



**HAL**  
open science

## Optimisation et simulation pour la planification robuste des roulements d'engins en milieu ferroviaire

Sabine Trefond, Housni Djellab, Alain Billionnet, Sourour Elloumi

► **To cite this version:**

Sabine Trefond, Housni Djellab, Alain Billionnet, Sourour Elloumi. Optimisation et simulation pour la planification robuste des roulements d'engins en milieu ferroviaire. 14<sup>e</sup> conférence ROADEF de la Société Française de Recherche Opérationnelle et Aide à la Décision, Feb 2013, TROYES, France. hal-00848279

**HAL Id: hal-00848279**

**<https://hal.science/hal-00848279>**

Submitted on 25 Jul 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 et simulation pour la planification robuste des roulements d’engins en milieu ferroviaire

Sabine Tréfond<sup>1,2</sup>, Housni Djellab<sup>1</sup>, Alain Billionnet<sup>2</sup>, Sourour Elloumi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Direction de l’Innovation et de la Recherche, SNCF  
40 avenue des Terroirs de France, 75012 Paris, France

`sabine.trefond@sncf.fr`

<sup>2</sup> CEDRIC-ENSIIE

1, square de la Résistance, 91025 EVRY, France

**Mots-clés** : *Transport ferroviaire, données incertaines, robustesse, planification*

## 1 Introduction

La ponctualité et la fiabilité sont des composantes vitales de la qualité du service de transport des passagers à la SNCF. Or les différents aléas en opérationnel, qui touchent à la fois l’infrastructure, les engins et le personnel, peuvent avoir un impact important sur cette fiabilité et sur cette ponctualité. En effet, ils remettent parfois en cause le plan de transport (horaires des trains, plannings des engins et des agents), dégradant la qualité de service offerte et les coûts de production. On s’intéresse ici à la planification des engins dans un contexte de transport express régional (TER). Afin de prévenir d’éventuelles perturbations, nous cherchons à construire des roulements d’engins robustes. La robustesse est intégrée sous deux formes : d’une part, l’incertitude sur les horaires est modélisée par des scénarios de retards, d’autre part, des critères correspondant à des attentes du métier en termes de robustesse sont optimisés. Nous proposons une métaheuristique permettant de construire des roulements d’engins robustes à coûts constants, et une méthode de simulation afin d’évaluer la robustesse des solutions obtenues.

## 2 Problème de planification des roulements d’engins

Le problème de planification des roulements d’engins, essentiel dans le processus de production d’un plan de transport, a souvent été étudié dans la littérature (e.g. Schrijver [4]). Il s’agit de déterminer pour chaque engin une suite de tâches à réaliser sur une période donnée.

A la SNCF, Marcos [2] a développé un logiciel permettant de résoudre le problème de planification des roulements d’engins en minimisant le nombre d’engins utilisés : planification des ressources de transport optimisée (PRESTO). Un **engin** est un ensemble de rames indivisible dont on connaît le nombre de places (nombre de passagers pouvant être transportés). Dans PRESTO, une **tâche**  $t_i$  est un trajet défini par des gares et des horaires de départ et d’arrivée ( $g_i^{dep}$ ,  $g_i^{arr}$ ,  $d_i^{dep}$  et  $d_i^{arr}$ ). Chaque tâche est par ailleurs caractérisée par une demande (nombre de passagers à transporter) et une capacité (nombre maximum d’engins affectés à la tâche). Une **ligne de roulement** est une suite de tâches effectuées par un engin sur la période donnée. Un **roulement d’engins** est un ensemble de lignes de roulement satisfaisant certaines contraintes (e.g. cohérence spatio-temporelle, maintenance).

Le problème est modélisé par un graphe spatio-temporel  $H = (V, A, L)$ , où  $V$  est l’ensemble des sommets,  $A$  l’ensemble des arcs, et  $L$  la période de temps (e.g. une semaine). Un sommet  $v = (g, d)$  correspond à une gare  $g$  et un horaire  $d$ . Une source  $s$  et un puits  $p$  correspondent aux points de départ et d’arrivée fictifs des engins. Chaque tâche  $t_i$  est représentée par un

arc-tâche de sommet d'origine  $(g_i^{dep}, d_i^{dep})$  et de destination  $(g_i^{arr}, d_i^{arr})$ . Certains nœuds associés à une même gare  $g$  sont liés par des arcs-attentes, correspondant à des temps de stationnement dans la gare  $g$ . On obtient alors un graphe acyclique orienté. La ligne de roulement associée à un engin est représentée par un chemin de  $s$  à  $p$  dans ce graphe.

La première étape de PRESTO est la résolution d'un programme linéaire en nombres entiers (PLNE) correspondant à un problème de multiflot, qui calcule le nombre d'engins circulant sur chaque arc (flots), en minimisant le nombre total d'engins utilisés. La seconde étape est décomposée en trois post-traitements : construction de chemins de  $s$  à  $p$  dans le graphe en respectant les flots calculés, enchaînement des chemins de façon à obtenir un roulement admissible, et intégration des contraintes de maintenance.

### 3 Approche proposée

Nous proposons d'intégrer la robustesse à deux niveaux. D'une part, l'incertitude sur les horaires est modélisée par des retards affectés aux tâches et pris en compte lors de l'optimisation. D'autre part, des critères permettant de garantir une certaine robustesse d'un point de vue métier sont optimisés pendant la construction du roulement. Par ailleurs, une méthode de simulation permet d'évaluer la robustesse des solutions obtenues par optimisation.

#### 3.1 Génération de scénarios de retards

BREHAT est une base de données contenant les horaires théoriques et réalisés des trains. Elle nous permet de répartir les trains en catégories appelées strates selon leur retard (e.g. entre 0 et 2 minutes, entre 2 et 5 minutes, etc.), leur période (e.g. période creuse) et leur zone d'appartenance. Nous pouvons ensuite générer des scénarios de retards par échantillonnage. Un scénario est un ensemble de retards sources, c'est-à-dire non issus de retards précédents, affectés aux tâches du graphe. Nous avons envisagé deux stratégies : l'allocation représentative nous permet de générer des retards dans le but de simuler le comportement des solutions en situation réaliste, l'allocation efficace nous permet de générer des retards plus importants afin de construire des solutions robustes à des situations plus perturbées (e.g. Chandesris [1]).

#### 3.2 Mesure de la robustesse

Afin d'évaluer la robustesse d'un roulement, nous avons identifié des critères de robustesse à optimiser lors de la construction de roulements. Les critères suivants ont été sélectionnés suite à une analyse de la littérature (e.g. [3, 5]) et à des rencontres avec des experts métier (TER) :

- **Nombre de recompositions** : lorsque plusieurs engins effectuent la même tâche, on parle d'unité multiple (UM). Dans le cas d'une UM, les engins doivent être connectés en début de tâche, puis déconnectés en fin de tâche. Il s'agit de recompositions, opérations qui augmentent le risque d'incidents. On cherche donc à limiter le nombre de recompositions.
- **Répartition équilibrée des temps de retournement** : le temps de retournement est l'intervalle de temps entre deux tâches qui se suivent, c'est-à-dire le temps de stationnement en gare d'un engin. Un temps de retournement très faible augmente le risque de propagation de retards. On cherche donc à la fois à maximiser le temps de retournement le plus faible et à homogénéiser tous les temps de retournement du roulement.
- **Répartition équilibrée de la charge de travail**
- **Retard propagé cumulé** : le retard propagé est le retard au départ d'un train lié au train précédent. On cherche à le limiter afin d'adoucir un éventuel effet boule-de-neige.
- **Régularité** : on cherche à maximiser le taux de trains à l'heure, un train étant à l'heure s'il arrive avec un retard inférieur à un seuil prédéfini.
- **Temps de retour à la normale** : on cherche à limiter la durée entre l'apparition d'un incident et le moment où l'on n'observe plus de conséquences de cet incident.

### 3.3 Heuristique pour la construction de roulements robustes

La méthode que nous proposons permet de construire un roulement admissible qui respecte le nombre d'engins minimal et les flots calculés par PRESTO, tient compte des données supplémentaires sur le retard, et est guidé par l'amélioration des critères de robustesse.

La construction des roulements se fait en deux phases. Pour chaque phase, on peut sélectionner les critères de robustesse à prendre en compte, puis définir une hiérarchie des critères sélectionnés.

**Phase 1 : Algorithme glouton de construction d'une solution initiale** Dans le graphe de PRESTO dont les flots sur les arcs ont été calculés, un algorithme glouton construit des chemins de la source  $s$  au puits  $p$  en minimisant les critères de robustesse. Les tâches sont traitées dans l'ordre chronologique (selon l'horaire de début). Chaque tâche peut être affectée à une ou plusieurs lignes de roulement en cours de construction. Pour chaque affectation possible, les valeurs des critères du roulement partiel correspondant sont calculées. C'est l'affectation qui donne les meilleures valeurs qui est choisie.

**Phase 2 : Amélioration de la solution courante par recherche locale** L'algorithme glouton permet d'obtenir un roulement d'engins et d'en calculer la valeur des critères de robustesse. Afin d'améliorer ces critères, nous proposons une méthode basée sur la recherche locale. Nous avons testé deux voisinages :

- Interdiction de tâches : parmi les lignes de roulement dégradant le plus les critères, une tâche est choisie aléatoirement et "interdite" sur cette ligne. Le roulement est alors reconstruit à partir de cette tâche par l'algorithme glouton en respectant l'interdiction.
- Croisement de lignes : deux lignes de roulement  $l_i$  et  $l_j$  qui se rencontrent en une gare sur une même période sont croisées, une nouvelle ligne est composée du début de  $l_i$  et de la fin de  $l_j$ , tandis qu'une seconde ligne est créée à partir du début de  $l_j$  et de la fin de  $l_i$ .

Dans les deux cas, les valeurs des critères sont à nouveau calculées, et la meilleure solution est gardée. Si la meilleure solution courante n'est pas améliorée sur un nombre d'itérations fixé, elle est sauvegardée et une nouvelle phase de recherche locale est lancée à partir de la solution initiale.

### 3.4 Evaluation et validation des solutions obtenues

Un simulateur utilise les strates construites à partir de BREHAT pour générer  $S$  scénarios de retards. Un scénario consiste à affecter une valeur supplémentaire  $\delta_i$  à chaque tâche  $t_i$ , correspondant à une augmentation  $\delta_i$  de sa durée. Cette valeur supplémentaire est tirée aléatoirement et de façon à respecter les strates : si la fréquence d'apparition d'un retard de 2 à 5 minutes était de 10% dans BREHAT, la probabilité de tirer un retard dans cet intervalle est de 0,1. Pour chaque scénario créé, le simulateur simule la propagation des retards dans le roulement construit par l'heuristique et en calcule la valeur des critères, afin d'en évaluer la robustesse.

## 4 Conclusions et perspectives

Nous avons effectué des tests sur des jeux de données réels du périmètre TER contenant entre 80 et 800 tâches à couvrir. Plusieurs configurations de tests ont été choisies : avec ou sans retard, combinaisons et priorités des critères à optimiser différentes.

Nous avons choisi l'homogénéisation des temps de retournement comme unique critère à optimiser sur un scénario de retards, et une recherche locale par croisements de lignes, ce voisinage donnant de meilleurs résultats plus rapidement. On obtient alors un gain moyen de 30% par rapport aux solutions données par PRESTO sur 11 jeux de données réels. L'optimisation de ce critère permet aussi d'homogénéiser la charge de travail par engins, c'est-à-dire la durée

totale des tâches effectuées par un engin. En effet, pour un exemple à 11 engins dont la charge de travail moyenne par engin est de 2295 minutes, on observe un écart-type de 631 minutes pour la solution calculée par PRESTO, et de seulement 309 minutes pour la solution calculée par l'heuristique. La charge de travail est donc plus équitablement répartie dans la solution donnée par l'heuristique.

Nous avons simulé le comportement des solutions trouvées par PRESTO et par l'heuristique sur  $S = 100$  scénarios de retards différents, afin d'en évaluer la robustesse. Nous avons pu observer une amélioration moyenne de plus de 50% du retard propagé, et un gain moyen de plus de 9% sur la régularité, bien que ces critères n'aient pas été directement optimisés. En revanche, le nombre de recompositions augmente de presque 1% en moyenne.

L'heuristique paraît donc donner de bonnes solutions en un temps d'exécution relativement faible au problème de planification robuste des roulements d'engins pour les critères optimisés. Par ailleurs, les différents critères sont corrélés : l'homogénéisation des temps de retournement permet d'améliorer la régularité et de limiter le retard propagé de façon significative, mais semble incompatible avec la limitation du nombre de recompositions. Il faut donc définir une hiérarchie correspondant à des attentes métier précises.

Actuellement, la construction du roulement se fait à partir d'un unique scénario de retards. Afin de construire plusieurs roulements, nous pouvons appliquer l'heuristique à plusieurs scénarios, puis évaluer et comparer la robustesse des différents roulements par simulation sur un grand nombre de scénarios, afin de choisir celui qui semble le plus robuste.

## Références

- [1] M. Chandesris and V. Labouisse, Statistical methods for the evaluation of timetable robustness. *WCRR - World Congress on Railway Research 2003*, Edinburgh, 2003.
- [2] N. Marcos, D. De Almeida, D. Gauyacq, A. Quivet, A. Nagih, L. Alfarari, G. Plateau, Une approche de modélisation générique pour les problèmes de gestion des locomotives fret à la SNCF. *ROADEF 2005 : 6ème congrès de la société française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision*, Tours, 295-311, 2005.
- [3] L.K. Nielsen, L.G. Kroon, G. Maroti, Absorption Robustness of Railway Resource Schedules. *Technical Report 0113, EU ARRIVAL project*, Décembre 2007.
- [4] A. Schrijver, Minimum circulation of railway rolling stock. *CWI-Quarterly 6*, 205-217, 1993.
- [5] M.J.C.M. Vromans, R. Dekker, L.G. Kroon, Reliability and heterogeneity of railway services. *ERIM Report*, ERS-2003-090-LIS, 2003.