

Optimisation des tournées d'inspection des voies ferrées

Sébastien LANNEZ*

Directeur(s) de thèse : Christian ARTIGUES et Michel GENDREAU

Laboratoire d'accueil :
LAAS/CNRS
7, av. colonnel Roche,
31077 Toulouse

Établissement d'inscription :
INSA Toulouse
135, Avenue de Rangueil,
31077 Toulouse

Résumé

Le problème que nous considérons est la planification annuelle des tournées de surveillance des rails effectuées par les trois engins d'auscultation ultrasonore de la SNCF. La modélisation retenue pour le réseau ferroviaire induit un graphe de grande taille et impose l'utilisation de méthodes de résolution heuristique. Dans ce papier, nous présentons une modélisation mathématique du problème, une résolution heuristique par génération de colonne et programmation par contrainte, ainsi qu'une expérimentation numérique.

Mots-clés

Capacitated Arc routing; Column generation; Periodic Arc Routing; Railway Infrastructure Maintenance; Decomposition Method

1 INTRODUCTION

Dans ce papier, nous présentons une procédure d'optimisation des programmes d'auscultation ultrasonique d'un réseau ferroviaire. Cette méthode accompagnera l'Établissement Logistique National de la SNCF (ELOGN) dans sa réorganisation de la programmation des tournées de surveillance du réseau ferroviaire français. Aujourd'hui, l'ELOGN, avec l'aide des établissements régionaux, supervise certaines maintenances préventives dont l'auscultation ultrasonique du *champignon du rail*. Cette auscultation renseigne l'ELOGN sur l'apparition de nouvelles fissures dans le rail et permet de suivre leur évolution. Les fréquences de passages sur les tronçons de voies varient de 6 mois à 10 ans en fonction principalement du tonnage annuel qui les traverse. Cette maintenance préventive est réalisée à l'aide de trois trains spécialisés qui surveillent plus de 50.000 km de voies. Ces engins ne sont pas autorisés à ausculter toutes les parties du réseau, pour des raisons techniques, celles-ci sont auscultées manuellement.

En 2010, l'ELOGN sera directement responsable de 2/3 des inspections ultrasoniques nationales annuelles. Le sous réseau qu'elle devra ausculter est représenté en gras dans la carte de la figure 1. Les établissements régionaux renseigneront alors l'établissement national sur leur charge prévisionnelle annuelle de travail afin que ce dernier puisse leur affecter des engins libres.

Le reste de ce papier est organisé comme suit : la section 2 décrit le problème d'optimisation des tournées d'auscultations ; dans la section 3 nous présentons une brève revue de

*sebastien.lannez@sncf.fr

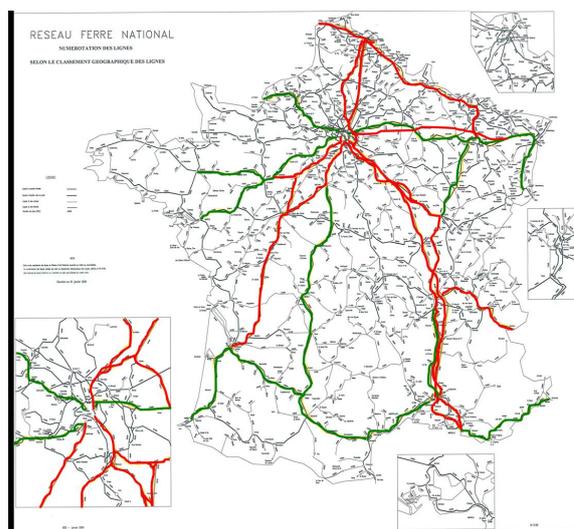


FIGURE 1 – Réseau grands axes.

littérature sur le problème ; dans la section 4 nous décrivons l’algorithme proposé ; la section 5 contient les expérimentations que nous avons menées. Nous concluons ce résumé par une analyse de l’algorithme utilisé et proposons des extensions au problème.

2 DESCRIPTION DU PROBLÈME

2.1 Enjeux industriels

En 2008, la conception des programmes d’auscultation par engins lourds est un processus long et complexe qui emploie plusieurs personnes à temps plein. L’usure des voies étant accélérée par la constante augmentation du volume de trafic, la SNCF devra adapter les politiques actuelles de maintenance pour supporter cette croissance. Une des possibilités sera l’augmentation des fréquences de surveillance qui augmenteront de fait la fiabilité du réseau. L’impact sur les coûts (achat ou location d’engins, réduction des maintenances correctives, etc.) justifie la création d’un outil pour déterminer les limites de l’utilisation optimisée du parc de ressources.

2.2 Description des engins

La flotte d’engins à ultrasons est composée de véhicules ayant des caractéristiques de circulation différentes. Nous considérons que tous les engins sont motorisés par des technologies thermiques. Il n’est donc pas nécessaire de différencier les types d’électrification. Chaque engin peut circuler sur le réseau en mode « transfert » - vitesse moyenne variant de 80 à 120 km/h - ou en mode « auscultation » - vitesse moyenne variant de 8 à 15 km/h. Ils ont une autonomie d’auscultation limitée par la quantité d’eau qu’ils peuvent transporter. Elle varie de 100 à 200 km suivant le type d’engin. Des contraintes d’affectation à certains sous réseaux doivent aussi être prises en compte. Ainsi, pour chaque engin est décrit un sous réseau sur lequel il peut circuler. Les organes de mesure et l’état des engins doivent être contrôlés régulièrement. Des rendez-vous de maintenance, différents pour chaque engin doivent être satisfaits tout au long de l’année. De plus, des contraintes de ressource interdisent l’auscultation simultanée par plusieurs engins d’une même région.

2.3 Auscultation et chantiers

Dans la nouvelle organisation, l'ELOGN aura la responsabilité de la surveillance des axes présentés dans la figure 1. Elle devra aussi assurer que les régions disposent des engins pour inspecter la partie du réseau sous leur responsabilité. Les régions soumettront leurs besoins en précisant les gares et les dates au plus tôt de prise en charge et de restitution au plus tard de l'engin, ainsi que la durée totale des auscultations à réaliser. Les demandes d'auscultation, les rendez-vous de maintenance et les demandes des régions seront décrits à l'aide de passages obligés sur les arcs. Ceux-ci sont définis pour une période et un tronçon de voie donnés. Ils sont modélisés par des fenêtres de temps décrivant la date de début d'auscultation au plus tôt et la date de fin d'auscultation au plus tard.

Les chantiers sur voies sont modélisés par des passages interdits. Ils sont souvent précédés d'une auscultation et empêche la circulation des trains. Ces passages interdits sont décrits par un tronçon de voie, une date de début et de fin des travaux. Pendant cet intervalle de temps, il est impossible de traverser le tronçon. Les tronçons de voie peuvent être auscultés plusieurs fois et être en chantier à différentes périodes de l'année.

3 REVUE DE LITTÉRATURE

Les problèmes de tournées de véhicules consistent à visiter un certain nombre de fois des clients à l'aide de véhicules. Le livre de P. Toth et D. Vigo[5], ainsi que celui de B. Golden [3] sont deux bonnes introductions aux problèmes de tournées sur nœuds. Ils présentent modèles et algorithmes pour la résolution de plusieurs problèmes de tournées de véhicules. Ces derniers utilisent des nœuds pour représenter les clients, les routes entre les clients étant modélisées par des arcs ou des arêtes. D'autres types de problématiques, introduits dans le livre de M. Dror[2], considèrent les arcs comme les clients. Ces derniers intéressent de plus en plus de chercheurs : sur l'ensemble des publications référencées par *sciencedirect.com* et *springerlink.com*, la recherche d'articles de revues contenant « arc routing » en mots clefs renvoie 76 publications entre 1997 et 2008. La moitié sont parues entre 2006 et 2008 !

Le problème que nous présentons généralise plusieurs problèmes de tournées sur arcs, comme le problème de tournées sur arc avec capacité (CARP), le CARP avec fenêtres de temps (CARP-TW), le CARP avec flotte hétérogène (H-CARP), et le CARP avec dépôts intermédiaires (CARP-IFL). La modélisation que nous avons retenue pour le problème d'inspection ultrasonore des voies s'appuie sur une représentation du réseau ferroviaire sous la forme d'un graphe dont les arcs représentent des tronçons de voie (rail) et les nœuds des communications entre les tronçons (aiguilles, gares). Ce graphe représente l'ensemble des déplacements possibles sur le réseau. Pour chaque tâche d'auscultation, l'arc correspondant au tronçon dont la tâche dépend est dupliqué. À chaque arc du graphe est associé un ensemble de fenêtres de temps modélisant les périodes pendant lesquelles il est possible de traverser l'arc. Ces fenêtres de temps sont utilisées pour décrire les dates des chantiers, mais aussi les dates de réalisation possible des tâches d'auscultation.

4 MODÉLISATION

Le modèle mathématique que nous décrivons dans cet article est inspiré de la décomposition de Dantzig-Wolfe[1]. Dans un premier temps, un algorithme de génération de colonnes est utilisé pour agréger intelligemment les tâches d'auscultation. Ensuite, un problème d'ordonnement affecte ces tâches aux engins et fixe les dates de réalisation.

Le problème maître de la génération de colonnes assure la satisfaction de toutes les tâches. Ses colonnes représentent des tournées partielles d'engins d'une journée, d'un point de garage à un autre (« journées type »). Elles sont générées par un problème de plus court chemin élémentaire avec contrainte de ressource. La génération de chemins élémentaires sur les arcs

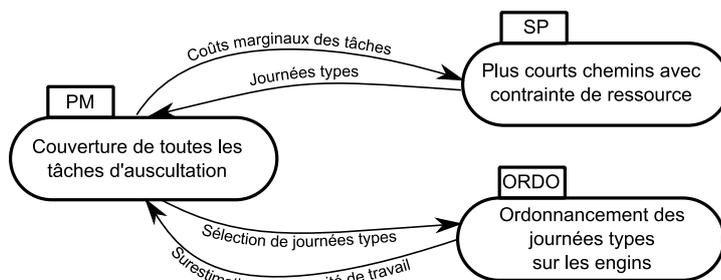


FIGURE 2 – Schéma de la décomposition fonctionnelle.

est nécessaire, sinon un nombre important de chemin généré contiendrait des tâches dupliquées. En effet, les coûts réduits des arcs dans le problème maître ne sont pas tous positifs. Le problème maître est utilisé pour sélectionner les journées type dans le but d’extraire un ensemble de chemins de durée minimale réalisant toutes les tâches d’auscultation.

Ces « super-tâches » sont ensuite envoyées ordonnancés par un programme qui se charge de les dater et de minimiser la distance totale de transfert entre les journées. La figure 2 contient une représentation schématique de la décomposition proposée.

5 EXPÉRIMENTATION

La décomposition a été implémentée à l’aide des bibliothèques Cplex 11.0 et Scheduler 6.25 de l’éditeur Ilog[4]. Nous avons mené nos expérimentations en deux phases. Pendant la première, nous avons étudié la performance de l’algorithme d’agrégation en fonction du temps passé dans le sous problème et de l’utilisation d’une heuristique de restriction des colonnes. Ces tests ont été réalisés sur une machine équipée d’un processeur Intel Quad Core, 3.00 GHz. Le but de cette première phase était de trouver les meilleurs paramètres pour générer le plus rapidement possible une solution de bonne qualité. La résolution des sous problèmes est la partie la plus consommatrice de temps de calcul. Elle est donc parallélisée. Durant la résolution des sous problèmes, 2,5 cœurs sont utilisés en permanence sans perte de performance significative dû à la parallélisation. Durant la deuxième phase, nous avons utilisé les meilleurs paramètres trouvés précédemment pour tester la résolution de notre problème sur la machine cible. Celle-ci est équipée d’un processeur AMD Athlon 3400+, 2.2 GHz. Le temps de résolution maximum est fixé à 30 minutes. La moitié du temps est allouée à l’agrégation des tâches, l’autre moitié à l’ordonnancement de ces super-tâches.

5.1 Données

Les tests ont été réalisés sur un réseau généré aléatoirement avec les mêmes caractéristiques que le réseau ferroviaire français : densité, distribution des longueurs d’arcs et étalement géographique identique au réseau réel. Il y a en moyenne 1,5 tâches par arcs. La somme des durées des tâches est de 33 jours. Cette somme représente une borne inférieure car elle ne prend en compte ni l’autonomie en eau des engins, ni les trajets de transfert entre les tâches. L’objectif principal est de minimiser la durée des transferts. L’approche sera validée s’il est possible d’obtenir un ratio (durée des transferts/durée totale) inférieur à 50%.

5.2 Résultats

Phase I Le tableau 5.2 récapitule les temps et qualité des solutions des 5 meilleurs versions de l’algorithme. La version *Référence* est l’algorithme de base. Les version *esppMaxTime x* limite à x secondes le temps passé à chaque itération à rechercher des chemins élémentaires. La version *freezeBadColl* contient une routine désactivant 70% des colonnes ayant les plus

	5 min		10 min		15 min		t^*
	LP	MIP	LP	MIP	LP	MIP	
Référence	44j05h	54j08h	41j11h	54j08h	40j04h	54j08h	3m08s
esppMaxTime1	38j19h	47j10h	38j02h	47j10h	37j15h	47j10h	0m35s
esppMaxTime8	41j17h	50j10h	40j04h	50j10h	39j07h	50j10h	1m47s
esppMaxTime16	54j17h	57j23h	41j10h	57j23h	39j23h	57j23h	3m45s
freezeBadCol1	44j05h	53j01h	41j19h	53j01h	40j06h	53j01h	3m22s
freezeBadCol2	38j19h	46j08h	38j02h	46j08h	37j15h	46j08h	24s

FIGURE 3 – Phase I : Temps de résolution et qualité des solutions

grands coûts réduits strictement positifs. La version `freezeBadCol2` contient en plus une limitation de 1 seconde sur le temps passé dans les sous problèmes. La colonne *LP* contient la valeur de la relaxation linéaire du problème maître. La colonne *MIP* contient la valeur de la meilleure solution entière trouvée. La colonne t^* contient le temps qui a été nécessaire pour trouver la meilleure solution entière. Il est intéressant de remarquer que la meilleure solution entière est trouvée très rapidement dès que la relaxation linéaire propose une solution couvrant toutes les tâches.

Lorsque le temps de résolution des sous problèmes est petit, un grand nombre de colonnes sont générés rapidement, ce qui accélère la génération d'une bonne solution. Par contre, plus le temps passe, moins l'écart entre les valeurs des solutions de la relaxation linéaire est important. Pour les versions `esppMaxTime x` , à la fin des 5 premières minutes l'écart moyen est de 10 jours, tandis qu'au bout de 15 minutes il n'est plus que d'une journée. La version limitant le temps de calcul à une seconde par sous problème est celle qui trouve la meilleure solution le plus rapidement.

La meilleure solution trouvée nécessite 46 jours et 8 heures. Cette solution prend en compte les transferts au sein d'une journée, mais pas entre les journées. C'est la raison pour laquelle cette solution doit être passé à l'ordonnanceur, qui va rechercher, pour chaque machine, la séquence de journées qui minimise la durée des transferts.

Phase II Le test phase II a été réalisé sur la machine cible. Après la phase d'agrégation, un module d'ordonnancement gère l'affectation des super tâches aux machines et calcule leur date de réalisation. Ce test montre qu'en 30 minutes, il est possible d'obtenir une solution réalisable au problème, nécessitant 48 jours de travail. Cette solution représente donc un ratio de performance (durée des transferts/durée totale) de 32%. Ce ratio est acceptable puisque l'objectif est de réaliser le planning annuel avec moins de 50% de transfert.

6 CONCLUSION

Cet article a décrit une modélisation d'un problème d'optimisation de tournées d'auscultation de voies, une méthode de décomposition mathématique et une analyse numérique des solutions obtenues. L'approche a été validée expérimentalement sur un jeu de donnée. Elle satisfait les objectifs de qualité de solution (moins de 50% de transferts) et de temps de calcul (moins d'une heure). Une expérimentation sur le jeu de donnée réel reste à réaliser.

La suite de nos recherches consistera à améliorer cette méthode par l'implémentation d'une procédure plus efficace de résolution du problème maître. D'autres approches utilisant la programmation dynamique et une métaheuristique seront aussi évaluées. Des extensions du modèle sont prévues pour modéliser les auscultations de caténaires et de signalisation de voies, ainsi que les sous réseaux des régions. Enfin, le modèle d'ordonnancement pourra être étendu pour prendre en compte des journées de travail en 2x8 ou 3x8 pendant certaines

périodes de l'année. D'autres travaux sur la génération de solutions robustes aux pannes permettront d'étendre le problème du tactique vers le préopérationnel.

Références

- [1] G. DANTZIG et P. WOLFE. « The decomposition algorithm for linear programs ». *Econometrica*, 29(4) :767–778, 1961.
- [2] M. DROR, éditeur. *Arc Routing : Theory, Solutions and Applications*. Springer, 2000.
- [3] B. GOLDEN, S. RAGHAVAN et E. WASIL, éditeurs. *The Vehicle Routing Problem : Latest Advances and New Challenges*. Springer, 2008.
- [4] ILOG. « <http://www.ilog.com> ». 2009.
- [5] P. TOTH et D. VIGO, éditeurs. *The vehicle routing problem*. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA, USA, 2001.