Train Corrective Maintenance Scheduling: Modelling and Exact Methods

Valentine Jourdan, Ronan Bocquillon and Vincent T'Kindt

February 10, 2020

Ordonnancement de la maintenance corrective de rames : modélisation et résolution exacte

Valentine Jourdan[1,2], Ronan Bocquillon[2], Vincent T'Kindt[2]

[1] SNCF - Direction du matériel - Ingénierie du matériel - Pôle de Saint-Pierre-des-Corps
`valentine.jourdan@sncf.fr`

[2] Université de Tours, Laboratoire d'Informatique Fondamentale et Appliquée (EA 6300)
ERL CNRS 7002 ROOT, Tours, France
`{ronan.bocquillon, tkindt}@univ-tours.fr`

Mots-clés : *Ordonnancement, Maintenance ferroviaire, Méthodes exactes, Programmation mathématique, Programmation par contraintes*

1 Introduction

La SNCF est confrontée à de nombreux problèmes d'ordonnancement complexes, tels que la planification des roulements des rames [2], de la maintenance préventive du matériel roulant [3, 4], et des voies [1].
À notre connaissance, l'ordonnancement de la maintenance corrective des rames n'a été que peu étudié dans la littérature. Ce problème consiste à planifier les rentrées de rame sur les voies des sites de maintenance sur un horizon de sept jours. Elles y subiront soit une opération de maintenance corrective, soit un diagnostic qui permettra une remise en circulation plus rapide mais avec des restrictions de circulation. Contrairement aux opérations préventives, qui peuvent être vues comme de la révision, et qui sont sont connues plusieurs mois à l'avance, les opérations correctives sont là pour corriger des problèmes qui surviennent de façon impromptue sur les rames. Cette planification ne doit perturber ni le service commercial, ni la maintenance préventive déjà prévue sur les sites. Ce problème peut être montré NP-difficile au sens fort. Dans ce travail, nous nous intéressons à sa modélisation et à sa résolution exacte.

2 Modélisation

Dans un premier temps, nous proposons un programme linéaire en nombres entiers.
Introduisons quelques notations pour comprendre le modèle : soient n le nombre d'opérations de maintenance, m le nombre de voies, D l'horizon de planification, n^u le nombre de types différents d'infrastructures, n^s le nombre de sites de maintenance, et n^h le nombre de créneaux horaires de travail sur ces sites dans l'horizon de planification. Chaque opération i possède : une durée de traitement p_i et une durée de diagnostic p_i^δ, une date de début au plus tard souhaitée d_i, un poids unitaire de retard w_i, un poids en cas de rejet u_i, et on lui associe des booléens $b_{i,k}$ pour indiquer si elle a besoin des infrastructures k. On associe à chaque voie j des booléens $a_{j,k}$ pour indiquer si elle possède les infrastructures k. Chaque site de maintenance l possède un ensemble de voies $\mathcal{L}_l$ et un ensemble de créneaux horaire de travail, ce qui impacte la disponibilité des voies. Durant chacun de ces créneaux h (composés d'un ensemble $\mathcal{H}_h$ de dates t), le nombre de rames pouvant entrer sur le site est limité. Une fonction f_t nous indique à chaque date t combien de rames peuvent être immobilisées en tout. Enfin, chaque couple (i, j) d'opération et de voie possède un ensemble d'intervalles de date de début possible de l'opération i sur la voie j qui est $\mathcal{T}_{i,j}^d = \{[\![t_k^-; t_k^+]\!] : k \in K_{ij}\}$.
Dans ce modèle, nous utilisons quatre types de variables : $x_{i,j,t}$, variable binaire qui vaut 1 ssi

l'opération i commence à la date t sur la voie j ; y_i, variable binaire qui vaut 1 ssi l'opération i est rejetée (i.e. elle subit seulement une opération de diagnostic) ; S_i, variable entière qui représente la date de début de l'opération i ; T_i, variable entière qui vaut 0 si l'opération n'est pas en retard, et la quantité de retard dans le cas contraire.
L'objectif est de minimiser la somme pondérée des retards tout en garantissant que le coût total de rejet est inférieure à un seuil ε donné. Le modèle est résolu à l'aide du solver Cplex.

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^{n} w_i \times T_i \tag{1}$$

Subject to

$$1 \geq \sum_{j=1}^{m} \sum_{[\![t^-;t^+]\!] \in \mathcal{T}_{i,j}^d} \sum_{t=t^-}^{t^+-p_i} x_{i,j,t} \geq 1 - y_i \ \forall i \in [\![1;n]\!] \tag{2}$$

$$\frac{2+y_i}{2} \geq \sum_{j=1}^{m} \sum_{[\![t^-;t^+]\!] \in \mathcal{T}_{i,j}^d} \sum_{t=t^-}^{t^+-p_i^\delta} x_{i,j,t} \geq y_i \ \forall i \in [\![1;n]\!] \tag{3}$$

$$b_{i,k} \times \sum_{[\![t^-;t^+]\!] \in \mathcal{T}_{i,j}^d} \sum_{t=t^-}^{t^+-p_i^\delta} x_{i,j,t} \leq a_{j,k} \quad \begin{array}{l} \forall i \in [\![1;n]\!] \\ \forall j \in [\![1;m]\!] \\ \forall k \in [\![1;n^u]\!] \end{array} \tag{4}$$

$$\sum_{\substack{i'=1 \\ i' \neq i}}^{n} \sum_{t'=t}^{t+p_i^\delta} x_{i',j,t'} \leq (1 - x_{i,j,t}) \times n, \quad \begin{array}{l} \forall i \in [\![1;n]\!] \\ \forall j \in [\![1;m]\!] \\ \forall t \in \mathcal{T}_{i,j}^d \end{array} \tag{5}$$

$$\sum_{\substack{i'=1 \\ i' \neq i}}^{n} \sum_{t'=t+p_i^\delta}^{t+p_i-1} x_{i',j,t'} \leq (y_i - x_{i,j,t} + 1) \times n, \quad \begin{array}{l} \forall i \in [\![1;n]\!] \\ \forall j \in [\![1;m]\!] \\ \forall t \in \mathcal{T}_{i,j}^d \end{array} \tag{6}$$

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \sum_{t'=max(0;t-p_i)}^{t} x_{i,j,t'} \leq f_t \ \forall t \in [\![0;D]\!] \tag{7}$$

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j \in \mathcal{L}_l} \sum_{t \in \mathcal{H}_k \cap \mathcal{T}_{i,j}^d} x_{i,j,t} \leq r_{l,k} \quad \begin{array}{l} \forall l \in [\![1;n^s]\!] \\ \forall k \in [\![1;n^h]\!] \end{array} \tag{8}$$

$$S_i \geq \sum_{j=1}^{m} \sum_{[\![t^-;t^+]\!] \in \mathcal{T}_{i,j}^d} \sum_{t=t^-}^{t^+-p_i^\delta} x_{i,j,t} \times t \ \forall i \in [\![1;n]\!] \tag{9}$$

$$T_i \geq S_i - d_i \ \forall i \in [\![1;n]\!] \tag{10}$$

$$\sum_{i=1}^{n} u_i \times y_i \leq \varepsilon \tag{11}$$

Nous proposons également un modèle de programmation par contraintes résolu par CPoptimizer. Ce modèle sera présenté lors de la conférence.
Nous présenterons également les résultats de la résolution de ces deux modèles sur des instances générées aléatoirement.

Références

[1] Gabriella Budai, Dennis Huisman, and Rommert Dekker. Scheduling preventive railway maintenance activities. *Journal of the Operational Research Society*, 57(9) :1035–1044, 2006.

[2] Nicolas Marcos, David de Almeida, Daniel Gauyacq, Laurent Alfandari, Anass Nagih, and Gérard Plateau. Une approche de modélisation générique pour la gestion des locomotives frêt à la sncf. In *ROADEF 2005*, Tours, 2005.

[3] François Ramond. *Planification optimisée des opérations dans les établissements de maintenance du matériel roulant de la SNCF*. PhD thesis, Saint-Etienne, EMSE, 2008.

[4] C Sriskandarajah, AKS Jardine, and CK Chan. Maintenance scheduling of rolling stock using a genetic algorithm. *Journal of the Operational Research Society*, 49(11) :1130–1145, 1998.