



HAL
open science

Optimisation des tournées d'inspection des voies

Sébastien Lannez

► **To cite this version:**

Sébastien Lannez. Optimisation des tournées d'inspection des voies. Mathématiques [math]. INSA de Toulouse, 2010. Français. NNT: . tel-00595070

HAL Id: tel-00595070

<https://theses.hal.science/tel-00595070>

Submitted on 23 May 2011

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.



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA Toulouse)

Discipline ou spécialité :

Systèmes Industriels

Présentée et soutenue par :

Sébastien Lannez

le : jeudi 25 novembre 2010

Titre :

Optimisation des tournées d'inspection des voies

Ecole doctorale :

Systèmes (EDSYS)

Unité de recherche :

LAAS / CNRS

Directeur(s) de Thèse :

Christian Artigues (LAAS/CNRS, Toulouse)

Michel Gendreau (CIRRELT, Montréal, Canada)

Rapporteurs :

Pierre Dejax (Ecole des Mines de Nantes)

Christian Prins (Université de Technologie de Troyes)

Autre(s) membre(s) du jury

Jean Damay (SNCF)

Dominique Feillet (Ecole des Mines de Saint-Etienne)

Frédéric Semet (Ecole Centrale de Lille)

François Vanderbeck (Université de Bordeaux 1)



Table des matières

1	Introduction	11
I	Présentation de la problématique	13
2	Environnement industriel et problématique	15
2.1	Les maintenances industrielles	15
2.2	Le système ferroviaire	16
2.2.1	Les acteurs	16
2.2.2	La production ferroviaire	16
2.2.3	Le référentiel d'enregistrement	17
2.3	Enjeux de l'auscultation ultrasonore par engins lourds	17
2.4	Projet grands axes	17
2.5	Technique	18
2.5.1	La détection par ultrasons	18
2.5.2	Les engins	20
2.6	Étapes de la programmation	21
2.6.1	La conception des programmes d'auscultation	22
2.6.2	L'adaptation des programmes d'auscultation	22
2.6.3	La réalisation des programmes d'auscultation	23
2.6.4	Performance	23
2.7	Propositions	26
2.7.1	Conception	26
2.7.2	Adaptation	27
2.7.3	Réalisation	28
2.8	Motivation et enjeux	28
3	Revue de littérature	31
3.1	Théorie des graphes	31
3.2	Tournées sur arcs	32
3.2.1	Problèmes principaux	32
3.2.2	Variantes	33
3.2.3	Algorithmes de résolution	35
3.3	Applications	37
3.4	Maintenances des installations ferroviaires	38

4	Modélisation des tournées des engins de maintenances	41
4.1	Graphe	41
4.1.1	Vue macroscopique	41
4.1.2	Nœuds	42
4.1.3	Arcs	44
4.2	Modèle journée	45
4.3	Modèle engin	46
4.4	Formulations mathématiques	46
4.4.1	Formulation arc-flot (\mathcal{M}_{arc})	47
4.4.2	Formulation chemins ($\mathcal{M}_{\text{chemin}}$)	49
4.5	Décompositions mathématiques	51
4.5.1	Décomposition de Dantzig-Wolfe de \mathcal{M}_{arc} (\mathcal{M}_{DW})	51
4.5.2	Décomposition de Benders de $\mathcal{M}_{\text{chemin}}$ ($\mathcal{M}_{\text{Benders}}$)	53
II	Mise en œuvre	57
5	Approche algorithmique	59
5.1	Schéma général	59
5.2	Présentation du problème maître augmenté $\mathcal{M}'_{\text{Benders}}$	61
5.3	Résolution de $\mathcal{M}'_{\text{Benders}}$	62
5.3.1	Initialisation	62
5.3.2	Génération des colonnes	63
5.3.3	Détermination d'une solution entière	67
5.4	Génération des coupes de Benders Combinatoires	69
5.4.1	Description des sous problèmes de Benders	69
5.4.2	Simplification des coupes BC pour $\mathcal{M}'_{\text{Benders}}$	69
5.4.3	Coupe combinatoire « voyageur de commerce avec fenêtres de temps »	71
5.4.4	Coupe linéaire « affectation calendaire »	73
5.5	Projection des coupes BC : <i>Pseudo Coupes Locales</i>	75
5.6	Variantes	76
5.6.1	Heuristique gloutonne d'arrondi : <i>AlgoChvatalCover</i> incrémental	76
5.6.2	Heuristique d'ordonnancement : <i>AlgoSchedList</i> avec branchement	77
5.6.3	Heuristique d'ordonnancement : <i>AlgoSchedList</i> avec VCG	77
5.7	Un algorithme glouton évolué : <i>AlgoGreedy</i>	79
6	Tests numériques	81
6.1	Présentation du jeu de données	81
6.2	Détails d'implémentation	82
6.2.1	$\mathcal{M}'_{\text{Benders}}{}^0$: Initialisation	82
6.2.2	<i>AlgoEspprc</i> : Durée maximum dynamique	83
6.3	Comportement des algorithmes	83
6.3.1	Heuristique de couverture	83
6.3.2	Génération des journées de services	86
6.3.3	Sélection des journées de services	93
6.3.4	Ordonnancement des journées de services	93
6.4	Performance globale et impact des chantiers	96

6.4.1	Algorithme de référence	96
6.4.2	Algorithme final	97
6.5	Influence des pseudo coupes locales	97
7	Logiciel	99
7.1	Architecture	99
7.2	Données	100
7.2.1	Entrées	100
7.2.2	Sorties	101
7.3	L'interface graphique	104
7.3.1	Quelques écrans	104
7.4	Le cœur de calcul	107
7.4.1	Patrons de conception	108
7.5	Paramétrage	111
7.6	Cas d'utilisation	111
III	Conclusion	113
8	Conclusion et perspectives	115
8.1	Perspectives de recherches académiques	115
8.2	Perspectives d'amélioration industrielles	116
8.2.1	engins	116
8.2.2	pré-opérationnelle	116
	Annexe	119
A	Réseau grands axes	121

Résumé

La SNCF utilise plusieurs engins spécialisés pour ausculter les fissures internes du rail. La fréquence d'auscultation de chaque rail est fonction du tonnage cumulé qui passe dessus. La programmation des engins d'auscultations ultrasonores est aujourd'hui décentralisée. Dans le cadre d'une étude de réorganisation, la SNCF souhaite étudier la faisabilité de l'optimisation de certaines tournées d'inspection. Dans le cadre de cette thèse de doctorat, l'optimisation de la programmation des engins d'auscultation à ultrasons est étudiée.

Une modélisation mathématique sous forme de problème de tournées sur arcs généralisant plusieurs problèmes académiques est proposée. Une méthode de résolution exacte, appliquant la décomposition de Benders, est détaillée. À partir de cette approche, une heuristique de génération de colonnes et de contraintes est présentée et analysée numériquement sur des données réelles de 2009. Enfin, un logiciel industriel développé autour de cette approche est présenté.

SNCF is using specialised rolling stock units to inspect internal defects in rails. Rail's inspection frequency is defined by the cumulative weight of the trains which are going through. In 2009, the scheduling of these train units is decentralised. SNCF is studying the centralisation of this process. In this Ph.D. thesis, a new problem, the Railroad Track Inspection Scheduling Problem is studied.

A mathematical formulation, based on the generalization of classical arc routing models, is proposed. An exact solving approach, based on Benders' decomposition scheme, is detailed. From this approach, a column and cut generation heuristic is developed, implemented, and tested on real datasets for 2009. The industrial software developed around this heuristic is presented.

Remerciements

Christian Artigues, je te remercie pour ton prosélytisme, tu m'as enrôlé dans la section d'optimisation de l'IUP d'Avignon et depuis je n'ai pas quitté ce domaine. Ta rigueur scientifique et tes qualités relationnelles font de toi un directeur de thèse parfait.

Michel Gendreau, je te remercie pour tous ces petits conseils si précieux et le recul dont tu as su faire preuve pendant nos réunions. Tu as accepté de co-diriger cette thèse et, tout comme pour ma maîtrise, je t'en suis très reconnaissant.

Jean Damay, merci chef !

La SNCF a été pour moi un formidable environnement de travail et de développement. Je remercie très chaleureusement, David de Almeida, Nicolas Marcos, Philippe Pouligny et Christian Weber de m'avoir fait confiance et de m'avoir offert la possibilité de continuer ma formation en optimisation combinatoire sur un sujet aussi passionnant et complexe. Merci aussi à Philippe Mercier, Philippe Lemarchand et François Pincemaille pour m'avoir aussi bien décrit leur métier.

Merci à Mathilde Carlier-Clairouin, Caroline Desprez, François Ramond et Francis Sourd d'animer avec tant de générosité le département d'optimisation de la SNCF.

Enfin, je remercie Jeanne de m'avoir soutenue et d'avoir facilité la tâche des correcteurs en filtrant les erreurs de ce mémoire.

Chapitre 1

Introduction

Ce mémoire de thèse de doctorat traite de la modélisation mathématique et de la résolution d'un problème d'optimisation de tournées d'inspection du réseau ferroviaire.

Des trains spécialisés sont utilisés pour vérifier l'état des composants de l'infrastructure (rails, caténaires, nivellement, ponts) ou pour les entretenir (désherbage, taille des haies). Ils servent à inspecter le réseau ferroviaire pour vérifier sa conformité avec les standards de sécurité. Le problème d'optimisation des tournées d'inspection que nous proposons est assez générique pour pouvoir être adapté facilement à différents types d'engins. Dans le cadre de ce mémoire, seule l'application aux engins d'auscultation à ultrasons est présentée. Ces engins de mesures détectent les fissures internes du rail. Ces informations sont importantes pour l'exploitation du réseau ferroviaire car elles permettent de prévenir les ruptures de rail en déclenchant des maintenances correctives. Bien que la majorité de ces ruptures ne fassent pas dérailler les trains ¹, elles peuvent perturber très sérieusement le trafic. Les fissures des 30 000 km de lignes (50 000 km de voies) du réseau ferré français sont surveillées par les 23 régions SNCF à l'aide de ces engins.

Ce problème industriel a été initialement proposé par le département de recherche opérationnelle (DIR/GDA ²) et le département de maintenance des voies (CSC-EM2) de la SNCF. Il est stratégique car il consiste à optimiser des tournées de maintenance nationale et annuelle. Il est original car il n'existe pas, à notre connaissance, d'outil d'optimisation des tournées d'engins à la SNCF. Sa résolution est un défi de par la taille du réseau et l'horizon annuelle de planification. De plus, la modélisation de ce problème nécessite de déterminer l'essence du problème, c'est-à-dire trouver quelles caractéristiques d'une solution proposée apporte une réelle aide aux programmeurs des engins.

Le modèle choisi pour formaliser ce problème est basé sur les tournées de véhicules sur arcs. Le programme mathématique formulé pour le décrire généralise plusieurs problèmes de tournées sur arcs avec contraintes de capacité. Une heuristique originale de résolution par décomposition mathématique est proposée pour obtenir une solution optimisée du problème de tournées d'inspections. Dans le cadre de cette heuristique alliant génération de coupes et de colonnes, une méthode de projection de coupes est proposée pour accélérer la convergence de la génération de contraintes. Dans le cadre d'un algorithme d'ordonnancement, une méthode

1. En 2007, il y a eu uniquement 2 déraillements de trains SNCF.

2. Direction de l'Innovation et de la Recherche/Génie Décisionnel Appliqué

originale d'exploration de l'espace réalisables est aussi proposée. Cette méthode calcule une estimation de l'impact des décisions prises durant l'exploration de l'arbre de recherche. Cet impact est quantifié sous la forme d'un prix marginal qui est utilisé pour mettre à jour la fonction objectif.

Des expérimentations numériques sont réalisées à partir d'un jeu de données réelles décrivant les auscultations à réaliser pour l'année 2009. Plusieurs approches sont comparées numériquement afin de définir la variante la plus efficace pour les données considérées. La qualité des solutions de cette « meilleure variante » est aussi analysée.

Deux logiciels développés pendant la thèse sont présentés. Le premier est le calculateur. Il est développé avec un souci de généricité, afin de pouvoir l'utiliser pour plusieurs types de problèmes de tournées. Le second est utilisé pour la manipulation des données, l'affichage des solutions et le contrôle du calculateur. Les schémas de données utilisés par ces deux applications sont aussi présentés.

La première partie de ce mémoire s'articule autour de la présentation du problème d'optimisation des tournées d'inspections. Le chapitre 1 décrit l'environnement industriel, ainsi que la problématique à résoudre. Il présente, entre autres, les enjeux de la maintenance des voies, la description des tournées d'inspection, ainsi que le projet « grands axes » dans lequel s'inscrit l'outil d'aide à la décision. Le chapitre 2 fait une revue de la littérature sur les problèmes de tournées sur arcs et leurs applications. Il contient aussi une présentation de quelques articles sur l'optimisation des maintenances de voies. Le chapitre 3 présente des programmes mathématiques modélisant l'optimisation des tournées d'inspections. Un programme linéaire en nombres entiers ainsi que deux méthodes de décomposition sont présentés.

La seconde partie traite de la mise en œuvre de la méthode de résolution. Dans le chapitre 4, nous décrivons un algorithme de résolution optimal basé sur l'application d'une méthode de décomposition de Benders. Une heuristique basée sur cette approche optimale est également développée. Les algorithmes composants cette heuristique, ainsi que des variantes y sont décrits. Dans le chapitre 5, les différents composants de cette heuristique sont analysés numériquement. Plusieurs jeux de données sont générés à partir des données réelles pour tester la qualité des solutions obtenues. Enfin, le chapitre 6 présente les deux logiciels développés pour la SNCF. Il détaille le logiciel de manipulation des données et de pilotage du calculateur. L'architecture de ce dernier est aussi présentée dans ce chapitre.

La troisième partie conclut ce mémoire en résumant les apports proposés par cette thèse et en présentant quelques pistes de recherche.

Première partie

Présentation de la problématique

Chapitre 2

Environnement industriel et problématique

2.1 Les maintenances industrielles

Les maintenances industrielles peuvent être classées en deux catégories : les maintenances *correctives* et les maintenances *préventives*.

Maintenances correctives Ce sont les actions de maintenance qui interviennent après une défaillance. Elles peuvent être *palliatives* (réparation provisoire ou dépannage), ou *curatives* (réparation définitive).

Maintenances préventives Elles sont réalisées pour réduire les probabilités de défaillance. Elles se divisent en trois catégories principales selon l'événement déclencheur. Lorsqu'elles sont planifiées selon un échéancier, on parlera de maintenances préventives systématiques. Lorsqu'elles sont déclenchées dès qu'un indicateur franchit un certain seuil, ce sont des maintenances préventives conditionnelles. Ces maintenances nécessitent une collecte d'informations systématique et la définition de seuils d'intervention. Elles permettent de programmer des interventions à court ou moyen terme. Enfin, lorsqu'elles sont réalisées en fonction de l'analyse de l'évolution de paramètres significatifs de dégradation, ce sont des maintenances préventives prévisionnelles ou prédictives. Elles sont utilisées pour planifier à long terme des actions avant que les seuils d'intervention ne soient atteints.

Le type de maintenance sera choisi en fonction du trafic, de l'impact sur la sécurité de la voie et du type de matériel. Par exemple, les maintenances préventives systématiques sont effectuées pour l'entretien des abords de la voie et le rétablissement des profils de ballast en fonction des saisons, tandis que les maintenances préventives conditionnelles (et prévisionnelles) du rails et de la géométrie de la voie sont effectuées en fonction du tonnage cumulé supporté et des informations récupérées par divers instruments de mesures.

Les engins lourds d'auscultation à ultrasons (ELUS) font parties du plan de maintenance préventive systématique. Ils utilisent un système de détection par ultrasons des défauts internes du rail. Ce système produit des données utilisées pour déclencher des maintenances préventives et correctives. Ces informations sont aussi utilisées pour améliorer les modèles de prédictions d'évolution des fissures internes du rail.

2.2 Le système ferroviaire

2.2.1 Les acteurs

Le système ferroviaire est constitué de l'ensemble des moyens de production ferroviaire, composés de moyens humains et matériels. Par exemple, les voies, les locomotives, les voitures, mais aussi les engins de maintenances, les centres de maintenances et les quais sont des moyens de production matériels. Les moyens de productions « humains », constitués de savoir-faire spécifique, sont les horairistes, les régulateurs, les aiguilleurs, les juristes, etc. Ces moyens de production sont détenus par des acteurs différents et en concurrence, classés en trois catégories selon leur rôle. Tout d'abord, les organismes de contrôle et de régulation sont responsables de la sécurité sur le réseau : coordination des acteurs, respect de la législation, organisation des investissements, etc. Ensuite, les gestionnaires d'infrastructure (GI) sont les entités responsables de la gestion, de l'entretien et du développement du réseau. En France, Réseau Ferré de France (RFF) est l'unique GI. C'est aussi l'entité comptable qui perçoit les redevances d'accès (péages). Enfin, les Entreprises Ferroviaires (EF) exploitent commercialement le réseau. En France, la Société des Chemins de Fers Français est le principal EF, que ce soit en transport de fret ou de voyageurs. D'autres EF de pays Européens exploitent aussi le réseau ferroviaire français. Les Gérants d'Infrastructure Délégués (GID) sont d'autres acteurs importants de la production ferroviaire. En France, la branche Infrastructure de la SNCF est un GID. Elle est mandatée par RFF pour réaliser certaines maintenances.

2.2.2 La production ferroviaire

Un des rôles incombant à RFF est l'entretien du réseau ferroviaire. Pour réaliser cette tâche, RFF et la SNCF sont liés par un contrat de délégation de pouvoir. RFF, en tant que maître d'ouvrage, définit les objectifs de maintenance et délègue à la SNCF leur réalisation. Celle-ci s'engage alors sur des objectifs de volume et de qualité. En ce qui concerne les maintenances correctives ou les renouvellements, RFF traite également avec la SNCF au travers de programmes déclinés par types d'installations. Ces deux acteurs principaux du système ferroviaire français sont donc clients et fournisseurs l'un pour l'autre : la SNCF paye des redevances à RFF et RFF rétribue la SNCF pour la réalisation des maintenances.

La production d'un train est une tâche qui nécessite la coordination de plusieurs entités du systèmes. En effet, pour que le train puisse rouler, il faut que soient libres :

1. un conducteur,
2. un engin moteur (automotrice, locomotive, etc.),
3. une rame (constitué de voitures),
4. un sillon (réservation de voie),
5. et un ensemble de services (gares ouvertes, aiguilleurs, régulateurs, etc.).

La difficulté est alors de coordonner les acteurs qui détiennent ces ressources. Le conducteur, l'engin moteur et la rame sont du ressort de l'EF qui exploite le train. Par contre, le sillon est détenu par RFF et les services nécessaires peuvent être fournis par plusieurs EF.

2.2.3 Le référentiel d'enregistrement

L'UIC (Union Internationale des Chemins de fers) est une association ayant pour but la standardisation des termes ferroviaires. Elle a établi une classification des lignes en fonction de la charge de trafic qu'elles supportent (tonnage cumulé et vitesse de circulation maximale). Cette classification va de 1 à 9. Le groupe UIC 1 correspond à des lignes très chargées. Le référentiel IN2070 (2002) spécifie, pour ces groupes, les fréquences d'inspection qui varient de 6 mois pour une ligne TGV, à 20 ans pour un rail posé neuf sur une voie peu utilisée. Lorsqu'il est impossible de réaliser les enregistrements nécessaires, des dérogations doivent être signées par une autorité compétente¹. Sans ces dérogations, des limitations de vitesse ou des fermetures de voies sont imposées. Les fréquences et les dates d'auscultation passées décrivent des fenêtres de temps pendant lesquelles les auscultations futures doivent être réalisées.

Ces auscultations futures sont appelées « tâches d'auscultation ». Lorsqu'un engin circule en réalisant une tâche d'auscultation, on dit qu'il se déplace « en auscultation ». Dans le cas contraire (auscultation non obligatoire ou haut-le-pied), on dit qu'il se déplace « en acheminement ».

2.3 Enjeux de l'auscultation ultrasonore par engins lourds

Les causes principales de détérioration du rail sont l'usure mécanique, l'enrayage² et les chocs thermiques. Lorsque le risque de rupture est trop important, des limitations de vitesse, des fermetures de voies ou des maintenances correctives³ sont à prévoir. Ces dernières peuvent se révéler particulièrement coûteuses en personnels et matériels. Elles imposent des restrictions de circulation et sont la cause de désagréments commerciaux.

Les graphiques présentés par l'EPSF dans le rapport de sécurité EPSF (2008) et repris dans la figure 2.1(a) montrent une augmentation du nombre de déraillements entre 2006 et 2008, alors que le nombre de rails cassés détectés est resté stable (voir 2.1(b)). Il serait possible de conclure que l'augmentation des déraillements est due à un autre phénomène que les rails cassés. Or, dans les rapports d'audit (page 21 du rapport EPSF (2008) et le rapport de Rivier et Putallaz (2005)), il est fait mention d'un taux de déraillement qui augmente en raison de l'état de vétusté du réseau. Il faut ajouter à cela que la rénovation du réseau et l'accroissement du trafic vont augmenter la quantité de rail à ausculter annuellement. Ces constatations soulignent l'importance du suivi des défauts de rails et donc de leur auscultation.

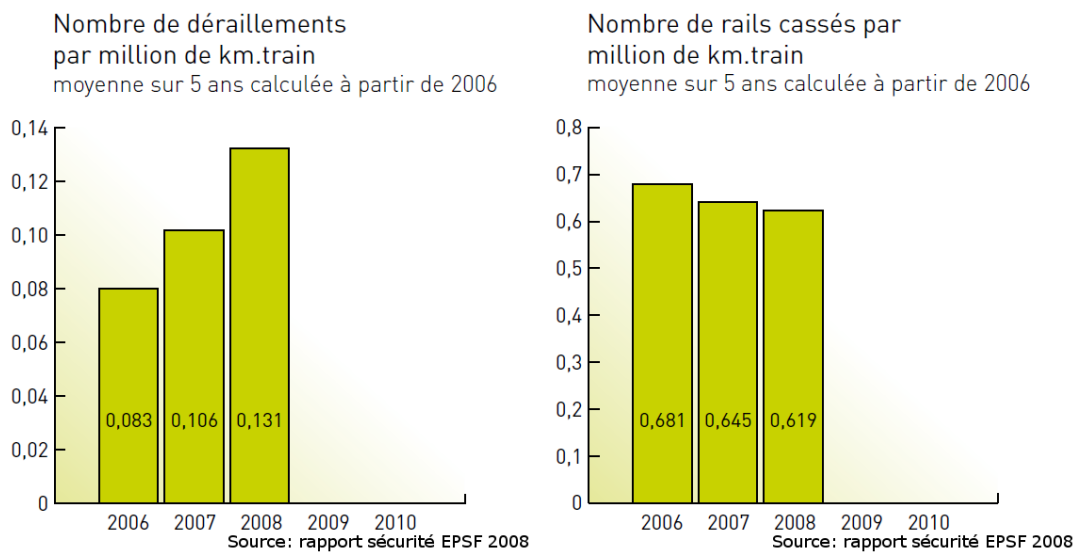
2.4 Projet grands axes

En 2010, la SNCF utilise un découpage administratif de la France en 23 régions. Chacune de ces régions est responsable de la maintenance d'une partie du réseau ferroviaire. Elles planifient la majorité des auscultations ultra-sonores. L'Établissement Logistique National (ELOGN) est l'entité responsable de l'acheminement des engins et de la coordination des régions. Il met à leur disposition, entre autres, les engins lourds d'inspection à ultrasons (ELUS) et organise les acheminements nécessaires aux transferts des engins.

1. INFRA/CSC ER IM2

2. blocage des roues

3. réparation des éclisses, des tampons, régénération de ballast, etc.



(a) Nombre de déraillement par million de km.train (b) Nombre de rails cassés par million de km.train

FIGURE 2.1 – Statistique des déraillements et rails cassés entre 2006 et 2008.

Les chantiers, massifiés dans le temps et l'espace, contraignent la libre circulation des engins. Pour illustrer cette difficulté, la figure 2.2 présente une carte des principaux chantiers prévus en 2010. Force est de constater que leur nombre est important et que certains d'entre eux sont réalisés sur plusieurs régions en même temps. La prise en compte dans le planning de ces réductions de capacité⁴ est rendue difficile par la décentralisation des prises de décision.

La majeure partie du trafic ferroviaire est réalisée sur les grandes lignes et sur le réseau à grande vitesse. Plus de la moitié de la distance totale à ausculter se trouve sur cette partie du réseau. Elle totalise 21 500 km d'auscultation par an, soit une moyenne de 513 km par région SNCF. Pour réduire les acheminements non productifs, la SNCF étudie la mise en place de la « logique grands axes » afin de tester la viabilité d'une planification nationale partielle du réseau. Ce sous-réseau qui serait planifié par l'ELOGN est appelé « réseau grands axes ». Il est représenté en rouge et vert dans la carte de la figure 2.3. Les portions de voies appartenant aux grands axes sont détaillées dans l'annexe A. Cette nouvelle organisation transférera la programmation des tournées d'inspections des défauts internes du rails des régions vers l'ELOGN.

2.5 Technique

2.5.1 La détection par ultrasons

Plusieurs technologies existent pour tester les rails de façon non destructive et détecter leurs défauts. Dans le livre de Blitz (1997) cinq techniques sont décrites et analysées : radiographiques (rayons-X, gamma, neutrons), acoustiques (ultra-sons, impédance mécanique), électriques et mécaniques (courant de Eddy, fuites magnétiques, micro-ondes), visuelles et optiques

4. interdictions de circuler

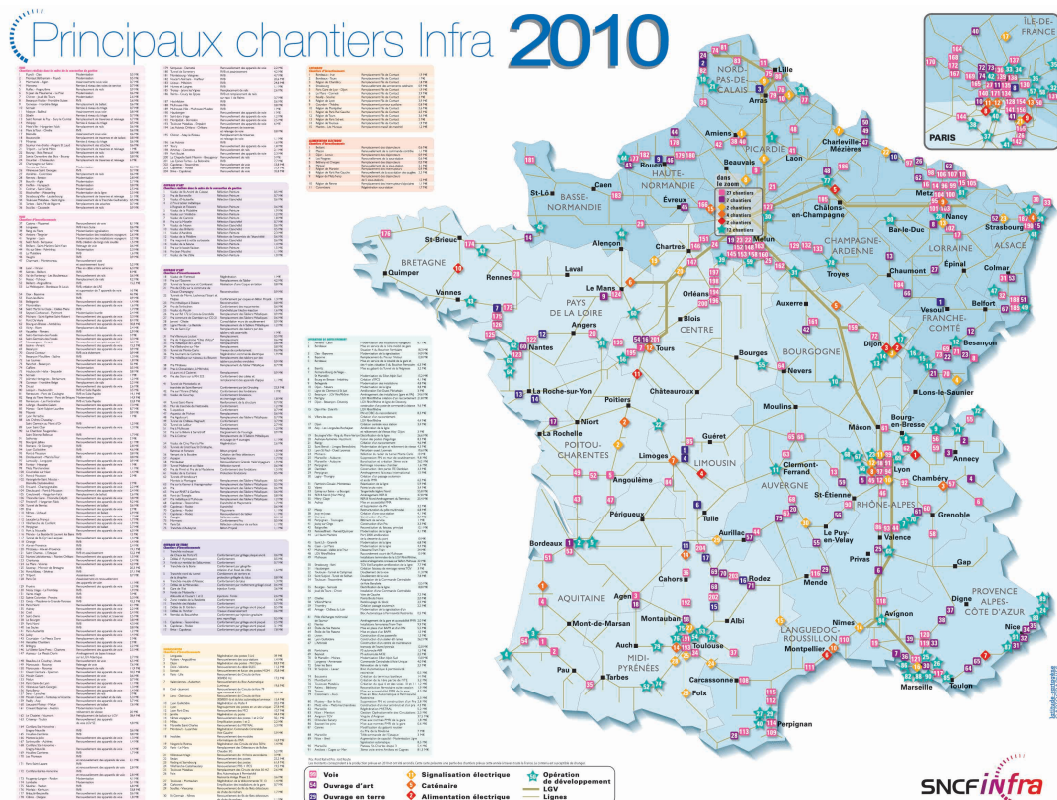


FIGURE 2.2 – Principaux chantiers de l'année 2010.

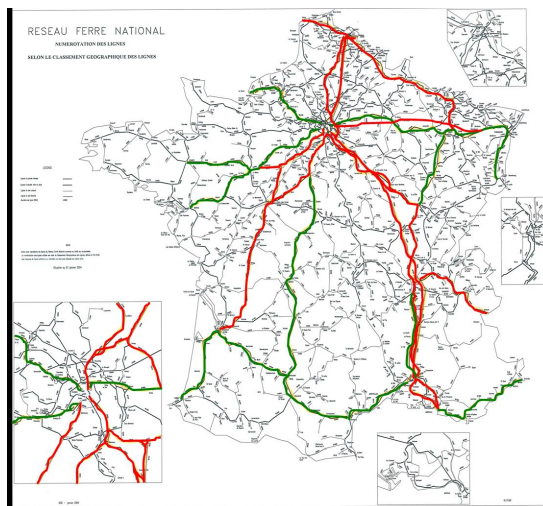


FIGURE 2.3 – Carte du réseau « grands axes » .

(interférométrie, holographie) ou thermiques (infrarouge).

Parmi toutes ces technologies, la détection par ultrasons semble la plus adaptée à l'auscultation interne du rail. En effet, le métal absorbant très peu les vibrations acoustiques, le signal ultrasonore est peu atténué. De plus, la modification du positionnement des capteurs à ultrasons permet d'obtenir des coupes de rails avec différents angles. Un autre avantage de cette technologie est sa fiabilité. La mesure continue des défauts de rails est rendu possible par la haute fréquence d'échantillonnage des échos ultrasoniques et la finesse du modèle de propagation des ondes dans les métaux. Le désavantage majeur est que la qualité du signal varie en fonction de la vitesse de déplacement du mobile. Pour réduire les interférences, une pellicule d'eau est maintenue entre le capteur et le rail. Malgré cela, au-delà de 40 km/h, le signal devient inexploitable⁵ sur la majorité du réseau. En pratique, le bruit induit par le passage sur certains appareils de voie, tels que les aiguillages et les appareils de dilatation, est trop important pour que ces éléments soient surveillés par les ELUS. Ils sont contrôlés à pied d'œuvre.

2.5.2 Les engins

En 2010, l'ELOGN gère une flotte de 3 véhicules bidirectionnels dénommés V3, V5 et V6. La V3 est une voiture de type corail et doit être tractée par une ou deux locomotives selon les nécessités de production. La V5 et la V6 sont des autorails⁶. Le réseau ferroviaire nationale n'étant pas électrifié partout, ces engins utilisent l'énergie thermique pour se déplacer. Les capteurs ultrasons sont montés sur des chariots fixés sous la voiture et les autorails.

Équipage Les engins V3 et V6 sont équipés de couchettes, l'engin V5 possède un wagon de cantonnement. Ils peuvent héberger une équipe de 4 agents : généralement deux opérateurs, un conducteur et un expert de la région visitée. Les connaissances du réseau de l'expert permettent de signaler un défaut d'auscultation suite à une erreur d'aiguillage de l'engin. Sauf dérogation, l'unicité de cet expert empêche deux engins d'ausculter simultanément la même région. Cette contrainte ne sera pas prise en compte dans le problème présenté car le rôle de l'expert dans le futur n'est pas encore défini.

Circulation Chaque engin, présenté sur les photos de la figure 2.4, possède des caractéristiques de vitesse et d'autonomie propres. Le tableau 2.1 détaille ces caractéristiques de circulation. Pour simplifier la compréhension du problème, nous distinguons deux types de mouvement : la circulation en auscultation (AUS) et l'acheminement haut-le-pied (HLP). Pour faciliter leurs mouvements, ils sont équipés de deux postes de commandes totalement identiques. Tous les ELUS (Engins Lourds Ultra-Sons) sont bidirectionnels : ils peuvent circuler dans les deux sens. Ils possèdent chacun une réserve d'eau utilisée pour maintenir couplés les capteurs et le rail. Ce couplage hydraulique réduit le bruit du signal, mais limite la durée d'auscultation journalière. Durant les circulations AUS, la vitesse réduite du mobile complique son insertion dans le trafic (sillon dense, véhicule non prioritaire, vitesse lente, etc.) De plus, l'abaissement

5. Pour les défauts superficiels, des vitesses d'auscultations records ont été atteintes en laboratoire par Papaalias et al. (2009). Ils ont présenté un protocole pour détecter à 120 km/h des défauts superficiels du rail. Dans le cas des engins lourds (ELUS), les défauts repérés se situent à une distance de plus de 5 mm de la surface supérieure du rail.

6. Voiture comportant un système de traction propre.



FIGURE 2.4 – Photo des 3 engins d’auscultation.

	V3	V5	V6	moy
Vitesse maximale en haut-le-pied (km/h)	140	80	120	
Vitesse maximale en auscultation (km/h)	50	50	50 ⁷	
Vitesse moyenne en haut-le-pied (km/h)	140	80	120	110
Vitesse moyenne en auscultation (km/h)	10,38	13,15	13,51	12
Autonomie d’auscultation (km)	150	150	200	

Ces données sont issues du catalogue 2010 des engins de l’InfraLog, InfraLog (2010).

TABLE 2.1 – Caractéristiques des engins spéciaux, 2010

du chariot de capteurs restreint la capacité de courbure de l’engin et empêche l’auscultation de certaines courbes.

Maintenance Les composants mécaniques et électriques des engins V3, V5 et V6 doivent être vérifiés régulièrement. Une maintenance d’une demi-journée est réalisée sur chaque engin environ 2 fois par mois. Cette « petite maintenance » permet de vérifier le bon fonctionnement des organes principaux. Une fois par an, pendant la période estivale, l’engin est immobilisé plusieurs semaines. Lors de cette « grande visite générale », la chaîne de mesure est recalibrée et l’état de tous les composants est vérifié. À cela s’ajoutent des maintenances correctives qui surviennent de manière aléatoire après des pannes matériel. La V6 a un plan de maintenance qui impose une immobilisation d’au moins une journée tous les 37,5 jours. Cette contrainte n’est pas prise en compte dans le modèle présenté.

2.6 Étapes de la programmation

Après avoir présenté le contexte et la technique, nous allons maintenant décrire l’organisation de la surveillance des défauts. La chaîne de suivi des anomalies internes du rail est composée de quatre blocs fonctionnels principaux : la conception des programmes d’auscultation, leur adaptation, leur réalisation opérationnelle et la confirmation des mesures réalisées. Les trois premiers blocs sont détaillés dans les sections suivantes et correspondent respectivement à des horizons de planification de l’ordre de l’année, du mois et de la semaine. La confirmation des défauts n’est pas décrite car elle n’influence pas les tournées des engins.

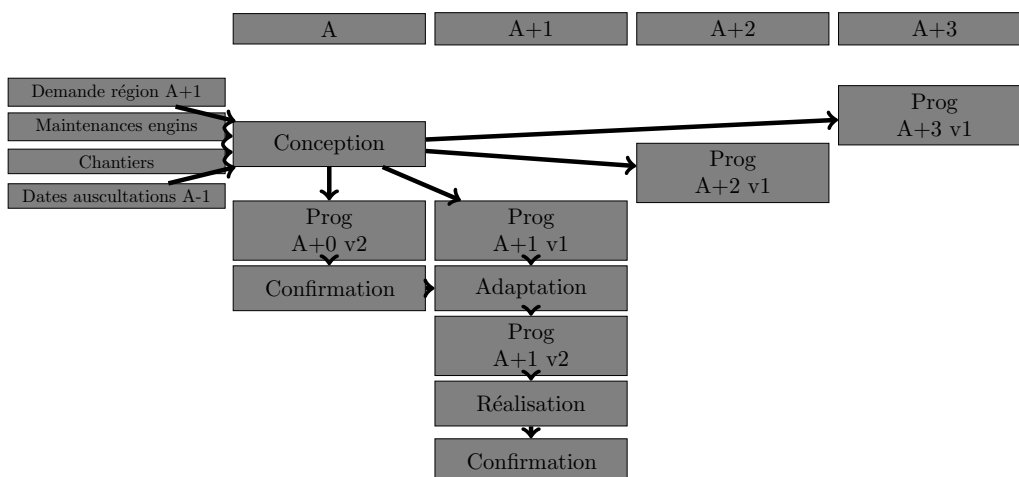


FIGURE 2.5 – Les étapes de la programmation des ELUS

2.6.1 La conception des programmes d'auscultation

Les programmes (ou plannings) de l'année 'A' sont finalisés au plus tard en novembre de l'année 'A-1'. Ensuite, durant l'année 'A', le concepteur finalise les programmes d'auscultation qui seront réalisés l'année 'A+1'. En parallèle, il ébauche les plannings des années 'A+2' et 'A+3'. Sa première tâche consiste à relever les dernières dates d'auscultation des portions de voies dont il doit programmer l'auscultation. Ainsi, à l'aide du groupe UIC de chaque tronçon, du référentiel IN2600 (2002) et de la procédure IN2070 (2002), il peut définir les dates d'auscultation futures.

Les grands axes (ou réseau « principal ») correspondent aux portions de groupe UIC 1 à 4. Le reste du réseau (réseau « secondaire ») contient les portions de voie qui ont un groupe UIC supérieur à 5. Il en résulte que tous les tronçons du « réseau grand axe » ont une fréquence d'auscultation semestrielle ou annuelle. À la fin de cette étape de conception, le planificateur connaît pour chaque tronçon les dates d'auscultation prévues et l'engin à utiliser. Il lui reste à commander les sillons⁸ pour autoriser et sécuriser la circulation du train. Le planning est alors envoyé au planificateur des ressources humaines qui affecte une équipe à chaque jour de circulation de chaque engin.

2.6.2 L'adaptation des programmes d'auscultation

Dès que le programme est conçu, il est continuellement modifié. Les aléas d'exploitation (rupture matériel, situation perturbée, personnel) sont pris en compte au fil de l'eau. Il faut alors, entre autres, commander de nouveaux sillons, réaffecter le personnel et vérifier les besoins en garages et manœuvres. Toutes ces modifications doivent se faire en s'assurant que les dates d'auscultation au plus tard sont respectées. En pratique, moins de la moitié des journées programmées est réalisée à la date prévue. Le travail d'adaptation est donc une étape primordiale pour pouvoir réaliser le programme produit en conception.

8. Un sillon horaire est une période durant laquelle une infrastructure donnée est affectée à la circulation d'un train entre deux points du réseau ferré

2.6.3 La réalisation des programmes d'auscultation

Les campagnes d'auscultation sont découpées en journée de service (JS). Chaque JS correspond à un temps de travail effectif d'environ 8h et une amplitude maximale de 11h. Ainsi, si les équipes travaillent en 2 ou 3*8, la journée calendaire est décomposée en autant de JS qu'il y a d'équipes. Une JS commence par la prise en charge du véhicule par l'équipe. Celle-ci vérifie que l'engin est en état de fonctionner, que les réservoirs d'eau sont remplis et que les capteurs sont opérationnels. Cette première étape dure environ une heure. Après ces vérifications, l'engin réalise des auscultations ou des acheminements haut-le-pied. Lorsqu'un défaut est détecté, un jet de peinture est projeté pour signaler sa position. Des équipes seront envoyées sur le terrain pour confirmer, à l'aide d'outils plus précis (bifill, échographie, etc.), l'importance du défaut. Enfin, la JS se termine dans une gare où il est possible de remplir les réservoirs d'eau. Les données collectées sont alors transférées à l'autorité compétente pour analyse. Elles seront utilisées pour le suivi historique des défauts. Elles serviront aussi à définir des lois de probabilité pour prédire l'évolution des différents types de défauts. Si la gare est équipée pour accueillir l'engin de mesure (fosse, électricité, eau courante, etc.), l'équipe dormira à son bord. Sinon, un hébergement en hôtellerie est prévu. Tout comme la prise en charge de l'engin, sa restitution dure environ une heure. Il y a donc, en moyenne, un maximum de 6 heures de circulation par JS. En fonction des opérations annexes nécessaires en fin et début de service, le maximum de circulation est de 6h31 pour la V3, 5h25 pour la V5 et 5h57 pour la V6.

2.6.4 Performance

Les tableaux de bord 2008⁹ et 2009¹⁰ (repris dans les tables 2.2 et 2.3 sous une forme synthétique) présentent des indicateurs sur les distances totales parcourues en auscultation et en haut-le-pied. Les informations ont été agrégées sous la forme d'indices de performance.

Les indicateurs annuels sont :

- la Distance totale d'Acheminement (DA), c'est la distance totale des circulations HLP,
- la Distance totale Utile (DU), c'est la distance totale des circulations AUS,
- le Temps d'Acheminement ($TA = DA / \text{Vitesse max d'acheminement} / \text{durée journée de service}$) et
- le Temps Utile ($TU = DU / \text{Vitesse max d'auscultation} / \text{durée journée de service}$).

À partir de ces informations agrégées, nous définissons l'indice de performance kilométrique $R_{[km]}$ comme le quotient de la distance d'auscultation réalisée (DU) par la quantité totale de kilomètres parcourus dans l'année ($DU + DA$). L'indice $R_{[j]}$ de performance temporelle est calculé de la même façon avec les données temporelles.

$$R_{[km]} = DU / (DU + DA) ; R_{[j]} = TU / (TU + TA).$$

Les données recueillies pour les années 2008 et 2009 montrent que l'indice de performance kilométrique $R_{[km]}$ est inférieur à 45% pour les deux années considérées. Plus de la moitié de la distance totale parcourue par les engins est donc improductive. Un des leviers d'amélioration est donc la réduction de ces trajets. C'est dans cette direction que s'inscrivent nos travaux.

Une vision globale des liens entre les tâches d'auscultation et les chantiers est obtenue par projection des données temporelles et spatiales dans un espace à trois dimensions. Cette

9. Réf. : 364-08-ELOGNAT-OTP-TB-CD

10. Réf. : 573-09-ELOGNAT-OTP-TB-CD

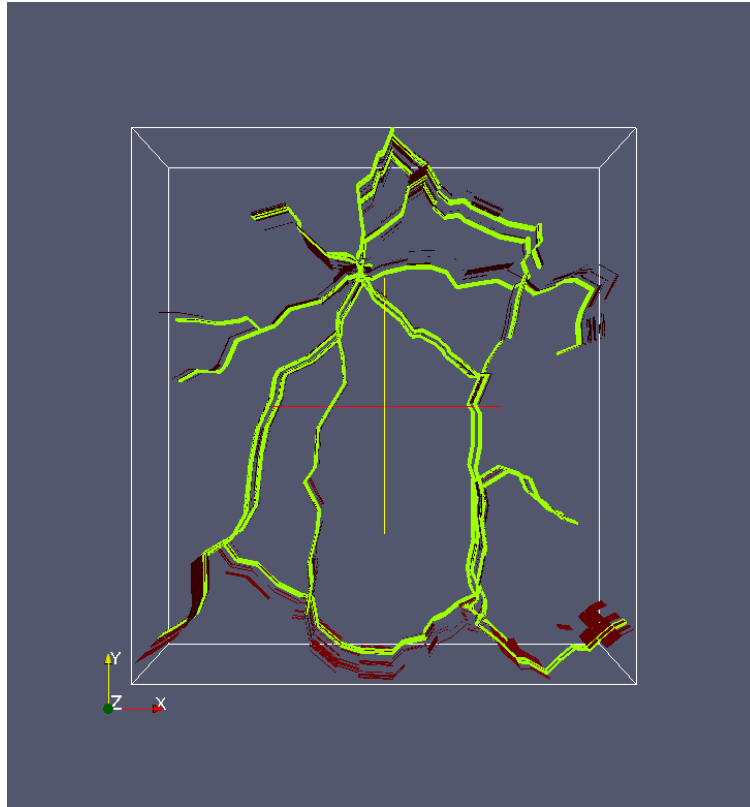
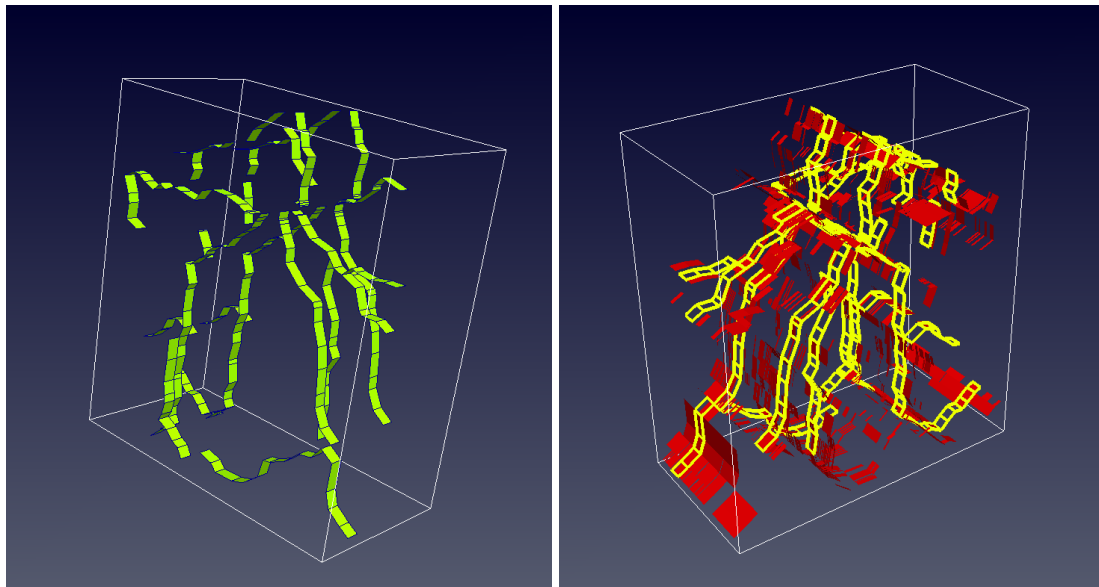


FIGURE 2.6 – Représentation spatiale des tâches

représentation est montrée dans les figures 2.6 et 2.7.

Pour comprendre d'où provient cette perte d'efficacité, nous analysons les fenêtres de temps des tâches d'auscultation et des chantiers. Pour ce faire, nous proposons, dans la figure 2.7, trois représentations graphiques de la distribution des tâches dans le temps et dans l'espace. L'axe des abscisses et des ordonnées forment le plan géographique, tandis que la profondeur de l'image est utilisée pour décrire l'aspect temporelle des tâches et des chantiers. La carte de la figure 2.6, présente la dispersion des tâches sur le réseau ferroviaire national. Elle montre que les tâches sont adjacentes dans l'espace. Il paraît donc possible de les réaliser avec très peu de circulations non productives. Dans la carte de la figure 2.7(a), il est possible d'observer l'étalement dans le temps des tâches. On constate alors que certaines portions de lignes ne peuvent pas être auscultées de façon continue¹¹. Les choses se compliquent lorsque l'on ajoute les chantiers (en rouge sur la représentation de la figure 2.7(b)). Il est alors possible de détecter visuellement un certain nombre de tâches d'auscultation non réalisables, et de voir les difficultés à passer « entre les chantiers ». Elles permettent aussi d'identifier les quelques tâches isolées qui risquent d'être difficiles à insérer dans la tournée annuelle.

11. Voir par exemple autour de Paris.



(a) Représentation spatiale et temporelle des tâches (vert)
 (b) Représentation spatiale et temporelle des tâches (jaune) et chantiers (rouge)

FIGURE 2.7 – Cartographie des dates de réalisation possibles des tâches d’auscultation, 2009.

2.7 Propositions

Dans cette section, nous proposons des leviers d’actions pour améliorer le travail des concepteurs à l’aide d’outils d’optimisation. Nous avons repris le découpage en blocs fonctionnels pour présenter des innovations en phase de conception, d’adaptation et de réalisation. Ces propositions sont autant de pistes de recherche futures pour la SNCF.

2.7.1 Conception

Optimisation tâches/jours L’histogramme de la charge de travail mensuelle en 2009, présenté dans la figure 2.8, montre le déséquilibre important entre les mois. Certains mois comme janvier ou septembre sont très chargés tandis que d’autres comme juin ou juillet le sont beaucoup moins. Cette hétérogénéité pose des problèmes d’organisation et de fiabilité. Il est difficile de prévoir les équipes nécessaires pour assurer les mois surchargés. De plus, l’apparition d’un aléa pendant un mois très chargé va provoquer une réaction en chaîne préjudiciable. Cet événement peut alors nécessiter une reprogrammation complète du mois (phase d’adaptation du programme).

Cette situation complique la tâche du concepteur. Une des possibilités dont il dispose pour lisser la charge de travail est d’avancer les dates d’auscultation prévues (sur-qualité) ou de les repousser (sous-qualité). La sur-qualité est préférée pour des raisons de sécurité. De plus, en cas de sous-auscultation, il faut obtenir une dérogation. La mise à disposition d’un outil logiciel pour équilibrer la charge en optimisant les dates prévisionnelles standardiserait cette pratique. Ce moteur de calcul prendrait en compte les affinités spatiales et temporelles des tâches pour réduire le nombre de circulations HLP. Il pourrait être perfectionné en y intégrant les informations de disponibilité des engins et des agents.

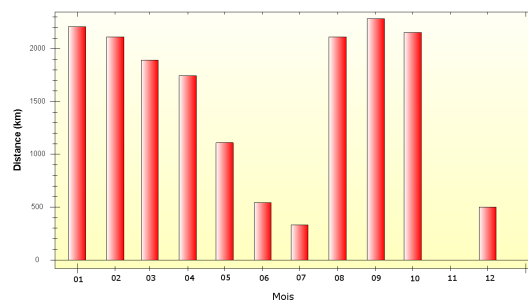


FIGURE 2.8 – Histogramme de la charge de travail mensuel, 2009.

Optimisation engins/tâches/jours Nous avons montré que la programmation est réalisée sur un horizon temporel d'une année et que le réseau à ausculter est de taille conséquente. Avec un tel volume de données, il semble inimaginable qu'un concepteur, qui produit les programmes de plusieurs engins, puisse planifier les auscultations en s'assurant que les cycles sont satisfaits tout en minimisant les circulations HLP. Une prise de décision automatisée de l'affectation d'une date et d'un engin à chaque tâche serait un avantage certain dans le processus de planification.

Optimisation équipes/engins/jours Une autre difficulté, aujourd'hui gérée par le planificateur des ressources humaines, est l'affectation des équipes aux trains. Cette tâche est réalisée par l'opérateur humain qui affecte les équipes en s'assurant que les exigences du référentiel des ressources humaines (notamment RH0077 (2005)) sont satisfaites. Par contre, l'optimisation du planning en prenant en compte la pénibilité des tâches, l'éloignement du domicile, l'empreinte carbone due aux déplacements, etc. est une tâche complexe. Un outil de planification automatique serait un atout précieux pour améliorer la gestion des équipes. Il pourrait aussi être capable de planifier les affectations d'équipes ayant plusieurs compétences.

2.7.2 Adaptation

À une échelle temporelle plus petite, le préopérateur est résolument tourné vers l'adaptation du programme aux nouvelles conditions opérationnelles. Durant cette phase critique, entre conception et réalisation, l'adaptateur intègre dans le programme courant les tâches d'auscultation qui n'ont pas pu être réalisées. Il y ajoute les nouvelles demandes de mises à disposition, les aléas matériels et les changements de personnels. Il y intègre aussi les modifications des besoins en garages et manœuvres, s'assure de la possibilité de reprendre le planning original en quelques jours, etc. Cette réorganisation est faite en utilisant l'expérience du concepteur. Malheureusement, durant les périodes denses, le temps manque pour prendre en compte tous ces aléas. Afin de parer au plus pressé, il est souvent nécessaire d'ajouter des circulations non productives qui auraient pu être évitées avec une vision plus globale.

Afin de pallier ces désagréments, plusieurs outils d'optimisation sont possibles. Pour les décrire, nous distinguons deux catégories principales complémentaires. Les optimisations pro-actives et les optimisations réactives. Les optimisations pro-actives assurent que le planning optimisé est facilement adaptable à des changements de conditions opérationnelles. Ce sont des méthodes qui s'appliquent en amont de l'apparition d'un aléa. Les optimisations réactives sont

des méthodes qui s'appliquent après son apparition, ce sont donc des algorithmes de réparation de solution.

En optimisation pro-active, nous suggérons l'utilisation d'un outil capable de générer des programmes d'auscultation robustes. Ces programmes doivent être assez facilement modifiables pour permettre d'absorber chaque mois plusieurs jours consécutifs d'indisponibilité d'un engin : si un aléa bloque un engin pendant deux jours, des modifications mineures doivent permettre de récupérer le planning original. Les casses étant plus fréquentes pendant les saisons froides et chaudes, cette nouvelle approche devra être capable d'intégrer la saisonnalité des événements.

En optimisation réactive, il serait intéressant d'étudier la faisabilité d'un outil capable de réoptimiser le programme d'auscultation. Cet outil devra fournir rapidement un nouveau programme en cas de situation perturbée. Celui-ci devra être le plus proche possible du programme initial afin de limiter les modifications d'hébergement, stationnement en gare, sillons, etc. Ces deux propositions sont complémentaires car un outil d'optimisation réactif permet de réparer des solutions optimisées pro-activement.

Ces approches n'ont pas été étudiées dans le cadre de cette thèse de doctorat.

2.7.3 Réalisation

En ce qui concerne la réalisation du programme, nous n'avons détecté aucune piste d'optimisation à l'aide d'un outil automatisé d'aide à la décision.

2.8 Motivation et enjeux

Motivation La décision de travailler sur l'optimisation de la conception des programmes des ELUS est motivée par plusieurs constats. Ces trains spéciaux sont considérés comme difficiles à programmer à cause de l'autonomie limitée, des points de garage disponibles, de leur vitesse, etc. La réussite du déploiement d'un outil d'optimisation des tournées des ELUS offrira la possibilité d'optimiser les tournées d'autres engins. Cette réussite se concrétisera par une réduction notable des trajets non productifs et une meilleure prise en compte des chantiers sur voie. La modélisation de l'étape de conception est un prérequis essentiel pour comprendre comment sont réalisées les tournées de maintenance et pour comprendre les modèles d'infrastructure ferroviaire. Ce travail préalable facilitera la création d'un modèle plus fin de la programmation des auscultations (adaptation ou réalisation). Du point de vue managérial, un outil d'optimisation facilitera la centralisation de prises de décisions auparavant distribuées et réduira les coûts d'exploitation. De plus, la génération automatique des programmes facilitera le travail du concepteur en lui fournissant une trame de circulation qu'il devra habiller avec des sillons et des équipes. D'un point de vue tactique, il sera aussi possible de dimensionner au mieux les parcs d'engins de maintenances. Dans le contexte actuel de fluctuation du trafic ferroviaire et d'usure du réseau, cette information est capitale. Elle pourra être utilisée pour tester de nouvelles politiques de maintenances (fréquences, régionalisation, achat de ressources, tarification, etc.).

Enjeux Cette démarche est une démarche scientifique, avec ses risques propres. Bien que les récents progrès en recherche opérationnelle aient prouvé la possibilité de résoudre des problèmes de plus en plus complexes, la sélection et la généralisation de ces résultats à des problématiques industrielles reste du domaine de la recherche. Il en est de même pour leur modélisation : il n'est pas toujours possible de modéliser les pratiques et attentes des opérateurs

du système. Plusieurs objectifs antagonistes peuvent coexister, les contraintes du système sont nombreuses et la souplesse avec laquelle elles doivent être satisfaites n'est pas connue a priori. Les contraintes à sélectionner doivent donner une réelle valeur ajoutée à la prise de décision automatisée. Leur nombre et leur complexité sont des caractéristiques à surveiller puisqu'elles définiront le volume de données à gérer.

Chapitre 3

Revue de littérature

La section 1 présente les définitions de quelques termes utilisés dans la théorie des graphes. La revue de littérature que nous présentons dans ce chapitre est organisée autour de trois thèmes. Le premier thème, présenté dans la section 2, concerne les problèmes de tournées sur arcs. Nous présentons quelques problèmes fondamentaux ainsi que certains résultats théoriques importants. Cette introduction aux tournées sur arcs facilitera la compréhension de la modélisation mathématique que nous proposons dans le chapitre 4 pour résoudre le problème d'inspection des voies. Le second thème, présenté dans la section 3, est relatif aux applications pratiques des problèmes de tournées sur arcs. Le troisième thème, présenté dans la section 4, expose quelques problèmes d'optimisation liés à la maintenance des voies ferrées.

3.1 Théorie des graphes

Graphe orienté Un graphe orienté $G = (V, A)$ est composé d'un ensemble de nœuds V et d'un ensemble d'arcs A dont les éléments sont des couples ordonnés de nœuds distincts.

Graphe non orienté Un graphe non orienté $G = (V, E)$ est défini de la même façon qu'un graphe orienté, à l'exception des arcs qui sont des couples non ordonnés de nœuds distincts appelés arêtes (E).

Multigraphe Un multigraphe est un graphe possédant des arcs parallèles.

Sous graphe Un graphe $G' = (V', A')$ est un sous-graphe de $G = (V, A)$ si $V' \subseteq V$ et $A' \subseteq A$.

Chaîne Une chaîne dans un graphe $G = (V, E)$ est un sous-graphe de G composé d'une séquence ordonnée de nœuds et d'arêtes. La chaîne est un concept non orienté.

Chemin Un chemin dans un graphe $G = (V, A)$ est un sous-graphe de G composé d'une séquence ordonnée de nœuds et d'arcs. Le chemin est un concept orienté.

Chemin (chaîne) élémentaire Un chemin (chaîne) élémentaire est un chemin (chaîne) sans répétition de nœuds.

Chemin (chaîne) simple Un chemin (chaîne) simple est un chemin (chaîne) sans répétition d'arcs.

Cycle Un cycle est une chaîne dont les sommets de départ et de fin sont les mêmes.

Circuit Un circuit est un chemin dont les sommets de départ et de fin sont les mêmes.

3.2 Tournées sur arcs

3.2.1 Problèmes principaux

Les premiers travaux d'analyse mathématique des problèmes de tournées sur arcs sont attribués à Euler (1736) qui résolut le *problème des ponts de Königsberg*. Ce premier problème de décision se formalise de la façon suivante :

Problème 1 *Le problème de Königsberg*

Étant donné la ville de Königsberg et ses ponts, est-il possible de faire une promenade, partant et arrivant au même endroit, tout en passant par chacun des ponts exactement une fois ?

Euler proposa une abstraction mathématique du problème, nommé *problème du cycle eulérien*. Ce fut les prémices de la théorie des graphes. Il reformula le problème de la façon suivante :

Problème 2 *Le problème du cycle eulérien*

Étant donné un graphe non orienté $G = (V, E)$, trouver un cycle contenant toutes les arêtes de E exactement une fois ou déterminer qu'un tel cycle n'existe pas.

Il prouva qu'une solution existe si et seulement si tous les nœuds de G sont de degré pair, mais ne proposa pas de procédure pour en déterminer un. Deux siècles plus tard, Mei-Ko (1962) proposa une extension de ce problème de décision sous la forme d'un problème d'optimisation qui sera nommé *problème du postier chinois* en son honneur. Ce problème consiste à trouver un cycle contenant toutes les arêtes au moins une fois et dont la longueur totale est minimale. Il peut être formulé de la façon suivante :

Problème 3 *Le problème du postier chinois - CPP*¹

Étant donné un graphe non orienté $G = (V, E, C)$, avec C une matrice de coût sur les arêtes, trouver un cycle qui passe par chaque arête au moins une fois et dont la distance totale est minimale.

Edmonds et Johnson (1973) et Christofides (1973) ont montré qu'une solution à ce problème pouvait être obtenue en temps polynomial lorsque le graphe est complètement orienté ou complètement non orienté. Papadimitriou (1976) a montré que lorsque le graphe est composé d'arcs et d'arêtes, le problème est \mathcal{NP} -difficile. Une présentation d'articles sur ce sujet a été écrite par Eiselt et al. (1995a). Cette revue contient un résumé des principales propriétés de ce problème. Orloff (1974) proposa une extension de ce problème d'optimisation dans lequel le postier doit visiter un sous ensemble des arêtes. Il fut nommé *problème du postier rural* en analogie avec les longues distances que doit parcourir un tel postier entre les hameaux servis. Il peut se formaliser de la façon suivante :

1. Chinese Postman Problem

Problème 4 *Le problème du postier rural - RPP*²

Étant donné un graphe non orienté $G = (V, E, C)$, avec C une matrice de coût sur les arêtes, trouver un cycle de coût total minimal qui passe par toutes les arêtes $R \subseteq E$ au moins une fois.

Lenstra et Kan (1976) ont prouvé que ce problème est \mathcal{NP} -difficile. Eiselt et al. (1995b) ont récapitulé quelques résultats importants sur ce sujet. Orloff (1974) proposa une généralisation des problèmes de tournées sur arcs et nœuds, qu'il nomma *problème de tournée général*. Il peut se formuler de la façon suivante :

Problème 5 *Le problème de tournée général - GRP*³

Étant donné un graphe non orienté $G = (V, E, C)$, avec C une matrice de coût sur les arêtes, trouver un cycle de coût total minimal qui passe par toutes les arêtes $R_E \subseteq E$ et tous les nœuds $R_V \subseteq V$ au moins une fois.

La dernière grande famille de problèmes de tournées sur arcs que nous présentons a été proposée par Golden et Wong (1981) sous le nom de *problème de tournées sur arcs avec contrainte de capacité*. Ce problème consiste à trouver un ensemble de tournées permettant de visiter certains arcs tout en prenant en compte le fait que l'autonomie d'un véhicule diminue à chaque arc traversé. Par réduction du problème de partitionnement, ils montrèrent qu'il est \mathcal{NP} -difficile. Il peut se formuler de la façon suivante :

Problème 6 *Le problème de tournées sur arcs avec contrainte de capacité - CARP*⁴

Étant donné un graphe non orienté $G = (V, E, C, Q)$, avec C une matrice de coût sur les arcs et Q une matrice de demande sur les arêtes, et étant donné un ensemble de véhicules identiques de capacité W , trouver des cycles qui 1) permettent de visiter toutes les arêtes ayant une demande positive une seule fois, 2) dont la somme des demandes de chaque arête servie ne dépasse pas W pour chaque véhicule et 3) dont le coût total est minimal.

Plusieurs formulations mathématiques de ce problème ont été répertoriées dans le livre coordonné par Dror (2000).

3.2.2 Variantes

Dans la version originale du CPP, le coût imputé lors de la traversée d'une arête est identique quel que soit son sens de parcours. Dans de nombreuses applications, cette hypothèse n'est pas satisfaite. Les tournées de véhicules dans des zones à fort dénivelé en sont un bon exemple. Pour modéliser cette caractéristique, Minieka (1979) proposa le *problème du postier chinois venteux* (WCPP), dans lequel le coût dépend du sens de parcours de l'arête. Brucker (1981) et Guan (1984) ont montré que ce problème est \mathcal{NP} -difficile. Win (1989) a montré que lorsque le graphe était eulérien, il était possible de résoudre le problème en temps polynomial.

Dror et al. (1987) proposèrent le *problème de postier hiérarchique* (HPP) dans lequel des classes de priorité sont utilisées pour définir des relations d'antériorité entre les arêtes. Chaque arête requise appartient à une classe de priorité. Une relation d'ordre est définie entre ces classes. Le problème consiste à déterminer un cycle qui passe par toutes les arêtes requises une fois,

-
2. Rural Postman Problem
 3. General Routing Problem
 4. Capacitated Arc Routing Problem

tout en s'assurant que la relation d'ordre est satisfaite. Ils ont montré que le problème est \mathcal{NP} -difficile dans le cas général et polynomial lorsque la relation d'antériorité est linéaire sur les classes et que chaque sous-graphe de classe est connexe.

Le *problème de postier rural avec profits* décrit par Aráoz et al. (2006) modélise une problématique moderne de livraison de courrier dans laquelle le postier collecte un gain la première fois qu'il visite un arc requis, mais paye à chaque fois qu'il traverse cet arc. Ils montrent que ce problème est \mathcal{NP} -difficile. Corberán et al. (2002b) ont proposé une formalisation du *problème du postier rural avec pénalité de virage*. Leur papier contient la description d'une procédure de reformulation vers un problème de voyageur de commerce asymétrique.

Le *CARP périodique* (PCARP) consiste à affecter un ensemble de jours de service à chaque arc requis et ensuite résoudre le CARP correspondant pour chaque journée de service. La fonction objectif est souvent la minimisation du nombre de véhicules ou la distance totale parcourue. Lacomme et al. (2005) ont décrit le PCARP de façon formelle en s'appuyant sur une application pratique de collecte de déchets. Les déchets s'accumulent au cours de la semaine, le problème présenté prend en compte une demande cumulative sur les jours. Chu et al. (2005) ont proposé une formulation mathématique en nombres entiers de ce problème, ainsi que des heuristiques de résolution.

Une extension naturelle de ce problème, sans cumul des demandes, consiste à contraindre la visite des arcs requis à être réalisée pendant certaines périodes. C'est le *problème de tournées sur arcs avec fenêtres de temps* (CARP-TW). Lorsque les fenêtres de temps sont souples, une pénalité est imputée lorsque l'arc est visité en dehors de la fenêtre de temps. Ce problème est appelé *problème de tournées sur arcs avec fenêtres de temps souples* (CARP-sTW). Tagmouti et al. (2007) ont décrit formellement ce problème et ont proposé un algorithme de résolution par génération de colonnes pour le résoudre. D'autres extensions du CARP sont étudiées dans la thèse de doctorat de Ramdane-Cherif (2002). Il y est fait mention, notamment, de problèmes pénalisant certains virages, avec des lieux de vidages différents des dépôts, ou avec des coûts variants en fonction du temps.

Dans ces problèmes, il n'y a qu'un seul dépôt d'où partent et arrivent tous les véhicules. Lorsque le problème de tournées est défini avec plusieurs dépôts, on parle de *problème de tournées sur arcs avec dépôts multiples* (MCARP). Ce problème a été traité par Amberg et al. (2000) qui l'ont reformulé comme un problème d'arbre de recouvrement avec capacité.

Une autre variante du CARP est le problème de *tournées sur arcs avec capacité et entrepôts intermédiaires*. Dans ce problème, les véhicules peuvent être déchargés ou rechargés dans certains entrepôts pendant la tournée. Ghiani et al. (2001) ont décrit ce problème et proposé des méthodes de calcul de bornes inférieures et supérieures. Un problème similaire, dans lequel les véhicules sont ravitaillés par d'autres véhicules, a été proposé par Amaya et al. (2007) sous le nom de *problème de tournées sur arcs avec contrainte de capacité et rechargement*.

Les formulations présentées dans ces papiers considèrent toujours la flotte de véhicules comme étant homogène. À notre connaissance, le problème de tournée sur arcs avec fenêtres de temps, contrainte de capacité, entrepôt intermédiaire et flotte hétérogène n'a pas encore été traité.

3.2.3 Algorithmes de résolution

Reformulation Une reformulation d'un problème de postier chinois avec des contraintes d'antériorité en problème de postier rural a été présenté par Cabral et al. (2004). Ils décrivent un algorithme d'exploration arborescente et de génération de coupes ainsi que deux heuristiques de résolution. Corberán et al. (2002b) utilisent aussi une transformation vers un problème de tournées sur nœuds pour résoudre un problème de postier rural avec pénalité de virage sur un graphe mixte. Leur approche est basée sur une reformulation du problème vers une instance de problème de voyageur de commerce asymétrique (ATSP). Une méthode de résolution pour le ATSP, comme par exemple l'algorithme de branchement et évaluation proposé par Carpaneto et al. (1995), peut alors être utilisé pour obtenir une solution optimale.

Pearn et al. (1987) ont proposé une méthode pour transformer un CARP en *problème de tournées de véhicule avec capacité* (CVRP). Pour une instance de CARP ayant r arcs requis, la méthode engendre une instance de CVRP ayant $3r + 1$ nœuds à servir. Cette méthode fut améliorée par Longo et al. (2006) qui réduisirent le nombre de nœuds de l'instance CVRP à $2r + 1$. L'instance de CVRP peut ensuite être résolu à l'aide d'heuristiques ou de méthodes exactes. Laporte et Semet (2001) ainsi que Toth et Vigo (2001) ont écrit deux introductions aux méthodes de résolution du CVRP. Dans sa thèse de doctorat, Mullaseri (1997) proposa aussi de traiter des problèmes de tournées sur arcs à l'aide d'une reformulation vers des problèmes de tournées sur nœuds. Amberg et al. (2000) ont présenté une heuristique de résolution pour le MCARP. Ils proposent d'utiliser une transformation vers une instance de problème d'arbre de recouvrement avec contrainte de capacité. Le problème de recouvrement est résolu avec un algorithme de recherche tabou.

Le problème de tournée général est une généralisation de problèmes de tournée sur arcs et sur nœuds. Ghiani et Improta (2000b) ont proposé une procédure pour reformuler le GRP en CARP.

L'inconvénient majeur des approches de reformulation en problème de tournées sur nœuds est l'accroissement de la taille des instances du problème. Par contre, elles sont intéressantes lorsque l'on dispose déjà de procédures efficaces pour des problèmes du type de la reformulation.

Heuristiques Edmonds et Johnson (1973) ont proposé une heuristique de résolution pour le CPP sur un graphe mixte. Frederickson (1979) a montré que cet algorithme produisait une solution dont la valeur est, dans le pire cas, le double de la valeur optimale. L'heuristique se base sur deux propriétés du CPP : 1) le CPP sur un graphe non orienté peut se résoudre en temps polynomial si le degré des nœuds est pair, 2) le CPP sur un graphe orienté peut se résoudre en temps polynomial si à chaque nœud il y a autant d'arcs sortants que d'arcs entrants. La première étape de leur procédure consiste à modifier le graphe pour que le degré de chaque nœud soit pair, en traitant chaque arc comme une arête. La deuxième étape consiste à ajouter des arcs pour qu'il y ait autant d'arcs entrants que d'arcs sortants à chaque nœud. La détermination d'une solution est obtenue en cherchant une circulation dans le graphe ainsi augmenté.

Pour le HPP, Dror et al. (1987) ont décrit une procédure ayant une complexité algorithmique en $O(kn^5)$ pour le cas polynomial, avec n le nombre de nœuds et k le nombre de classes. Ghiani et Improta (2000a) ont proposé un algorithme ayant une complexité algorithmique en $O(k^3n^3)$. Cette procédure est donc plus intéressante lorsque le nombre de classes est faible. Plus récem-

ment, Korteweg et Volgenant (2006) ont amélioré la procédure décrite par Dror et al. (1987) pour obtenir une complexité algorithmique en $O(kn^4)$.

Deux heuristiques constructives, basées sur la méthode de Win (1989), ont été proposées par Benavent et al. (2005) pour résoudre le problème du postier rural venteux.

En ce qui concerne le CARP, trois heuristiques simples ont prouvé leur efficacité. *The construct-strike algorithm* a été initialement proposé par Christofides (1973) puis amélioré par Pearn (1989). Cette procédure consiste à rechercher des cycles réalisables puis à retirer les arcs correspondants du graphe, tout en s'assurant que le graphe reste connexe. *The Path Scanning Algorithm* proposé par Golden et al. (1983) consiste à construire les tournées de façon gloutonnes, arcs par arcs. Plusieurs critères de sélection d'arcs sont utilisés et la meilleure tournée est sélectionnée à chaque étape. *The Augment Merge Algorithm* a aussi été proposé par Golden et al. (1983). Il est inspiré de la méthode de Clarke et Wright (1964) pour les problèmes de tournées sur nœuds. La première étape consiste à affecter chaque arc à une tournée différente. Les tournées sont ensuite fusionnées entre elles lorsque la tournée fusionnée est réalisable.

Corberán et al. (2000) ont proposé une heuristique pour résoudre le problème de postier rural sur un graphe mixte. Elle est basée sur la résolution d'un problème de flot puis un problème de couplage. Benavent et al. (2005) ont proposé des heuristiques pour résoudre WRPP. Ils l'utilisent pour résoudre un problème dont les instances ont plusieurs milliers d'arêtes.

Métaheuristiques Corberán et al. (2002a) ont présenté l'application d'un GRASP pour la résolution du CPP sur un graphe mixte.

Lorsque la taille des instances CARP dépasse la centaine d'arcs, les métaheuristiques sont des méthodes efficaces. La recherche tabou et les algorithmes mémétiques sont les deux principales métaheuristiques ayant prouvé leur efficacité sur ces problèmes. La recherche tabou fut expérimentée par Brandão et Eglese (2008) pour résoudre le CARP. Des algorithmes mémétiques ont été proposés par Lacomme et al. (2004) pour résoudre ce problème dans le cas orienté, non orienté et mixte. Beullens et al. (2003) ont proposé de résoudre le CARP par recherche locale. Ramdane Cherif (2006) a présenté l'utilisation d'un algorithme évolutionnaire pour résoudre le CARP-TW.

Recherche de bornes Belenguer et al. (2006) ont proposé de résoudre le CARP par programmation linéaire et génération de coupes. Ils décrivent une procédure de calcul de bornes inférieures ainsi que plusieurs heuristiques constructives. Dans leur article, Benavent et al. (2007) ont proposé un algorithme de génération de plan sécant pour résoudre une formulation linéaire de WRPP. Dans sa thèse de doctorat, Wohlk (2005) présente plusieurs bornes pour le CARP.

Dantzig-Wolfe Tagmouti et al. (2007) ont formulé un problème de tournées sur arcs avec contrainte de capacité et fenêtres de temps souples. Ils ont reformulé le problème sous la forme d'un problème de tournées sur nœuds avec fenêtres de temps souples. Ils ont utilisé un algorithme de résolution de type Branch-And-Price (cf. Barnhart et al. (1998)). Afsar (2010) a proposé de résoudre ce problème en utilisant une heuristique basée sur un algorithme de génération de colonnes. Dans un premier temps, la relaxation linéaire du problème est résolue à l'optimum en utilisant la méthode de décomposition de Dantzig et Wolfe (1960). Ensuite, un algorithme d'exploration arborescente est utilisé pour rechercher une solution entière au problème restreint aux colonnes générées. Johnson et Wohlk (2008) ont aussi appliqué la génération de colonnes à un problème de tournées sur arcs, mais avec fenêtres de temps rigides. Le problème maître

est un problème de couverture d'ensembles dans lequel chaque colonne représente une tournée. Les tournées sont générées a priori et ajoutées au problème maître au fur et à mesure.

Programmation par contraintes Les approches de résolution utilisant la programmation par contraintes ont très peu été étudiées. Il n'y a, à notre connaissance, que le papier de Aminu et Eglese (2006) qui présente l'application d'une telle méthode à un problème de tournées sur arcs. Ils ont proposé un programme de satisfaction de contraintes pour le *problème du postier chinois avec fenêtres de temps*.

3.3 Applications

Les applications ayant reçu le plus d'attention dans la littérature scientifique sur les tournées sur arcs sont la collecte des déchets, les maintenances routières hivernales et la livraison de courrier postal. Ces problèmes possèdent des analogies avec le problème d'inspection des voies. En effet, un planning de collecte consiste à organiser les tournées de sorte que la collecte des déchets d'une portion de rue soit réalisée sans interruption. Cette contrainte fait aussi partie du problème d'inspection. En ce qui concerne les maintenances hivernales des routes, l'analogie est plus directe puisque dans un cas il faut surveiller des portions de route et dans l'autre il faut inspecter des portions de voies.

Une des premières publications sur le sujet fut présentée par Bommisetty et Dessouky (1998) qui décrivent l'optimisation de la collecte des déchets recyclables d'un campus de l'Illinois. Ils ont proposé une approche heuristique utilisant un algorithme en deux phases appliqués à une formulation sur nœuds. Kim et al. (2006) ont aussi proposé une heuristique pour résoudre un problème de collecte de déchets sur nœuds. L'originalité de leur papier vient de la prise en compte de plusieurs sites de déchargement ainsi que de la prise en compte des pauses déjeuner.

Amponsah et Salhi (2004) ont décrit des heuristiques constructives pour résoudre un problème de collecte de déchets solides dans les pays en voie de développement. Bautista et al. (2007) ont présenté une application d'un algorithme de colonies de fourmis pour l'optimisation de la collecte des déchets urbains d'une ville espagnole. Le modèle proposé est un CARP reformulé en CVRP. Fu et al. (2009) ont décrit une application d'optimisation des tournées de maintenance hivernale des routes. Ils ont proposé un modèle d'optimisation qui prend en compte les informations météo en temps réel.

Une application réelle d'optimisation d'un service de livraison postal en Allemagne a été décrite par Irnich (2007). Le problème consiste à optimiser la chaîne de transport du courrier en prenant en compte les spécificités du réseau routier. Le problème est modélisé sous la forme d'une variante d'un problème de postier rural venteux et transformé en problème de voyageur de commerce asymétrique.

Une application originale de surveillance du réseau routier Québécois a été présentée par Marzolf et al. (2006). Le problème consiste à visiter l'ensemble du réseau toutes les deux semaines. Ils remarquent que la minimisation de la distance totale parcourue est un objectif communément utilisé dans les problèmes de tournées sur arcs, mais qui a peu d'intérêt dans leur cas. En effet, les tournées sont souvent interrompues en cours de route à cause d'incidents sur le réseau. Ils proposent l'étude de plusieurs algorithmes et fonctions objectifs permettant de prendre en compte la position en temps réel des véhicules. Toujours pour le Québec, Perrier et

al. (2008) ont présenté une application d'optimisation de la surveillance du réseau routier en utilisant une heuristique basée sur la résolution d'un programme mathématique. Une revue de littérature en quatre articles sur ces problématiques de maintenances hivernales à été proposée dans Perrier et al. (2006a,b, 2007b,a).

3.4 Maintenances des installations ferroviaires

Les articles sur l'optimisation des maintenances d'installations ferroviaires que nous avons trouvés traitent tous de la minimisation d'un coût engendré par l'interruption de trafic lors de la maintenance. Ces travaux peuvent être classés en deux catégories selon qu'ils prennent en compte la détérioration de l'élément maintenu ou non. Dans la première catégorie, les fréquences de réalisation des tâches sont des variables de décision. Dans la seconde catégorie, le modèle ne prend pas en compte la détérioration, les tâches de maintenances sont des données d'entrée du problème et les variables de décision correspondent à l'affectation des tâches.

Dans Oyama et Miwa (2006), les auteurs présentent une méthode pour optimiser l'ordonnement des tâches de maintenances sur les traverses. Dans un premier temps, un modèle statistique de l'évolution des détériorations des défauts et de l'impact de la réalisation des tâches de maintenances est calculé. Ce modèle utilise des données historiques de la compagnie. Ensuite, un programme mathématique est utilisé pour optimiser l'ordonnement et la sélection des tâches de maintenances à réaliser. L'horizon de planification dure un an et est discrétisé en 36 périodes.

Higgins (1998) a présenté un problème d'optimisation de la réalisation des tâches de maintenance qui prend en compte le personnel. L'objectif est de minimiser le nombre de trains devant être replanifiés. Plus particulièrement, ils minimisent le temps pendant lequel la portion de voie en maintenance a un niveau de service inférieur à la normale. Toutes les tâches doivent être réalisées et aucun train ne peut être supprimé. Une durée minimale entre la réalisation des tâches permet de modéliser le repositionnement des équipes de maintenance. Par contre, il est possible de les retarder. Le problème est résolu avec un algorithme de recherche tabou.

Budai et al. (2006) ont proposé un problème d'ordonnement de tâches de maintenances préventives (*Preventive Maintenance Scheduling Problem*). Leur modèle prend en compte les tâches périodiques de maintenances (tâches courtes) et les chantiers de renouvellement (tâches longues). Une description sous forme de programme mathématique et des heuristiques rapides sont proposées pour le résoudre. den Hertog et al. (2005) ont décrit une méthode pour grouper les tronçons de voies en maintenance. Cette méthode permet de créer des ensembles de portions de voie tels que si toutes les portions de voies d'un même ensemble sont en maintenance, il existe une route alternative pour les trains les traversant. Fokkert et al. (2007) ont utilisé cette méthode pour résoudre un *problème de réservation de capacité* pour des maintenances de nuit. La méthode consiste dans un premier temps à créer les ensembles de portions de voies. Ensuite, chaque ensemble est affecté à une nuit. L'horizon de planification est cyclique et dure quatre semaines. Le planning ainsi généré est utilisé toute l'année pour réaliser les tâches de maintenances. L'application de cette méthode aux Pays-Bas a permis de diviser par deux le nombre d'accidents de chantiers mortels, puisqu'aucun train ne circule sur les voies en maintenance.

Dans Cheung (1999), le problème présenté consiste à affecter un maximum de tâches de maintenances à des portions de voie. Leur modèle considère plusieurs types de tâches. Les

tâches ne peuvent être réalisées qu'à certains moments de la journée. Le modèle prend en compte des contraintes de compatibilité entre tâches, permettant d'assurer la sécurité des chantiers. Chaque type de tâche a une priorité et l'objectif est de maximiser le nombre de tâches prioritaires réalisées. L'article contient la description d'un programme de satisfaction de contraintes résolu en utilisant le logiciel CHiP. Grimes (1995) a présenté un algorithme génétique pour résoudre un problème d'affectation des tâches de maintenances à des journées calendaires.

Ces articles soulignent la spécificité du problème d'optimisation des tournées d'inspection des voies. Lorsque l'on recherche la fréquence optimale de réalisation des tâches de maintenance, la solution est une valeur seuil en-dessous de laquelle la maintenance est considérée comme non sécuritaire (sous-qualité) et au-dessus de laquelle elle est considérée comme trop coûteuse (sur-qualité). Les études scientifiques sur ce sujet consistent à rechercher une loi de probabilité réaliste décrivant le risque de défaillance en fonction de la fréquence de réalisation de la tâche. Pour le problème d'inspection des voies, nous faisons l'hypothèse que le modèle de détérioration a permis de déterminer les dates de réalisation au plus tôt et au plus tard des tâches d'inspections.

Pour ce qui est de l'optimisation du groupement des tâches ou de la possession de la voie, l'objectif est de réduire les coûts engendrés par l'impossibilité des autres trains de circuler. Ce type d'optimisation est possible lorsque les tâches de maintenance à optimiser sont de natures différentes, réalisables en parallèles ou que l'on dispose d'une information fiable sur la circulation des trains. Dans notre cas, les tâches sont de nature identique et ne sont réalisables en parallèle que s'il y a plusieurs engins : sur chaque engin, elles sont réalisées de façon séquentielle. De plus, durant l'étape de planification, les informations de circulation des autres trains ne sont pas disponibles.

Nous concluons ce chapitre en remarquant que nous n'avons pas trouvé de publications proposant une méthode pour traiter directement le problème d'optimisation des tournées d'inspections des voies. Pourtant, ce levier d'amélioration des coûts de maintenance et de fiabilité est important. Dans le cas des tournées d'auscultation à ultrasons, les programmes actuels des engins engendrent plus de trajets haut-le-pied que de circulation en auscultation. Cette constatation laisse à penser qu'il est possible de réduire les coûts liés aux trajets haut-le-pied (péage RFF, temps de travail, etc.) et de mieux utiliser les engins (réduction de la taille du parc de ressources) en limitant les trajets improductifs.

Conclusion

Le problème de tournées d'inspections des voies ferrées peut se modéliser sous la forme d'un problème de tournées sur arcs avec fenêtres de temps, contraintes de capacité et dépôts intermédiaires. Dans la littérature scientifique, les méthodes proposées pour résoudre le CARP-TW sont principalement de deux types. Les algorithmes mémétiques semblent aujourd'hui les plus performants pour fournir une solution réalisable. Ils font intensivement appel à une routine qui fournit en temps polynomial une solution réalisable (satisfaction des contraintes de capacité et insertion des retours au dépôt) à partir d'une séquence d'arcs. Dans ces approches, l'optimisation du séquençage est réalisée par le biais de croisements de solutions (algorithme génétique) tandis qu'une heuristique découpe de façon optimale la tournée géante pour fournir la valeur de la solution. L'autre approche de résolution bénéficiant d'un intérêt certain dans la

communauté scientifique est la génération de colonnes. Les problèmes maîtres proposés par les différents auteurs considèrent tous la sélection des tournées à réaliser. Le séquençement des arcs et la satisfaction des contraintes de capacité sont réalisés par l'application d'un programme dynamique.

Il faut remarquer que ces approches sont appliquées à des problèmes dont le séquençement des tournées n'est pas déterminant puisqu'il n'y a qu'un seul dépôt et dont la flotte est homogène. De plus, les instances proposées ne prennent pas en compte l'impossibilité de traverser certains arcs à des périodes données. En ce qui concerne les algorithmes mémétiques, les fenêtres de temps sont prises en compte lors de l'évaluation de la valeur de chaque individu. Dans le cas du problème d'inspection, nous supposons que les fenêtres de temps sont trop contraignantes et doivent être prises en compte pendant la génération des journées de service. Un avantage certain des méthodes par génération de colonnes pour la réalisation d'une application industrielle vient du fait qu'elles sont basées sur des programmes mathématiques. Les évolutions du modèle et la prise en compte de contraintes spécifiques comme les gares de repos sont alors facilitées. De plus, la possibilité de sauver les colonnes générées pour une résolution ultérieure permet de pallier le désavantage principal dû à la longueur des temps de calcul.

Deuxième partie

Mise en œuvre

Troisième partie

Conclusion

Chapitre 8

Conclusion et perspectives

Le modèle mathématique proposé pour résoudre le problème d'inspection par ultrasons a été validé. Sa capacité à fournir des solutions pertinentes pouvant servir de base à une programmation annuelle des tournées d'engins d'auscultation à ultrasons a été démontrée. Ce modèle est une base de travail pour d'autres travaux sur l'optimisation de tournées nationales.

La capacité du calculateur à prendre en compte les chantiers de façon pertinente n'a pas été démontrée. Les deux raisons potentielles sont le manque d'informations sur les types de chantiers et l'utilisation de vitesse moyenne des engins dans le modèle. Néanmoins, un post traitement et une signalisation des tâches d'inspection réalisées pendant des chantiers directement dans l'interface utilisateur a permis de valider l'intérêt de l'outil d'aide à la programmation. De plus, l'objectif d'un maximum de 50% de haut-le-pied dans le programme optimisé est atteint avec une tolérance de 1% pour l'ensemble des jeux de données testés.

Un schéma de décomposition exact, basé sur la méthode de décomposition de Benders, a été proposé pour résoudre un problème général de tournées sur arcs. Une heuristique, basée à la fois sur la génération de colonnes et de contraintes, capable de résoudre des problèmes de grande taille a été tirée de cette méthode.

Une méthode originale de projection de coupe, invalidant la solution continue ayant servi de point de départ à une procédure d'arrondi a été présentée. Elle a été utilisée dans le cadre d'une méthode de résolution à base de programmation linéaire et coupes heuristiques. L'intérêt des méthodes de décomposition mathématique pour la création d'heuristiques a été montré par comparaison avec un algorithme glouton évolué. Une nouvelle méthode d'exploration basée sur la détermination du prix de chaque décision prise a été proposée.

8.1 Perspectives de recherches académiques

Pseudo coupe locale La projection heuristique de la coupe combinatoire que nous avons proposée n'a pas pu être étudiée en détail. La caractéristique principale de cette coupe est qu'elle est efficace directement dans la relaxation continue et donc n'impose pas la résolution en nombres entiers du programme mathématique. En contrepartie, elle peut couper des solutions

réalisables. Il serait intéressant de comprendre quels sont les types de problèmes qui peuvent bénéficier de ce type de projection.

Relaxation des sous problèmes de Benders L'intérêt de la relaxation des sous problèmes de Benders semble avéré dans certains cas. Pour le problème d'inspection, la relaxation proposée est résolue très rapidement et fournit une coupe de Benders plus efficace que la coupe issue du sous problème original. Cette approche par relaxation permet donc de générer plus rapidement des coupes qui invalident plus de solutions irréalisables. Il serait intéressant de continuer à étudier l'impact d'une telle approche par relaxation des sous problèmes, notamment lors de la résolution de problèmes industriels de grande taille. En effet, les modèles mathématiques les représentant sont souvent le résultat de la fusion de plusieurs modèles développés au cours des années. L'extraction de sous problèmes dont la solution peut être obtenue en temps polynomial devient alors facile. La difficulté consiste alors à déterminer les sous problèmes qui prouvent le plus rapidement l'irréalisabilité d'une solution partielle.

Génération de colonnes et contraintes Cette heuristique a prouvé son efficacité pour fournir dans des temps de calcul courts des solutions de qualité satisfaisante. D'autres applications industrielles pourraient bénéficier de cette approche.

8.2 Perspectives d'amélioration industrielles

8.2.1 engins

La généralité du problème de tournées d'inspection autorise l'utilisation du calculateur pour optimiser d'autres types de tournées. Les engins à ultrasons sont un des nombreux engins qui peuvent bénéficier d'une programmation optimisée par l'outil.

Par exemple, les Mauzin¹ sont des engins d'inspection qui mesurent les déformations de la voies. Ils sont utilisés pour vérifier périodiquement la géométrie de la voie. Les tournées des engins graisseur, qui doivent régulièrement graisser les caténaires, peuvent aussi être optimisées avec cet outil.

8.2.2 pré-opérationnelle

Lors de la programmation pré-opérationnelle, les programmeurs des engins ont à leur disposition des informations plus fiables que pendant la programmation annuelle. Ils doivent aussi prendre en compte la non réalisation de certaines tâches dont ils doivent rattraper le retard au plus vite. Le besoin d'un outil pour accompagner les programmeurs pendant la phase pré-opérationnelle de planification semble être essentiel. La remontée au niveau national de la planification des engins d'inspection augmente la charge de travail des concepteurs.

L'horizon de planification est donc restreint à quelques semaines. Cette restriction temporelle peut permettre de prendre en compte des contraintes plus fines. Il serait par exemple intéressant de pouvoir calculer les circulations des engins en fonction des sillons libres. Pour faciliter le travail des programmeurs, il sera intéressant de fournir des solutions robustes aux aléas ou facilement adaptable.

1. du nom de son inventeur André Mauzin

Les domaines de recherche de l'optimisation en ligne, de l'optimisation robuste Mulvey et Vanderbei (1995), de la recherche d' (a, b) -supersolutions Hebrard (2006) ou de l'optimisation inverse Ahuja et Orlin (2001) pourraient faciliter la programmation pré-opérationnelle des engins de maintenances.

Annexe

Annexe A

Réseau grands axes

Le tableau de la figure A.1 présente les portions de voies prises en compte dans le réseau grands axes. Pour faciliter la circulation des engins et pour favoriser des auscultations continues de lignes, certaines portions de voies, bien qu'ayant une fréquence supérieure à un an sont ajoutées dans les grands axes. La sur-auscultation qui en résulte est présentée dans la colonne « sur-auscultation ». Nous remarquons que cette sur-auscultation est importante puisqu'elle représente presque la moitié de la longueur totale auscultée dans l'année. Cette importance est à relativiser puisque les fréquences de la majorité de ces portions de voies (groupe UIC 4) sont de l'ordre d'un an à quelques semaines.

Axe	Ligne	PKD	PKF	L V1+V2	GrUIC d'axe	Cycle	km auscultés /an	Sur auscultation	Sous auscultation
Secteur NE									
Paris - strasbourg - Mulhouse	70000	0,00	502,00	1004,00	3,03	1 an	1220,00	158	210
	115000	0,00	108,00	216,00					
Lille - Thionville - Metz - Nancy	267000	0,00	122,60	245,19	2,97	6 mois	1599,01	188	
	212000	0,00	27,64	55,28				110,56	
	222000	27,64	51,00	46,72				93,44	
	223000	150,51	142,49	16,04				32,08	
	204000	140,68	277,20	273,05				546,10	
	180000	188,00	154,32	67,37				134,74	
	89000	353,70	339,63	28,14				56,28	
Creil - Aulnoye	90000	377,19	343,33	67,72				135,43	
	242000	50,89	72,70	43,61	3,51	1 an	329,41	168,74	
Toul - Dijon	32000	114,01	0,00	228,02	3,00	1 an	389,60		
	1000	311,85	307,63	8,45					
Paris - Lille	843000	390,77	346,81	87,93					
	849000	314,21	346,81	65,20					
	272000	0,00	250,93	501,86	2,98	6 mois	1003,71	803,71	
Secteur Sud - Est									
Paris - Marseille	830000	0,00	862,10	1724,20	2,86	6 mois	3448,40	2580,40	
Marseille - Vintimille	930000	0,00	250,94	501,88	4,00	1 an	501,88	501,88	
Lyon - Culoz - Modane	890000	0,00	101,36	202,71	2,79	6 mois	943,83	204,00	
	900000	101,36	235,96	269,20				538,04	
Rive droite du Rhône	800000	530,48	744,58	428,20	3,80	1 an	428,20	343,04	
Secteur Sud-Ouest									
Tarascon - Sète	810000	0,00	104,53	209,06	3,00	1 an	209,60		
Bordeaux - Sète	640000	0,00	475,89	951,78	3,99	1 an	951,78	530,00	
Bordeaux - Bayonne	655000	0,00	197,56	395,11	4,00	1 an	395,11	395,11	
Orléans - Montauban	590000	118,93	663,44	1089,02	4,18	1 an	1089,02	1089,02	
Paris - Bordeaux	570000	0,00	583,84	1167,69	2,84	6 mois	2335,38	1959,38	
Secteur Nord - Ouest									
Paris - Le Havre	340000	0,00	227,92	455,84	3,39	1 an	455,84	177,84	
Paris - Le Mans - Rennes	420000	0,00	373,25	746,50	4,20	1 an	746,50	524,50	
Le Mans - Nantes	450000	210,98	305,82	189,68	4,04	1 an	364,62	189,68	
LGV									
	5000			0,00	3,29	6 mois	5700,09		
	216000	0,00	115,22	230,44					
	226000	0,00	210,00	420,00					
	269000	2,00	15,00	26,00					
	752000	0,00	711,00	1422,00					
	226310	0,00	57,00	114,00					
	752100	0,00	39,40	78,80					
	429000	130,46	179,60	98,28					
	431000	1,25	231,51	460,52					
Total				14135,49			22111,98	11459,97	210
Total (6 mois)							15030,42		
Total (1 an)							7081,56		

FIGURE A.1 – Description des grands axes.

Bibliographie

- H. M. Afsar. A Branch-and-Price Algorithm for Capacitated Arc Routing Problem with Flexible Time Windows. Electronic Notes in Discrete Mathematics, 36 :319–326, 2010.
- R. K. Ahuja et J. B. Orlin. Inverse Optimization. Operations Research, 49(5) :771–783, 2001.
- A. Amaya, A. Langevin et M. Trépanier. The capacitated arc routing problem with refill points. Operations Research Letters, 35 :45–53, 2007.
- A. Amberg, W. Domschke et S. Voß. Multiple center capacitated arc routing problems : A tabu search algorithm using capacitated trees. European Journal of Operational Research, 124 :360–376, 2000.
- U. Aminu et R. Eglese. A constraint programming approach to the Chinese postman problem with time windows. Computers & Operations Research, 33 :3423–3431, 2006.
- S. Amponsah et S. Salhi. The investigation of a class of capacitated arc routing problems : the collection of garbage in developing countries. Waste Management, 24 :711–721, 2004.
- J. Aráoz, E. Fernández et C. Zoltan. Privatized rural postman problems. Computers & Operations Research, 33 :3432–3449, 2006.
- C. Barnhart, E. L. Johnson, G. L. Nemhauser, M. W. P. Savelsbergh et P. H. Vance. Branch-and-Price : Column Generation for Solving Huge Integer Programs. Operations Research, 46(3) :316–329, 1998.
- J. Bautista, E. Fernández et J. Pereira. Solving an urban waste collection problem using ants heuristics. Computers and Operations Research, 35 :3020–3033, 2007.
- J.-M. Belenguer, E. Benavent, P. Lacomme et C. Prins. Lower and upper bounds for the mixed capacitated arc routing problem. Computers & Operations Research, 33 :3363–3383, 2006.
- E. Benavent, A. Carrota, A. Corberán, J. M. Sanchis et D. Vigo. Lower bounds and heuristics for the Windy Rural Postman Problem. European Journal of Operational Research, 176 :855–869, 2007.
- E. Benavent, A. Corberán, E. Piñana, I. Planaa et J. M. Sanchisb. New heuristic algorithms for the windy rural postman problem. Computers & Operations Research, 32 :3111–3128, 2005.
- J. Benders. Partitioning procedures for solving mixed-variables programming problems. Numerische Mathematik, 4 :238–252, 1962.

- P. Beullens, L. Muyldermans, D. Cattrysse et D. V. Oudheusden. A guided local search heuristic for the capacitated arc routing problem. European Journal of Operational Research, 147 :629–643, 2003.
- J. Blitz. Electrical and Magnetic Methods of Non-destructive Testing. Springer, 1997.
- D. Bommisetty et M. Dessouky. Scheduling Collection Of Recyclable Material At Northern Illinois University Campus Using A TwoPhase Algorithm. Computers & Industrial Engineering, 35 :435–438, 1998.
- J. Brandão et R. Eglese. A deterministic tabu search algorithm for the capacitated arc routing problem. Computers & Operations Research, 35 :1112 – 1126, 2008.
- P. Brucker. Graph Theoretic Concepts in Computer Science, Chapitre The Chinese Postman Problem for Mixed Graphs, pages 354–366. Springer, Berlin, 1981.
- G. Budai, D. Huisman et R. Dekker. Scheduling Preventive Railway Maintenance Activities. The Journal of the Operational Research Society, 57(9) :pp. 1035–1044, 2006.
- E. A. Cabral, M. Gendreau, G. Ghiani et G. Laporte. Solving the hierarchical Chinese postman problem as a rural postman problem. European Journal of Operational Research, 155 :44–50, 2004.
- G. Carpaneto, M. Dell’Amico et P. Toth. Exact solution of large-scale, asymmetric traveling salesman problems. ACM Trans. Math. Softw., 21 :394–409, 1995.
- Cheung. Railway Track Possession Assignment Using Constraint Satisfaction. Engineering Applications of AI, 12, 1999.
- N. Christofides. The optimum traversal of a graph. Omega, 1(6) :719–732, 1973.
- F. Chu, N. Labadi et C. Prins. Heuristics for the periodic capacitated arc routing problem. Journal of Intelligent Manufacturing, 16 :243–251, 2005. 10.1007/s10845-004-5892-8.
- V. Chvátal. A Greedy Heuristic for the Set-Covering Problem. Mathematics of operations research, 4(3) :233–235, 1979.
- G. Clarke et J. W. Wright. Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. Operations Research, 12(4) :568–581, 1964.
- G. Codato et M. Fischetti. Combinatorial Benders’ Cuts. Dans D. Bienstock et G. Nemhauser, eds., Integer Programming and Combinatorial Optimization, volume 3064 de Lecture Notes in Computer Science, pages 29–46. Springer Berlin / Heidelberg, 2004.
- A. Corberán, R. Martí et A. Romero. Heuristics for the Mixed Rural Postman Problem. Computers & Operations Research, 27 :183–203, 2000.
- A. Corberán, R. Martí et J. Sanchis. A GRASP heuristic for the mixed Chinese postman problem. European Journal of Operational Research, 142 :70–80, 2002a.
- A. Corberán, R. Martí, E. Martmínez et D. Soler. The Rural Postman Problem on mixed graphs with turn penalties. Computers & Operations Research, 29 :887–903, 2002b.

- G. B. Dantzig et P. Wolfe. Decomposition Principle for Linear Programs. Operations Research, 8 :101–111, 1960.
- D. den Hertog, J. van Zante-de Fokkert, S. Sjamaar et R. Beusmans. Optimal working zone division for safe track maintenance in The Netherlands. Accident Analysis & Prevention, 37(5) :890 – 893, 2005.
- M. Dror. Arc Routing : Theory, Solutions and Applications. Springer, 2000.
- M. Dror, H. Stern et P. Trudeau. Postman Tour on a Graph With Precedence Relation on Arcs. Networks, 17 :283–294, 1987.
- J. Edmonds et E. L. Johnson. Matching, Euler tours and the Chinese postman. Mathematical Programming, 5 :88–124, 1973. 10.1007/BF01580113.
- H. A. Eiselt, M. Gendreau et G. Laporte. Arc Routing Problems, Part I : The Chinese Postman Problem. Operations Research, 43(2) :231–242, 1995a.
- H. A. Eiselt, M. Gendreau et G. Laporte. Arc Routing Problems, Part II : The Rural Postman Problem. Operations Research, 43(3) :399–414, 1995b.
- EPSF. Rapport sur la sécurité du réseau ferroviaire national. Rapport technique, 2008.
- L. Euler. Solutio Problematis ad Geometrian Situs Pertinentis. Commentarii academiae scientiarum Petropolitanae, 8 :128–140, 1736.
- D. Feillet, P. Dejax, M. Gendreau et C. Gueguen. An exact algorithm for the elementary shortest path problem with resource constraints : Application to some vehicle routing problems. Networks, 44(3) :216–229, 2004.
- M. Fischetti, D. Salvagnin et A. Zanette. A note on the selection of Benders’ cuts. Mathematical Programming, 124 :175–182, 2010. 10.1007/s10107-010-0365-7.
- J. Fokkert, D. den Hertog, F. J. v. d. Berg et J. H. M. Verhoeven. The Netherlands Schedules Track Maintenance to Improve Track Workers’ Safety. Interfaces, 37(2) :133–142, 2007.
- G. N. Frederickson. Approximation Algorithms for Some Postman Problems. Journal of the ACM, 26(3) :538–554, 1979.
- L. Fu, M. Trudel et V. Kim. Optimizing winter road maintenance operations under real-time information. European Journal of Operational Research, 196(1) :332 – 341, 2009.
- M. R. Garey et D. S. Johnson. Computers and Intractability ; A Guide to the Theory of NP-Completeness. W. H. Freeman & Co., New York, NY, USA, 1990.
- G. Ghiani et G. Improta. An algorithm for the hierarchical Chinese postman problem. Operations Research Letters, 26 :27–32, 2000a.
- G. Ghiani et G. Improta. An efficient transformation of the generalized vehicle routing problem. European Journal of Operational Research, 122 :11–17, 2000b.

- G. Ghiani, G. Improta et G. Laporte. The capacitated arc routing problem with intermediate facilities. Networks, 37(3) :134–143, 2001.
- B. Golden, E. Baker et J. DeArmon. Computational experiments with algorithms for a class of routing problem. Computers and Operations Research, 10 :47–59, 1983.
- B. L. Golden et R. T. Wong. Capacitated Arc Routing Problems. Networks, 11 :305–315, 1981.
- C. Grimes. Application of genetic techniques to the planning of railway track maintenance work. pages 467–472. 1995.
- M. Guan. A Survey of the Chinese Postman Problem. J. Math. Res. and Expos., 4 :113–119 (in Chinese), 1984.
- E. Hebrard. Robust Solutions for Constraint Satisfaction and Optimisation under Uncertainty. Thèse de doctorat, University of New South Wales, 2006.
- A. Higgins. Scheduling of Railway Track Maintenance Activities and Crews. The Journal of the Operational Research Society, 49(10) :pp. 1026–1033, 1998.
- K. Holmberg. On the convergence of cross decomposition. Mathematical Programming, 47 :269–296, 1990. 10.1007/BF01580863.
- J. Hooker et G. Ottosson. Logic-based Benders decomposition. Mathematical Programming, 96(1) :33–60, 2003.
- IN2070. Surveillance des rails posés sur voies principales. Rapport technique, SNCF, 2002.
- IN2600. Engins lourds d’auscultation par ultrasons - Principes d’organisation. Rapport technique, SNCF, 2002.
- InfraLog. Catalogue des engins + fiches techniques. Rapport technique, SNCF, 2010.
- S. Irnich. Solution of real-world postman problems. European Journal of Operational Research, 2007.
- E. L. Johnson et S. Wohlk. Solving the Capacitated Arc Routing Problem with Time Windows using Column Generation. Rapport technique, Centre for Operations Research Applications in Logistics, 2008.
- M.-Y. Kao, ed.. Encyclopedia of Algorithms. Springer-Verlag GmbH, 2008.
- B.-I. Kim, S. Kim et S. Sahoo. Waste collection vehicle routing problem with time windows. Computers & Operations Research, 33 :3624–3642, 2006.
- P. Korteweg et T. Volgenant. On the Hierarchical Chinese Postman Problem with linear ordered classes. European Journal of Operational Research, 169 :41–52, 2006.
- P. Lacomme, C. Prins et W. Ramdane-Cherif. Competitive Memetic Algorithms for Arc Routing Problems. Annals of Operations Research, 131 :159–185, 2004.
- P. Lacomme, C. Prins et W. Ramdane-Chérif. Evolutionary algorithms for periodic arc routing problems. European Journal of Operational Research, 165 :535–553, 2005.

- G. Laporte et F. Semet. The Vehicle Routing Problem, Chapitre Classical Heuristics for the Capacitated VRP, pages 109–128. SIAM, 2001.
- J. K. Lenstra et A. H. G. R. Kan. On General Routing Problems. Networks, 6 :273–280, 1976.
- H. Longo, M. P. de Aragão et E. Uchoa. Solving capacitated arc routing problems using a transformation to the CVRP. Computers & Operations Research, 33 :1823–1837, 2006.
- M. Lübbecke et J. Desrosiers. Selected Topics in Column Generation. Operations Research, 53 :1007–1023, 2005.
- F. Marzolf, M. Trépanier et A. Langevin. Road network monitoring : algorithms and a case study. Computers & Operations Research, 33 :3494–3507, 2006.
- K. Mei-Ko. Graphic Programming Using Odd or Even Points. Chinese Mathematical Journal, 1 :273–277, 1962.
- E. Minieka. The Chinese Postman Problem For Mixed Networks. Management Science, 25 :643–648, 1979.
- P. Mullaseri. Capacitated Rural Postman Problem with Time Windows and Split Delivery. Thèse de doctorat, MIS Department, University of Arizona, Tucson, Arizona, 1997.
- S. M. Mulvey et R. J. Vanderbei. Robust optimization of large-scale systems. Operations Research, 43 :264–281, 1995.
- C. Orloff. A Fundamental Problem in Vehicle Routing. Networks, 4 :35–64, 1974.
- T. Oyama et M. Miwa. Mathematical modeling analyses for obtaining an optimal railway track maintenance schedule. Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics, 23 :207–224, 2006. 10.1007/BF03167551.
- C. H. Papadimitriou. On the complexity of edge traversing. Journal of the ACM, 23(3) :544–554, 1976.
- M. Papaalias, M. Lugg, C. Roberts et C. Davis. High-speed inspection of rails using ACFM techniques. NDT & E International, 42(4) :328 – 335, 2009.
- W. Pearn, A. Assad et B. Golden. Transforming arc routing into node routing problems. Computers and Operations Research, 14(4) :285–8, 1987.
- W. L. Pearn. Approximate solutions for the capacitated arc routing problem. Computers & Operations Research, 16(6) :589–600, 1989.
- N. Perrier, A. Langevin et C.-A. Amaya. Vehicle Routing for Urban Snow Plowing Operations. Transportation Science, 42 :44–56, 2008.
- N. Perrier, A. Langevin et J. F. Campbell. A survey of models and algorithms for winter road maintenance. Part I : system design for spreading and plowing. Computers & Operations Research, 33 :209–238, 2006a.

- N. Perrier, A. Langevin et J. F. Campbell. A survey of models and algorithms for winter road maintenance. Part II : system design for snow disposal. Computers & Operations Research, 33 :239–262, 2006b.
- N. Perrier, A. Langevin et J. F. Campbell. A survey of models and algorithms for winter road maintenance. Part III : Vehicle routing and depot location for spreading. Computers & Operations Research, 34 :211–257, 2007a.
- N. Perrier, A. Langevin et J. F. Campbell. A survey of models and algorithms for winter road maintenance. Part IV : Vehicle routing and fleet sizing for plowing and snow disposal. Computers & Operations Research, 33 :239–262, 2007b.
- W. Ramdane-Cherif. Problèmes d’optimisation en tournées sur arcs. Thèse de doctorat, Université de Technologie de Troyes, 2002.
- W. Ramdane Cherif. Evolutionary Algorithms for Capacitated Arc Routing problems with Time Windows. Dans 12th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing - INCOM. Saint-Etienne/France, 2006.
- RH0077. Réglementation du travail. Rapport technique, SNCF, 2005.
- R. Rivier et Y. Putallaz. Audit sur l’état du réseau ferré national français. Rapport technique, EPFL, 2005.
- S. Spoorendonk. Cut and Column Generation. Thèse de doctorat, Faculty of science, University of Copenhagen, 2008.
- A. Srinivasan. Improved approximations of packing and covering problems. Dans Proceedings of the twenty-seventh annual ACM Symposium on Theory of Computing, pages 268–276. 1995.
- M. Tagmouti, M. Gendreau et J.-Y. Potvin. Arc routing problems with time-dependent service costs. European Journal of Operational Research, 181 :30–39, 2007.
- P. Toth et D. Vigo. The Vehicle Routing Problem, Chapitre Branch-and-Bound algorithms for the Capacitated VRP, pages 29–51. SIAM, 2001.
- F. Vanderbeck. On Dantzig-Wolfe Decomposition in Integer Programming and ways to Perform Branching in a Branch-and-Price Algorithm. Operations Research, 48(1) :111–128, 2000.
- Z. Win. On the Windy Postman Problem on Eulerian Graphs. Mathematical Programming, 44 :97–112, 1989.
- S. Wohlk. Contributions to arc routing. Thèse de doctorat, Faculty of Social Sciences, University of Southern Denmark, 2005.