $\mathcal{S}_T$  : métros pertinents sur l'horizon  $T$ .
- $\Delta_i$  : temps de stationnement de  $i \in I$ .
- $\mathcal{D}_{i,T}$  : temps de stationnement pertinents de  $i \in I$  sur l'intervalle  $T$ .

- $\mathcal{D}_T$  : temps de stationnement pertinents sur l'intervalle  $T$ .

### Paramètres

- $D_i$  : départ au terminus initial de  $i \in I$ .
- $D_{d_{i,s}}$  : instant d'arrivée de  $i \in I$  à son point de stationnement à la station  $s \in S$ .
- $L_i$  : temps de trajet initial de  $i \in I$ .
- $T_0$  : borne inf de  $T$ .
- $T_{MAX}$  : borne sup de  $T$ .

### Variables

- $d_{i,s}$  : temps de stationnement de  $i \in I$  à la station  $s \in S$ .

### Modèle

$$\mathcal{I}_T = \bigcup_{t \in T} \mathcal{I}_t \quad (2)$$

$$\text{avec } \mathcal{I}_t = \{i \in I / D_i + L_i \geq t \geq D_i\} \quad (3)$$

(3) et (2) explicitent que les trains pertinents sont ceux qui roulent effectivement sur la voie au moins à un instant donné de l'intervalle de temps que l'on prend pour horizon.

Le calcul des trains pertinents sur l'horizon (2) permet de calculer les temps de stationnement pour chacun d'eux :

$$\mathcal{D}_T = \bigcup_{i \in \mathcal{I}_T} \mathcal{D}_i \quad (4)$$

$$\text{avec } \mathcal{D}_i = \{d_{i,s} \in \Delta_i / T_0 \leq D_{d_{i,s}} \leq T_{MAX}\} \quad (5)$$

Ce sont donc ces temps de stationnement  $d_{i,s} \in \mathcal{D}_T$  que l'on modifiera dans l'algorithme génétique pour tenter de minimiser la fonction objectif.

## 4.2 Énergie instantanée

La modification des temps de stationnements entraîne une synchronisation différente des métros entre eux. Il faut donc calculer à chaque itération de l'algorithme la fonction objectif en chaque instant. Le problème est qu'il est difficile de savoir en général comment se comporte dans le 3<sup>e</sup> rail, l'électricité produite par les trains freinant. [3] fait l'hypothèse que les métros qui freinent peuvent donner entièrement leur énergie à d'autres métros mais seulement s'ils font partie de la même sous-section électrique (portion de la ligne de métro).

On fait ici l'hypothèse que l'énergie se dissipe selon une loi de distance entre les trains compilée dans une matrice d'atténuation. On fait aussi l'hypothèse qu'un métro peut potentiellement donner son énergie à un métro à n'importe quel point de la ligne.

Cependant, on considère que l'énergie régénérée par les métros freinant se répartit de façon optimale parmi les métros accélérant, le modèle tente donc de minimiser la perte d'énergie par dissipation. Pour un intervalle de temps donné on a donc :

### Ensembles

- $I^+$  : métros consommant de l'énergie.
- $I^-$  : métros produisant de l'énergie.

### Paramètres

- $E_i^+$  : énergie consommée par le métro  $i \in I^+ (> 0)$ .
- $E_i^-$  : énergie produite par le métro  $i \in I^- (< 0)$ .
- $A_{i,j}$  : dissipation par effet Joule entre le métro  $i \in I^-$  et  $j \in I^+$ .

### Variables

- $x_{i,j}$  : part de l'énergie produite par  $i \in I^-$  donnée à  $j \in I^+$ .

### Modèle

$$\text{minimize } y \quad (6)$$

subject to

$$\sum_i^{I^+} E_i^+ + \sum_i^{I^-} (E_i^- \cdot \sum_j^{I^+} x_{i,j} \cdot A_{i,j}) \leq y \quad (7)$$

$$\sum_j^{I^+} x_{i,j} \leq 1 \quad \forall i \in I^- \quad (8)$$

$$-x_{i,j} \cdot E_i^- \cdot A_{i,j} \leq E_j^+ \quad \forall i \in I^-, \forall j \in I^+ \quad (9)$$

$$x_{i,j} \geq 0 \quad \forall i \in I^-, \forall j \in I^+ \quad (10)$$

$$y \geq 0 \quad (11)$$

(6) est la fonction minimisation alors que (7) force celle-ci à être supérieure ou égale à la somme des consommations d'énergie moins la somme des énergies produites corrigées par un coefficient d'atténuation. (8) force chaque métro producteur à partager son énergie entre les métros consommateurs. (9) empêche un métro producteur de donner à un métro consommateur plus que ce qu'il peut accepter. (11) explicite qu'il ne peut pas y avoir d'énergie négative sur un intervalle de temps. Si l'énergie produite par les métros est supérieure à l'énergie consommée, alors ce surplus est perdu.

## 5 Algorithme génétique

La synchronisation des métros se fait en modifiant les temps de stationnement. Il est possible de modifier

légèrement ceux-ci sans altérer la qualité de service. Typiquement, un usager ne remarquera pas si son métro reste quelques secondes de plus ou de moins arrêté à une station. De plus, faire de légères modifications n'influence pas la solution finale en termes de faisabilité puisqu'on reste dans les intervalles acceptables de distance entre les métros par exemple.

Chaque individu de la population est représenté par une liste arrêts en station des différents métros roulant pendant la durée de l'intervalle que l'on veut optimiser. Cette liste est couplée aux temps de stationnement correspondants.

En partant des temps de stationnement initiaux, on crée une population de 100 individus dont les temps de stationnement sont tirés au hasard parmi un domaine prédéfini  $\{-3s, 0s, +3s, +6s, +9s\}$ . A chaque itération, les individus sont classés selon la qualité de leur fonction objectif, puis sélectionnés, croisés et mutés jusqu'à convergence.

## 6 Résultats

### 6.1 Temps de calcul

Le modèle a été testé sur un horizon d'une heure, correspondant à 3600 intervalles de temps d'une seconde, 29 métros et 495 temps de stationnement à optimiser. La valeur initiale de l'énergie totale consommée sur cette période est de 8504 u.a. Après 450 itérations, l'énergie totale est passée à 7939,4 u.a, soit une réduction de 6,6%.

Le temps de calcul sur un PC Linux équipé d'un processeur double cœur Intel Core 2 1,86GHz est de plus de 88h. Ce temps de calcul reflète un objectif d'optimisation maximum plutôt que de rapidité. Le but du modèle étant d'optimiser une table horaire hors-ligne, la contrainte est sur la qualité de la solution plutôt que sur le temps passé à la trouver.

### 6.2 Robustesse

Un réseau de métro réel est sujet à de multiples perturbations mineures qui peuvent affecter de quelques secondes les différents paramètres.

Pour vérifier la pertinence de l'optimisation, on a ajouté du « bruit » aléatoire sur les temps de stationnement optimisés pour quantifier la robustesse de la fonction objectif. Ce bruit consiste à modifier aléatoirement les temps de stationnement de  $\pm\delta s$ .

La table 1 compile ces résultats. On y voit que même avec un bruit de 6 secondes (correspondant à 2 intervalles de modification des temps de stationnement), la fonction objectif reste de bonne qualité par rapport à l'état initial puisque la réduction moyenne reste tout de même de 5,6%. Cela signifie que non seulement la

Bruit (s)	1	3	6
Moyenne sur 100 essais (u.a.)	7964,9	7995,7	8028,4
Economie (%)	6,3	6,0	5,6

TABLE 1 – Altération de la fonction objectif en fonction du bruit

solution optimisée est de bonne qualité mais que toutes les solutions voisines le sont aussi.

## 7 Perspectives

Cette méthode de résolution pour l'optimisation de l'énergie consommée sur une ligne de métro semble prometteuse et mérite de plus amples recherches. Le choix des paramètres à optimiser est à approfondir. Il serait en effet intéressant de modifier les heures de départ ou les allures des métros pour optimiser encore plus finement.

On pourra essayer de comparer les résultats de cette méthode avec un codage en programmation linéaire mixte par nombres entiers.

En abaissant les temps de calcul, cette méthode devra permettre d'effectuer des optimisations en temps réel, en particulier quand il est question d'optimiser la consommation d'énergie après des incidents en ligne.

## Références

- [1] T. Albrecht. Reducing power peaks and energy consumption in rail transit systems by simultaneous metro running time control. *Computers in Railways IX*, 2004.
- [2] E. Bampas, G. Kaouri, M. Lampis, and A. Pargourtzis. Periodic metro scheduling. *ATMOS 2006*, 2006.
- [3] K.M. Kim, K.T. Kim, and M.S. Han. A model and approaches for synchronized energy saving in timetabling. *WCRR 2011*, Mai 2011.
- [4] Kyung min Kim, Suk mun Oh, and Moonseob Han. A mathematical approach for reducing the maximum traction energy : The case of korean mrt trains. *IMECS 2010*, Mars 2010.
- [5] A. Nasri, M. Fekri Moghadam, and H. Mokhtari. Timetable optimization for maximum usage of regenerative energy of braking in electrical railway systems. *SPEEDAM 2010*, 2010.