

## Régulation automatisée multi-objectif en temps réel d'une ligne suburbaine en zone dense

H. Meunier<sup>1,2</sup>, S. Baro<sup>2</sup>, V. Borodin<sup>1</sup>, S. Dauzère-Pérés<sup>1</sup>, J. Pochet<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mines Saint-Etienne, Univ Clermont Auvergne, CNRS, UMR 6158 LIMOS, F-42023 Saint-Etienne, France  
{h.meunier, valeria.borodin, dauzere-peres}@emse.fr

<sup>2</sup> SNCF RESEAU, DGII TTD NEXTEO EOLE, Cellule CBTC, Paris, France  
{hugo.meunier, sylvain.baro, juliette.pochet}@sncf.reseau.fr

**Mots-clés :** *Optimisation multi-objectif lexicographique, Train Retiming Problem, Graphe conjonctif, Modèle microscopique, Simulation-optimisation*

### 1 Exploitation suburbaine en zone dense

A l'instar des métros et suite à l'augmentation du trafic en milieu urbain, un intervalle temporel régulier entre les trains des lignes suburbaines devient désormais nécessaire. Les lignes suburbaines traversent des zones ouvertes. Par conséquent, il est aussi important de respecter les horaires théoriques des circulations sous peine de perturber le réseau environnant. Les lignes équipées d'un système de contrôle automatisé (ex : *Communication Based Train Control System (CBTC)*) permettent d'assurer une régulation en temps réel pour ajuster les horaires et l'intervalle temporel entre les trains lors de perturbations. Pour ce faire, le problème de *train retiming* est résolu sur une ligne équipée d'un système CBTC. De nouveaux horaires de départs et d'arrivées sont proposés pour optimiser la ponctualité et l'intervalle temporel entre les trains à partir du plan de transport théorique et des états courants des trains.

Une représentation microscopique, détaillant l'infrastructure ferroviaire et le fonctionnement des trains en station, est considérée dans une approche centralisée pour traiter simultanément toutes les stations de la ligne. En nous basant sur le modèle d'optimisation [3], plusieurs fonctions multi-objectif sont testées dans le cadre d'une approche simulation-optimisation.

### 2 Modélisation centralisée et microscopique

Les problèmes ferroviaires de séquençement et d'ordonnancement peuvent être formulés sous la forme d'un problème d'ordonnancement avec contraintes de blocage et sans attente entre les tâches [1,3]. Le plan de transport théorique indique les ressources utilisées successivement par chaque train (itinéraires et plateformes) ainsi que l'ordre des trains sur la ligne. Ces donnéesinstancient le problème de *train retiming* sous la forme d'un graphe conjonctif, exprimé sous la forme d'un programme linéaire [3].

Chaque station est représentée par un graphe conjonctif, composé de jobs. Un job détaille, d'un point vu microscopique, une succession d'opérations (établissement d'itinéraire, arrivée, départ, etc.) réalisée par un train dans une station desservie. Un temps minimal est imposé entre chaque paire d'opérations successives. Ce temps représente un temps de parcours, un temps de stationnement minimal ou un temps de mise en place pour une ressource itinéraire. Une opération nécessite ou libère une ou plusieurs ressources (itinéraires, quais). Des contraintes de blocages placées entre les jobs expriment les principales interactions entre les trains (contraintes opérationnelles de type signalisation et espacement). Enfin, les graphes sont liés par des contraintes physiques de vitesse, à savoir le temps de parcours minimal d'un train entre deux quais.

Cette vision centralisée et microscopique de la ligne permet de déterminer une grille horaire optimisée et réaliste à court terme, utilisable dans un contexte temps réel soumis à des perturbations.

### 3 Optimisation multi-objectif et résultats

Les trains suburbains doivent en priorité respecter leur horaire théorique pour ne pas impacter le trafic ferroviaire en zone ouverte. A fortiori, les trains doivent être à l'heure à l'entrée de la zone ouverte. Afin de faciliter la régulation en cas de perturbation, nous proposons une résolution lexicographique minimisant dans un premier temps la *ponctualité* des circulations à l'entrée de la zone ouverte, puis l'*intervalle temporel* entre les trains circulant en zone dense. Deux fonctions bi-objectif sont considérées : (1) minimisation des retards à l'entrée de la zone ouverte, puis minimisation de l'intervalle temporel maximal et minimal entre deux trains successifs ; (2) minimisation des retards à l'entrée de la zone ouverte, puis minimisation de la Racine de l'Écart Quadratique Moyen (REQM) entre les intervalles théorique et effectif entre deux trains successifs. Les fonctions (1) et (2) sont comparées à une fonction mono-objectif : (3) minimisation des retards à l'entrée de la zone ouverte.

Le module de régulation basé sur le modèle d'optimisation multi-objectif proposé est intégré au simulateur microscopique SIMONE [2]. Il est appelé de manière événementielle et transmet directement les nouveaux horaires au simulateur.

Les tests conduits se basent sur l'infrastructure du tronçon central de la ligne de RER E de Paris, prochainement équipée d'un système CBTC. Quatre trains parcourent la ligne et sont espacés d'un intervalle théorique de deux minutes. Le premier train est temporairement bloqué à la station Magenta.

Fonction objectif	Perturbation : 100 s		Perturbation : 150 s		Perturbation : 300 s	
	Retard Zone Ouverte (s)	Intervalle : REQM	Retard Zone Ouverte (s)	Intervalle : REQM	Retard Zone Ouverte (s)	Intervalle : REQM
(1)	<b>0,8</b>	61	<b>3,0</b>	60	<b>327</b>	283
(2)	2,9	<b>16</b>	6,5	<b>38</b>	349	<b>242</b>
(3)	1,9	142	3,7	204	332	316

Tableau 1 - Retard en entrée de zone ouverte et écart à l'intervalle

Les résultats obtenus (cf. Tableau 1) montrent que la fonction bi-objectif (2) permet d'obtenir un intervalle temporel plus régulier pour chaque scénario de perturbation, tout en ayant un retard total à l'entrée de la zone ouverte négligeable vis-à-vis des retards obtenus avec la fonction mono-objectif (3). Les résultats seront plus largement commentés lors de la conférence.

### 4 Conclusions et perspectives

Cette contribution se focalise sur le problème de *train retiming* abordé de façon centralisée. Basé sur une représentation microscopique de l'infrastructure ferroviaire, le modèle d'optimisation multi-objectif proposé détermine une grille horaire optimisée et faisable, en ajustant les horaires de départs et d'arrivés des trains suburbains en cas de perturbation.

Une première perspective consisterait à tolérer un certain retard en entrée de la zone ouverte afin de pouvoir explorer de meilleures solutions. De plus, la régulation pourrait considérer une gestion de l'intervalle temporel à court et moyen termes à l'aide d'un facteur d'actualisation.

### Références

- [1] A. D'Ariano, D. Pacciarelli, and M. Pranzo, "A branch and bound algorithm for scheduling trains in a railway network," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 183, no. 2, pp. 643–657, 2007, doi: 10.1016/j.ejor.2006.10.034.
- [2] J. Pochet, S. Baro, and G. Sandou, "Automatic train supervision for a CBTC suburban railway line using multiobjective optimization," in *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC*, 2018, vol. 2018-March, pp. 1–6, doi: 10.1109/ITSC.2017.8317670
- [3] H. Meunier, S. Baro, V. Borodin, S. Dautère-Pérès and J. Pochet. "Microscopic modeling approach for real-time train retiming under disturbances for a CBTC suburban railway line," *RailBeijing 2021 (9th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis)*, 10 pages, 2021.