

# Optimisation des tournées de maintenances des voies à la SNCF

S. Lannez<sup>1,2</sup>   C. Artigues<sup>2</sup>   M. Gendreau<sup>3</sup>   N. Marcos<sup>1</sup>  
P. Pouligny<sup>1</sup>

<sup>1</sup>I&R/GDA-SNCF,

<sup>2</sup>LAAS-CNRS,

<sup>3</sup>Université de Montréal et CIRRELT

21 octobre 2008, Troyes

# Sommaire

- 1 Introduction**
  - Contexte
  - Problématique
- 2 Modélisation**
  - Modèles
  - Problèmes connexes
- 3 Apports**
  - Décomposition fonctionnelle
  - Contraintes additionnelles
- 4 Fin**

## Outline

- 1 Introduction**
  - Contexte
  - Problématique
- 2 Modélisation**
  - Modèles
  - Problèmes connexes
- 3 Apports**
  - Décomposition fonctionnelle
  - Contraintes additionnelles
- 4 Fin**

# Introduction

## Thèse

- CIFRE
- Début : Décembre 2007

## Encadrants

- Directeur : Christian Artigues
- Codirecteur : Michel Gendreau
- Encadrants SNCF : Nicolas Marcos, Philippe Pouligny

# Les maintenances

## Préventive

- Auscultation
- Meulage
- Régénération

## Corrective

- Rupture caténaire
- Rupture rail

# Les engins



# Les ultrasons

## Utilité

- Suivi et détection des défauts
- Marquage visuel

## Fonctionnement

- Déplacement
- Auscultation

## Caractéristiques

- Vitesse
- Autonomie

# Réorganisation

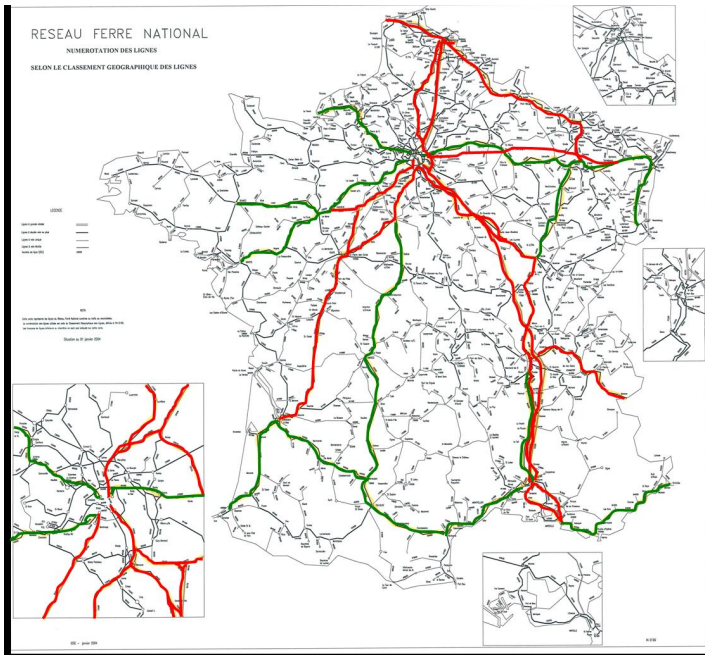
## Aujourd'hui

- Décentralisée
- Peu de contrôle

## Demain

- Centralisée
- Contrôle





## Augmentation de charge

### Traffic

- Usure = vitesse x tonnage
- Augmentation du trafic

### Travaux

- Grand plan de régénération
- SPRC  
Schéma pluriannuel de répartition des capacités



## SNCF

- Organisationnels
  - Contrôle
  - Gestion
- Économiques
  - Nombre de véhicules
  - Temps de travail
- Tactiques
  - Études
  - Location

## Scientifique

- Modélisation
  - Réseau
  - Contraintes
- Résolution
  - Taille
  - Arcs ou nœuds ?
  - Contraintes spécifiques
  - Extensions :  
véhicules, personnel

## SNCF

- Organisationnels
  - Contrôle
  - Gestion
- Économiques
  - Nombre de véhicules
  - Temps de travail
- Tactiques
  - Études
  - Location

## Scientifique

- Modélisation
  - Réseau
  - Contraintes
- Résolution
  - Taille
  - Arcs ou nœuds ?
  - Contraintes spécifiques
  - Extensions :  
véhicules, personnel

**SNCF**

- Organisationnels
  - Contrôle
  - Gestion
- Économiques
  - Nombre de véhicules
  - Temps de travail
- Tactiques
  - Études
  - Location

**Scientifique**

- Modélisation
  - Réseau
  - Contraintes
- Résolution
  - Taille
  - Arcs ou nœuds ?
  - Contraintes spécifiques
  - Extensions :  
véhicules, personnel

40.000 arcs, 30.000 nœuds, 365 jours

## Outline

- 1 **Introduction**
  - Contexte
  - Problématique
- 2 **Modélisation**
  - Modèles
  - Problèmes connexes
- 3 **Apports**
  - Décomposition fonctionnelle
  - Contraintes additionnelles
- 4 **Fin**

# Données d'entrée

- Réseau (niveau voie)
- Engins
  - Vitesse de travail
  - Vitesse en acheminement HLP
- Demandes des régions
  - Gare et date au **plus tard** de besoin d'un engin
  - Gare et date de rendu de l'engin
- Auscultation des tronçons  
(*fenêtres de temps des passages à effectuer*)
  - Date de début d'auscultation au **plus tôt** du tronçon
  - Date de fin d'auscultation au **plus tard** du tronçon
- Maintenance des engins  
(*fenêtres de temps des périodes d'indisponibilité*)
  - Gare et date de début de maintenance au **plus tard** de l'engin
  - Gare et date de fin de maintenance de l'engin
- Travaux sur les tronçons  
(*fenêtres de temps des passages interdits*)
  - Date de début d'interdiction de passage par tronçon
  - Date de fin d'interdiction de passage par tronçon



# Hypothèses

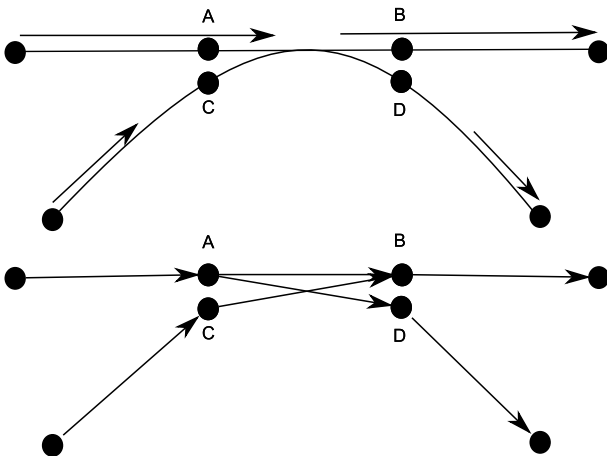
- Gare de repos
- Couplant
- Compatibilité véhicule
- Arcs/arêtes
- Capacité de la flotte
- Fenêtres fixes
  - Auscultations
  - Maintenance
  - Demandes régions

# Hypothèses

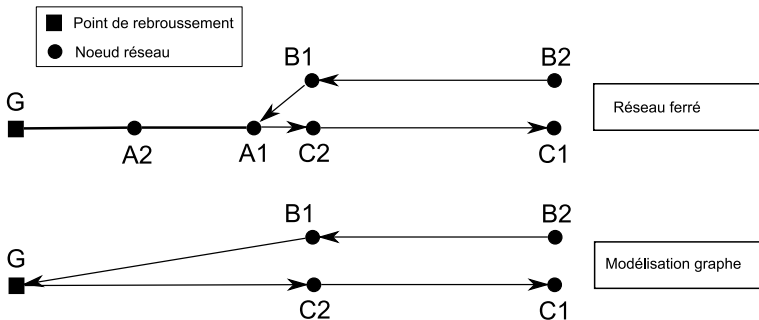
- Gare de repos (gasoil, vidange)
- Couplant
- Compatibilité véhicule
- Arcs/arêtes
- Capacité de la flotte (du rail)
- Fenêtres fixes
  - Auscultations (référentiel)
  - Maintenance (référentiel)
  - Demandes régions

- Modélisation fine
  - Communication de branches
  - Virages interdits
- Prétraitement
  - Non destructive  $1 \leftrightarrow 1$
  - Non optimale  $1 \leftrightarrow 2$

## Gas bidirectionnel



## Cas unidirectionnel



## Lien véhicule / ordonnancement

- Tâche / Arc
- Machine / Véhicule
- Initialisation / Repositionnement

Les différences résident principalement dans les caractéristiques des jeux de données.

## Lien véhicule / ordonnancement

- Tâche / Arc
- Machine / Véhicule
- Initialisation / Repositionnement

Les différences résident principalement dans les caractéristiques des jeux de données.

# Tournées

## Tournées sur arcs (ARP)

- Visite (*RPP*, *CPP*)
- Déchets, neige (*CARP*)

## Tournées sur nœuds (VRP)

- Sans capacité (*VRP*)
- Avec capacité (*CVRP*)

- + variantes avec fenêtres de temps (*TW*)
- + variantes avec plusieurs véhicules (*k*-)
- + variantes avec hiérarchie (*h*-)
- + variantes périodiques (*P*)



# Tournées

## Tournées sur arcs (ARP)

- Visite (*RPP*, *CPP*)
- Déchets, neige (*CARP*)

## Tournées sur nœuds (VRP)

- Sans capacité (*VRP*)
- Avec capacité (*CVRP*)

+ variantes avec fenêtres de temps (*TW*)

+ variantes avec plusieurs véhicules (*k*-)

+ variantes avec hiérarchie (*h*-)

+ variantes périodiques (*P*)

# Tournées

## Tournées sur arcs (ARP)

- Visite (*RPP*, *CPP*)
- Déchets, neige (*CARP*)

## Tournées sur nœuds (VRP)

- Sans capacité (*VRP*)
- Avec capacité (*CVRP*)

+ variantes avec fenêtres de temps (*TW*)

+ variantes avec plusieurs véhicules (*k*-)

+ variantes avec hiérarchie (*h*-)

+ variantes périodiques (*P*)

# Tournées

## Tournées sur arcs (ARP)

- Visite (*RPP*, *CPP*)
- Déchets, neige (*CARP*)

## Tournées sur nœuds (VRP)

- Sans capacité (*VRP*)
- Avec capacité (*CVRP*)

+ variantes avec fenêtres de temps (*TW*)

+ variantes avec plusieurs véhicules (*k*-)

+ variantes avec hiérarchie (*h*-)

+ variantes périodiques (*P*)

# Tournées

## Tournées sur arcs (ARP)

- Visite (*RPP*, *CPP*)
- Déchets, neige (*CARP*)

## Tournées sur nœuds (VRP)

- Sans capacité (*VRP*)
- Avec capacité (*CVRP*)

+ variantes avec fenêtres de temps (*TW*)

+ variantes avec plusieurs véhicules (*k*-)

+ variantes avec hiérarchie (*h*-)

+ variantes périodiques (*P*)

# Tournées

## Tournées sur arcs (ARP)

- Visite (*RPP*, *CPP*)
- Déchets, neige (*CARP*)

## Tournées sur nœuds (VRP)

- Sans capacité (*VRP*)
- Avec capacité (*CVRP*)

+ variantes avec fenêtres de temps (*TW*)

+ variantes avec plusieurs véhicules (*k*-)

+ variantes avec hiérarchie (*h*-)

+ variantes périodiques (*P*)

## Graphes orientés

- Équivalence formulation arc/nœuds

## Graphes mixtes

- Transformation non triviale

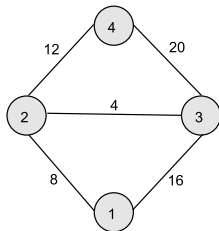
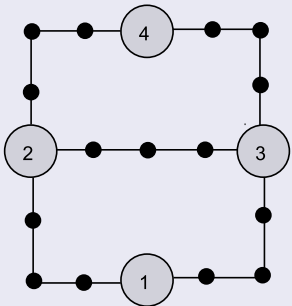
## Reformulation en tournées sur nœuds : références

### Références

- TSP
  - Laporte (1997)
- $O(3|R|)$  nœuds
  - Pearn, Assad, and Golden (1987)
- $O(2|R|)$  nœuds
  - Baldacci and Maniezzo (2004)
  - Longo, de Aragão, and Uchoa (2006)

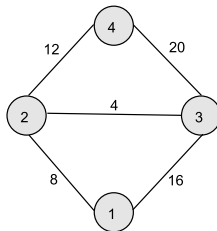
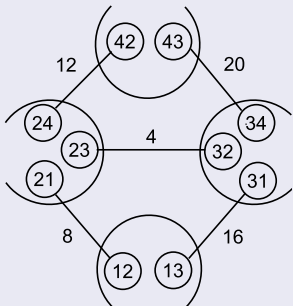
## Reformulation en tournées sur nœuds : exemples

## Pearn et al. (1987)

 $3|R| + 1$  nœuds



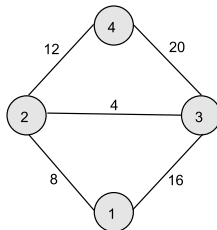
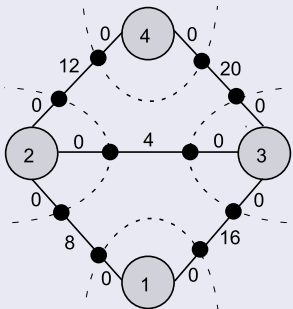
## Reformulation en tournées sur nœuds : exemples

**Baldacci and Maniezzo (2004)** $2|R|$  nœuds

# Reformulation en tournées sur nœuds : exemples

## Longo et al. (2006)

$2|R|$  nœuds



## Reformulation en tournées sur nœuds : dimensions

### Littérature

- Déneigement
  - Perrier, Langevin, and Amaya (2008)  
1.500 arcs
- Tournées de véhicules
  - Cordeau, Gendreau, Hertz, Laporte, and Sormany (2004) < 1.000 clients
- Postier
  - Sans temps  
4.000 arêtes

### SNCF

- 40.000 arcs ou arêtes
- 30.000 nœuds
- 200 jours ouverts

## Outline

- 1 **Introduction**
  - Contexte
  - Problématique
- 2 **Modélisation**
  - Modèles
  - Problèmes connexes
- 3 **Apports**
  - Décomposition fonctionnelle
  - Contraintes additionnelles
- 4 **Fin**

*SPP*

**Tronçons de tournées**

*COVER*

**Sélecteur de groupes de tâches**

*SCHED*

**Ordonnanceur**

## *SPP*

## Tronçons de tournées

Minimisation des coûts réduits.

- Plus courts chemins
- Gare de repos
- Une journée

## *COVER*

## Sélecteur de groupes de tâches

## *SCHED*

## Ordonnanceur

*SPP*

**Tronçons de tournées**

*COVER*

**Sélecteur de groupes de tâches**

Minimisation de la date de fin au plus tard.

- Auscultation
- Temps machine
- Coupes (ordonnancement)

*SCHED*

**Ordonnanceur**

*SPP*

**Tronçons de tournées**

*COVER*

**Sélecteur de groupes de tâches**

*SCHED*

**Ordonnanceur**

Minimisation de la durée des repositionnements.

- Non préemptif
- Parallèle
- Temps d'initialisation



## *SPP*

## Tronçons de tournées

- RO: Sous problème de Dantzig-Wolfe
- SNCF: Génération de routes types

## *COVER*

## Sélecteur de groupes de tâches

- RO: Problème maître
- SNCF: Réalisation des tâches

## *SCHED*

## Ordonnanceur

- RO: Sous problème de Benders
- SNCF: Coordination centralisée

*SPP*

**Tronçons de tournées**

*COVER*

**Sélecteur de groupes de tâches**

*SCHED*

**Ordonnanceur**

- + Évolution facile
- + Simplicité d'explication

- Convergence
- Mise en œuvre

Décomposition fonctionnelle : *SPP*

$$\min \sum_{a \in A^k} \bar{c}_{ak} x_{ak} \quad (1)$$

$$\text{sujet à} \quad \sum_{a \in \delta^+(A^k, i)} x_{ak} - \sum_{a \in \delta^-(A^k, i)} x_{ak} = b_i, \forall i \in I, \quad (2)$$

$$\sum_{a \in A^k} t_{ak} x_{ak} \leq 1, \quad (3)$$

$$x_{ak} \in 0, 1, \forall a \in A, k \in K \quad (4)$$

Décomposition fonctionnelle : *COVER*

$$X_{ias} = x_{ak}, \quad \forall a \in A.$$

$$C_s = \sum_{a \in A^k} \bar{c}_{ak} x_{ak},$$

$$\min \quad \sum_{s \in S} C_s z_s \quad (5)$$

$$\text{sujet à} \quad \sum_{s \in S} X_{is} z_s \geq 1, \forall i \in I \quad (6)$$

$$z_s \in \{0, 1\}, \forall s \in S \quad (7)$$

Décomposition fonctionnelle : *SCHED*

$$\min \sum_{i \in I} t_i \quad (8)$$

$$\text{sujet à } [s_i, e_i] \subseteq B_{ik_i} \quad (9)$$

$$e_i - s_i = D_{ik_i} \quad (10)$$

$$t_i \geq T_{in_i k_i} \quad (11)$$

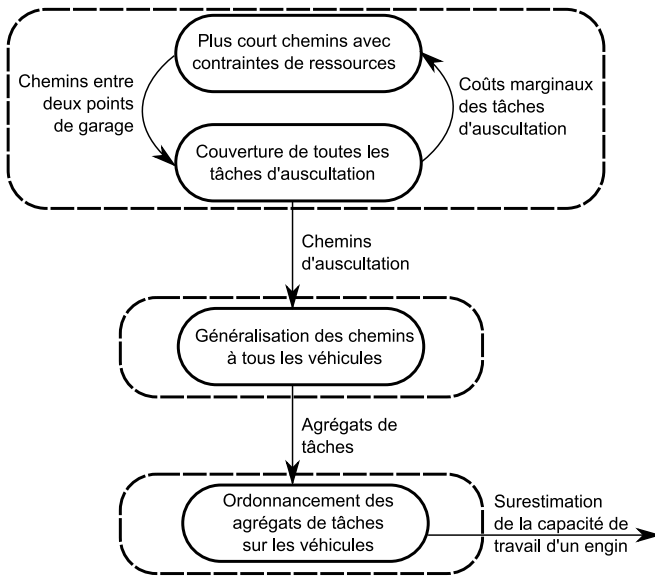
$$k_i = k_{n_i} \quad (12)$$

$$k_i \in K \quad (13)$$

$$s_i, e_i, t_i \in T \quad (14)$$

$$n_i \in I \quad (15)$$

# Décomposition fonctionnelle : Schéma



## Risques

- Pas assez de colonnes

## Améliorations

- Communication *SPP* ↔ *SCHED*

## Extensions

- Nouveaux véhicules
- Sillons
- Régions
- Robustesse



## Outline

- 1 **Introduction**
  - Contexte
  - Problématique
- 2 **Modélisation**
  - Modèles
  - Problèmes connexes
- 3 **Apports**
  - Décomposition fonctionnelle
  - Contraintes additionnelles
- 4 **Fin**

# Questions

- R. Baldacci and V. Maniezzo. Exact methods based on node routing formulations for arc routing problems. Technical report, Department of Computer Science, University of Bologna, Mura Anteo Zamboni 7, 40127 Bologna (Italy), May 2004.
- J.-F. Cordeau, M. Gendreau, A. Hertz, G. Laporte, and J.-S. Sormany. New heuristics for the vehicle routing problem. *Les Cahiers du GERAD*, 33:1–17, 2004.
- G. Laporte. Modeling and solving several classes of arc routing problems as traveling salesman problems. *Computers & Operations Research*, 24:1057–1061, 1997.
- H. Longo, M. P. de Aragão, and E. Uchoa. Solving capacitated arc routing problems using a transformation to the CVRP. *Computers & Operations Research*, 33:1823–1837, 2006. doi: 10.1016/j.cor.2004.11.020.
- W. Pearn, A. Assad, and B. Golden. Transforming arc routing

into node routing problems. *Computers and Operations Research*, 14(4):285–8, 1987.

N. Perrier, A. Langevin, and C.-A. Amaya. Vehicle routing for urban snow plowing operations. *Transportation Science*, 42: 44–56, 2008. doi: doi:10.1287/trsc.1070.0195.