

# Optimisation des tournées d'inspection des voies ferrées

S. Lannez<sup>1,3</sup>

C. Artigues<sup>3</sup>

J. Damay<sup>1</sup>

M. Gendreau<sup>4</sup>

N. Marcos<sup>1</sup>

P. Pouligny<sup>2</sup>

SNCF I&R/A<sup>2</sup>D, 45 rue de Londres, 75008 Paris, France  
{sebastien.lannez,jean.damay,nicolas.marcos}@sncf.fr

SNCF IMT/IM-2, 45 rue de Londres, 75008 Paris, France  
philippe.pouligny@sncf.fr

LAAS-CNRS, 7 avenue du Colonel Roche 31077, Toulouse Cedex 4, France  
artigues@laas.fr

Université de Montréal, Montréal (Québec), H3C 3J7 Canada  
michel.gendreau@cirrelt.ca

Roadef 2009, Nancy



## Sommaire

- 1 Introduction**
  - Contexte
  - Problématique
- 2 Modélisation**
  - Informations utilisées
  - Problèmes connexes
- 3 Résolution**
  - Décomposition fonctionnelle
  - Modèle
- 4 Conclusion**

# Outline

1

## Introduction

- Contexte
- Problématique

2

## Modélisation

- Informations utilisées
- Problèmes connexes

3

## Résolution

- Décomposition fonctionnelle
- Modèle

4

## Conclusion

# Introduction

## Thèse

- CIFRE
- Début : Décembre 2007

## Encadrants

- Directeur : Christian Artigues
- Codirecteur : Michel Gendreau
- Encadrants SNCF : Jean Damay, Philippe Pouligny

# Les maintenances

## Préventive

- Auscultation
- Meulage
- Régénération

## Corrective

- Rupture caténaire
- Rupture rail



# Les ultrasons (défauts internes du rail)

## Utilité

- Suivi et détection
- Marquage visuel

## Circulation

- Repositionnement
- Auscultation

## Caractéristiques

- Vitesse
- Autonomie



Problématique

# Augmentation de charge

## Principaux chantiers '08

*L'infra en première ligne pour faire avancer le train*

### Traffic

- Usure = vitesse x tonnage
- Accroissement

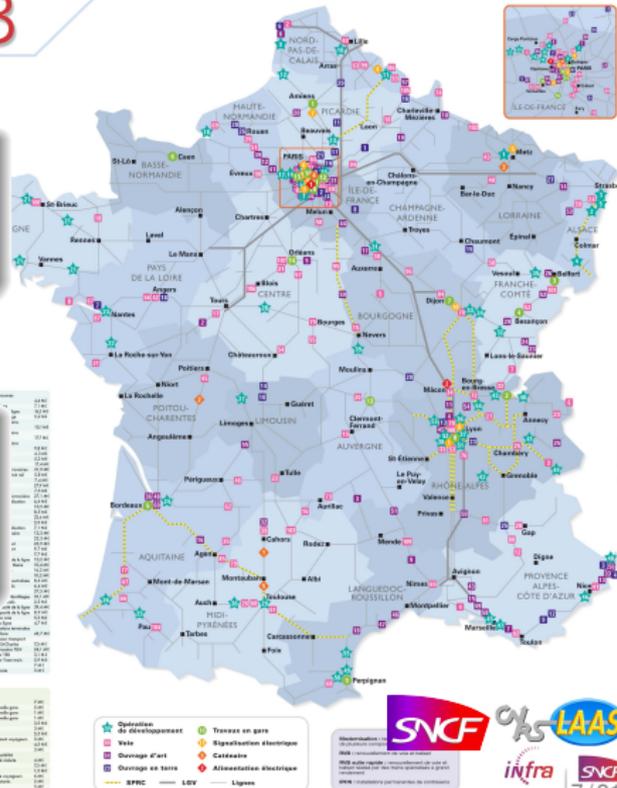
MOTRIS 2007/2008		MOTRIS 2008/2009	
1. Paris - Lille	12,5	13,5	14,5
2. Paris - Lyon	11,5	12,5	13,5
3. Paris - Marseille	10,5	11,5	12,5
4. Paris - Bordeaux	9,5	10,5	11,5
5. Paris - Nantes	8,5	9,5	10,5
6. Paris - Strasbourg	7,5	8,5	9,5
7. Paris - Clermont	6,5	7,5	8,5
8. Paris - Montpellier	5,5	6,5	7,5
9. Paris - Toulouse	4,5	5,5	6,5
10. Paris - Perpignan	3,5	4,5	5,5

### Travaux

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

Travaux	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1. Paris - Lille	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5	17,5	18,5	19,5	20,5	21,5	22,5	23,5	24,5
2. Paris - Lyon	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5	17,5	18,5	19,5	20,5	21,5	22,5	23,5
3. Paris - Marseille	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5	17,5	18,5	19,5	20,5	21,5	22,5
4. Paris - Bordeaux	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5	17,5	18,5	19,5	20,5	21,5
5. Paris - Nantes	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5	17,5	18,5	19,5	20,5
6. Paris - Strasbourg	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5	17,5	18,5	19,5
7. Paris - Clermont	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5	17,5	18,5
8. Paris - Montpellier	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5	17,5
9. Paris - Toulouse	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5
10. Paris - Perpignan	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5

MOTRIS 2007/2008		MOTRIS 2008/2009	
1. Paris - Lille	12,5	13,5	14,5
2. Paris - Lyon	11,5	12,5	13,5
3. Paris - Marseille	10,5	11,5	12,5
4. Paris - Bordeaux	9,5	10,5	11,5
5. Paris - Nantes	8,5	9,5	10,5
6. Paris - Strasbourg	7,5	8,5	9,5
7. Paris - Clermont	6,5	7,5	8,5
8. Paris - Montpellier	5,5	6,5	7,5
9. Paris - Toulouse	4,5	5,5	6,5
10. Paris - Perpignan	3,5	4,5	5,5



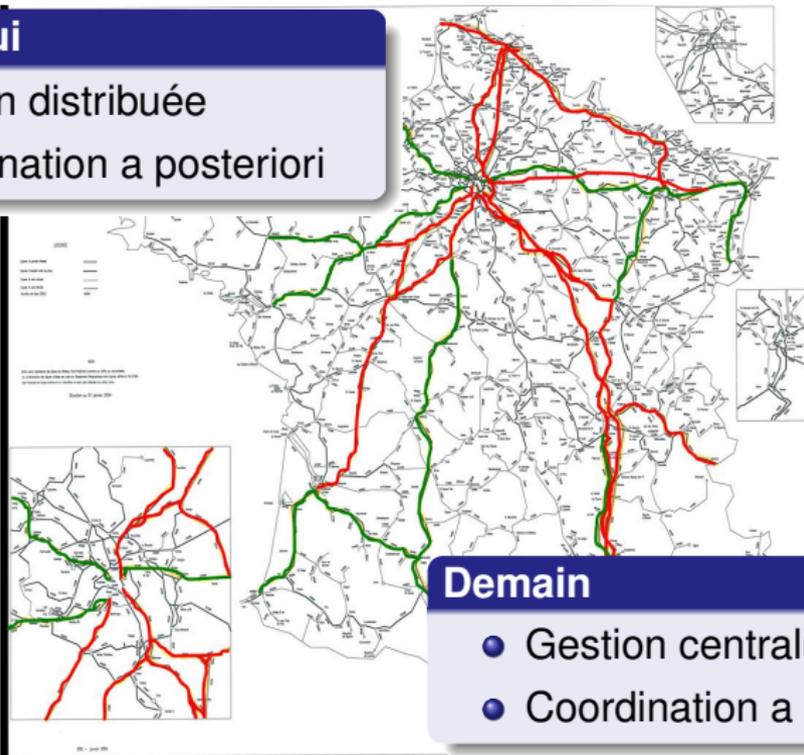
Le schéma est communiqué à l'attention des pouvoirs publics en 2008 et est actualisé. Les données présentées sont des données préliminaires et sont susceptibles d'être modifiées au cours de l'élaboration du schéma.



# Réorganisation

## Aujourd'hui

- Gestion distribuée
- Coordination a posteriori



## Demain

- Gestion centralisée
- Coordination a priori

**SNCF**

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

**Scientifique**

- Modélisation
  - Réseau
  - Contraintes
- Résolution
  - Taille
  - Contraintes spécifiques
- Extensions
  - Type de véhicule
  - Préopérationnel

## SNCF

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

## Scientifique

- Modélisation
  - Réseau
  - Contraintes
- Résolution
  - Taille
  - Contraintes spécifiques
- Extensions
  - Type de véhicule
  - Préopérationnel

## SNCF

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

## Scientifique

- Modélisation
  - Réseau
  - Contraintes
- Résolution
  - Taille
  - Contraintes spécifiques
- Extensions
  - Type de véhicule
  - Préopérationnel

Grands Axes → 40.000 arcs, 30.000 nœuds, 365 jours

## Outline

- 1 **Introduction**
  - Contexte
  - Problématique
- 2 **Modélisation**
  - Informations utilisées
  - Problèmes connexes
- 3 **Résolution**
  - Décomposition fonctionnelle
  - Modèle
- 4 **Conclusion**

## Données d'entrée

- Réseau (niveau voie)
- Véhicules
  - Vitesse de travail
  - Vitesse de transfert
- Demandes des régions
  - Gare et date de prise en charge d'un engin
  - Gare et date de restitution de l'engin
- Auscultation des tronçons
  - Date de début d'auscultation au **plus tôt** du tronçon
  - Date de fin d'auscultation au **plus tard** du tronçon
- Maintenance des engins
  - Gare
  - Date de début
  - Date de fin
- Travaux sur les tronçons
  - Date de début
  - Date de fin

# Hypothèses

## Satisfaites

- Gare de repos
- Autonomie de couplant
- Compatibilité véhicule
- Arcs/arêtes
- Capacité de la flotte
- Expert rail régional
- Fenêtres de temps
  - Auscultations
  - Maintenances
  - Demandes régions

## Ignorées

- Autonomie en gasoil
- Capacité des cuves
- Capacité du rail (sillon)

## Simplifiées

- Périodicité
- Maintenance
- Horaires du personnel

# Hypothèses

## Satisfaites

- Gare de repos
- Autonomie de couplant
- Compatibilité véhicule
- Arcs/arêtes
- Capacité de la flotte
- Expert rail régional
- Fenêtres de temps
  - Auscultations
  - Maintenances
  - Demandes régions

## Ignorées

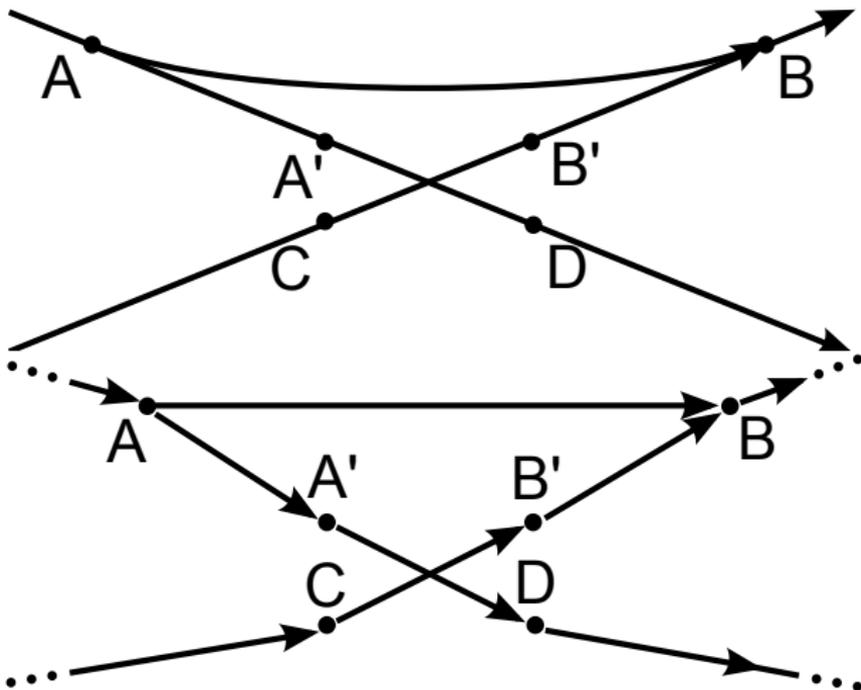
- Autonomie en gasoil
- Capacité des cuves
- Capacité du rail (sillon)

## Simplifiées

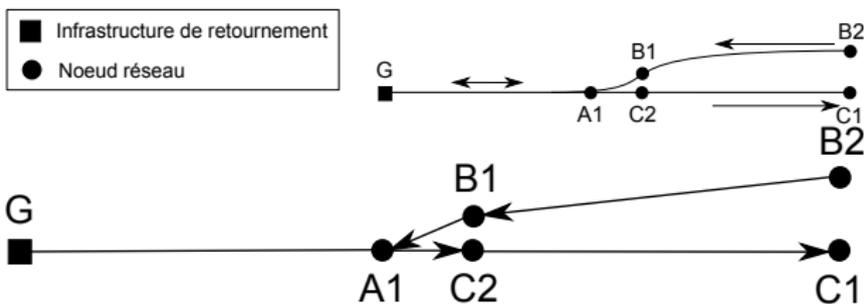
- Périodicité
- Maintenance
- Horaires du personnel

- Modélisation fine
  - Communication de branches
  - Virages interdits
- Véhicule bidirectionnel  
Possibilité de changer de sens de circulation sans retournement du véhicule.

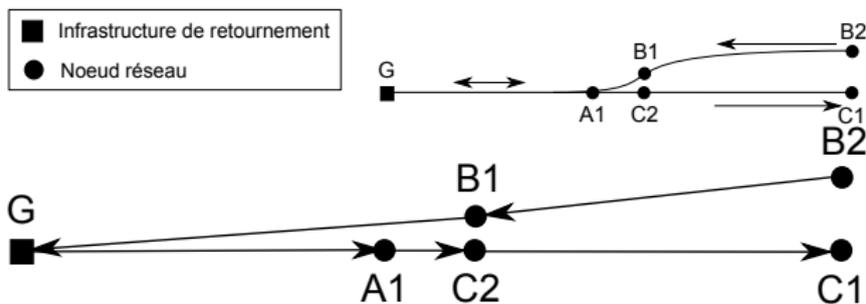
## Changement de voie



## Rebroussement (bidirectionnel)



## Rebroussement (unidirectionnel)



## Lien véhicule / ordonnancement

- Tâche / Arc
- Machine / Véhicule
- Préparation / Repositionnement

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

- Taille des fenêtres de temps
- Durée des repositionnements

## Lien véhicule / ordonnancement

- Tâche / Arc
- Machine / Véhicule
- Préparation / Repositionnement

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

- Taille des fenêtres de temps
- Durée des repositionnements

# 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*)

Reformulation : arcs  $\rightarrow$  nœuds**Graphes orientés**

- Équivalence formulation arcs/nœuds

**Graphes mixtes**

- Transformation non triviale

**Avantages**

- Littérature
- Réutilisation

**Inconvénients**

- Remodélisation
- Taille

Reformulation : arcs  $\rightarrow$  nœuds

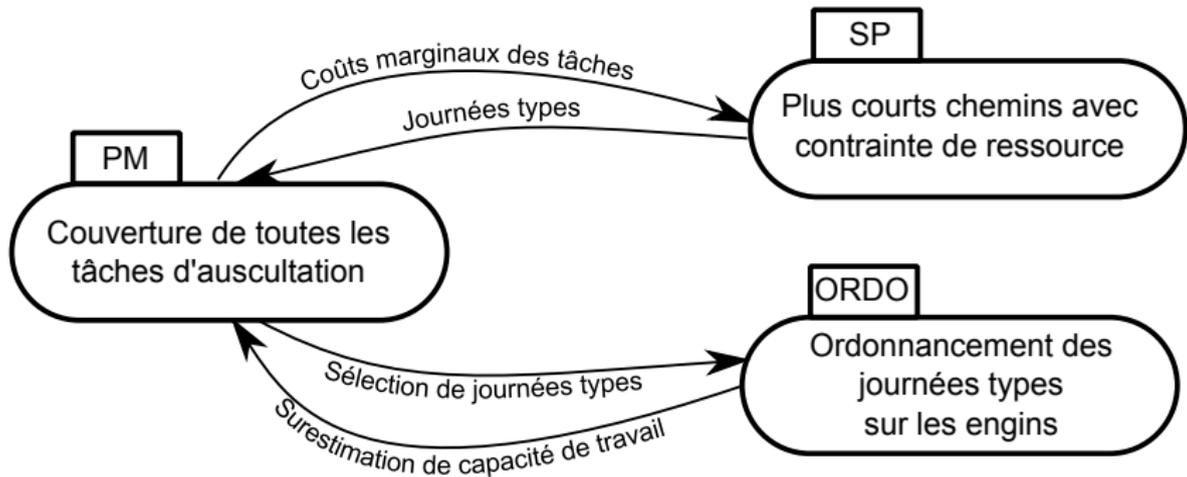
## Références

- 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)

## Outline

- 1 **Introduction**
  - Contexte
  - Problématique
- 2 **Modélisation**
  - Informations utilisées
  - Problèmes connexes
- 3 **Résolution**
  - Décomposition fonctionnelle
  - Modèle
- 4 **Conclusion**

# Schéma



## Détails

*SP*

Journées types

*PM*

Couverture des tâches

*ORDO*

Ordonnanceur

# Détails

**SP****Journées types**

Minimisation de la somme des coûts réduits.

- Plus longs chemins
- Gare de repos
- Une journée

**PM****Couverture des tâches****ORDO****Ordonnanceur**

## Détails

*SP***Journées types***PM***Couverture des tâches**

Minimisation de la somme des durées des journées types.

- Auscultation
- Temps machine
- Coupes (ordonnancement)

*ORDO***Ordonnanceur**

## Détails

*SP***Journées types***PM***Couverture des tâches***ORDO***Ordonnanceur**

Minimisation de la somme des durées de repositionnements.

- Non préemptif
- Parallèle
- Temps d'initialisation

## Détails

*SP***Journées types**

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

*PM***Couverture des tâches**

- RO : Problème maître
- SNCF : Réalisation des tâches

*ORDO***Ordonnanceur**

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

# Détails

*SP***Journées types***PM***Couverture des tâches***ORDO***Ordonnanceur**

- + Évolution facile
- + Simplicité d'explication

- Convergence
- Mise en œuvre

$K$  : véhicules $A^k$  : arcs $V$  : noeuds $t_{ak}$  : durée d'une tâche $\pi_{ak}$  : coût réduit $x_{ak}$  : variable de flot

$$\min \sum_{a \in A^k} (t_{ak} - \pi_{ak}) x_{ak} \quad (1)$$

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

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

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

$$X_{as} = x_{ak}$$

$S$  : journées types

$c_s$  : durée journée  $s$

$z_s$  : colonne  $s \in S$

$\bar{A} \subseteq A$  : tâches à réaliser

$k_s$  : véhicule

$h_{ki}$  : déséquilibre

$$\min \sum_{s \in S} c_s z_s + M \sum_{i \in V} \sum_{k \in K} h_{ki} \quad (5)$$

$$\text{sujet à } \sum_{s \in S} X_{as} z_s \geq 1, \forall a \in \bar{A} \quad (6)$$

$$\sum_{s \in S | k_s = k} c_s z_s \leq D, \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{s \in \delta^+(i,k)} z_s - \sum_{s \in \delta^-(i,k)} z_s + h_{ki} = 0, \forall i \in V, k \in K \quad (8)$$

$$z_s \in \{0, 1\}, \forall s \in S \quad (9)$$

$\bar{S} \subseteq S$  : sélection     $c_{sk_s}$  : durée journée  $s$      $t_s$  : durée de transfert  
 $k_s$  : véhicule  
 $n_s$  : tâche suivante  
 $r_s$  : début tâche  
 $d_s$  : fin tâche

$$\min \sum_{s \in \bar{S}} t_s \quad (10)$$

$$\text{sujet à } [r_s, d_s] \subseteq B_{sk_s}, \forall s \in \bar{S} \quad (11)$$

$$d_s - r_s = c_{sk_s}, \forall s \in \bar{S} \quad (12)$$

$$t_s \geq T_{sn_s k_s}, \forall s \in \bar{S} \quad (13)$$

$$k_s = k_{n_s}, \forall s \in \bar{S} \quad (14)$$

$$k_s \in K, \forall s \in \bar{S} \quad (15)$$

$$n_s \in S \setminus s, \forall s \in \bar{S} \quad (16)$$

$\bar{S} \subseteq S$  : sélection $\Psi$  : incompatibilités $c_{sk_s}$  : durée journée  $s$  $t_s$  : durée de transfert $k_s$  : véhicule $n_s$  : tâche suivante $r_s$  : début tâche $d_s$  : fin tâche

$$\min \sum_{s \in \bar{S}} t_s \quad (10)$$

$$\text{sujet à } [r_s, d_s] \subseteq B_{sk_s}, \forall s \in \bar{S} \quad (11)$$

$$d_s - r_s = c_{sk_s}, \forall s \in \bar{S} \quad (12)$$

$$t_s \geq T_{sn_s k_s}, \forall s \in \bar{S} \quad (13)$$

$$k_s = k_{n_s}, \forall s \in \bar{S} \quad (14)$$

$$k_s \in K, \forall s \in \bar{S} \quad (15)$$

$$n_s \in S \setminus s, \forall s \in \bar{S} \quad (16)$$

$$[r_s, d_s] \cap [r_{s'}, d_{s'}] = \emptyset, \forall (s, s') \in \Psi$$

## Risques

- Pas assez de colonnes
- Données incomplètes

## Améliorations

- Communication *SP* ↔ *ORDO*
- Convergence

## Outline

- 1 **Introduction**
  - Contexte
  - Problématique
- 2 **Modélisation**
  - Informations utilisées
  - Problèmes connexes
- 3 **Résolution**
  - Décomposition fonctionnelle
  - Modèle
- 4 **Conclusion**

## Implémentation

### Réalisée

- Génération de colonnes
- Heuristique

### En cours

- Tests numériques
- Extraction données

## Résultats préliminaires

Ces résultats ne prennent pas en compte l'ordonnancement.

10 instances

$n$	$m$	$T$		$D$		$t_{sp}$	$t_{pm}$	$t$
1000	2000	3000	(33 j)	10.500 km				

$n$  : nombre de nœuds

$m$  : nombre d'arcs

$T$  : nombre de tâches

$D$  : durée totale des tâches

$t_{sp}$  : temps total résolution SP

$t_{pm}$  : temps total résolution PM

$t$  :  $t_{sp} + t_{pm}$

## Résultats préliminaires

Ces résultats ne prennent pas en compte l'ordonnancement.

10 instances

	$n$	$m$	$T$		$D$		$t_{sp}$	$t_{pm}$	$t$
	1000	2000	3000	(33 j)	10.500 km				

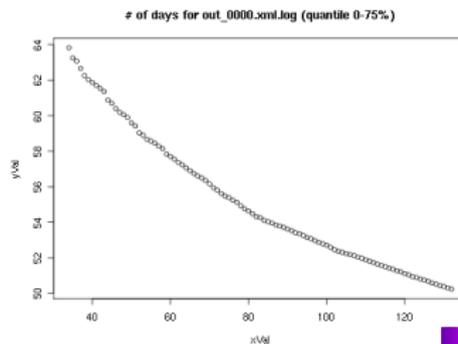
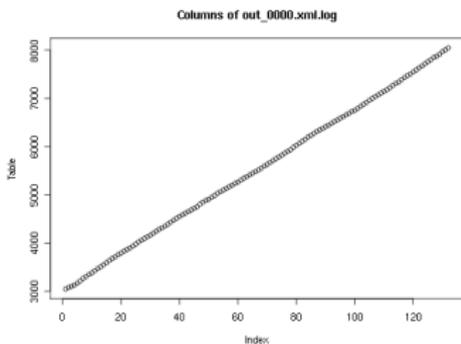
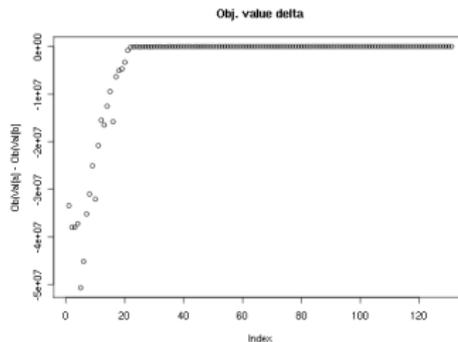
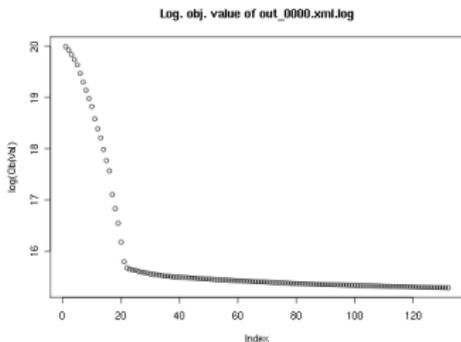
Solution réalisable < 15 minutes

Solution optimale ? > 60 minutes

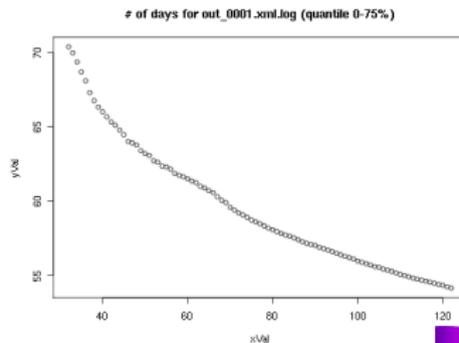
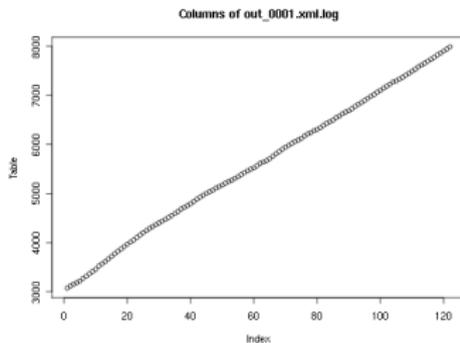
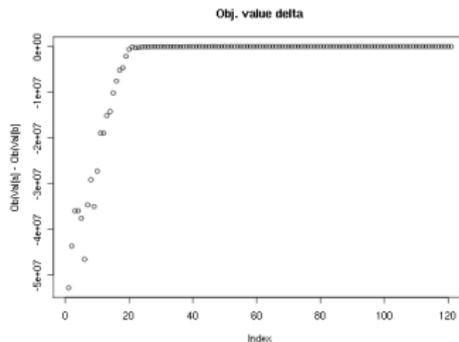
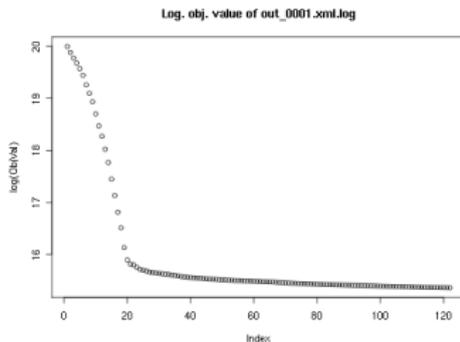
Plus court chemin [20,30] secs

Couverture [2,10] secs

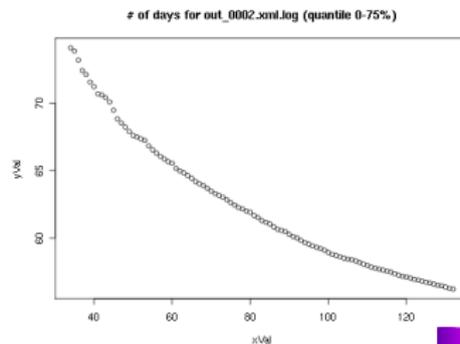
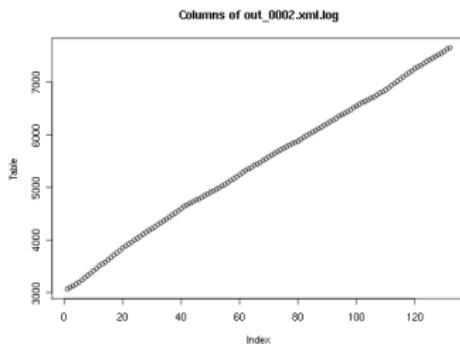
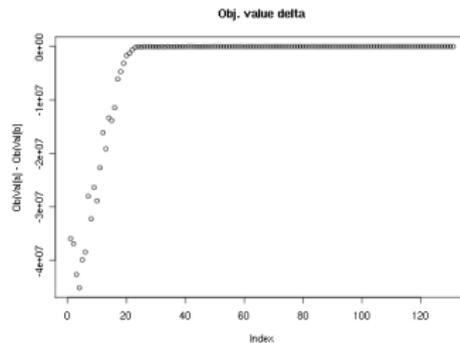
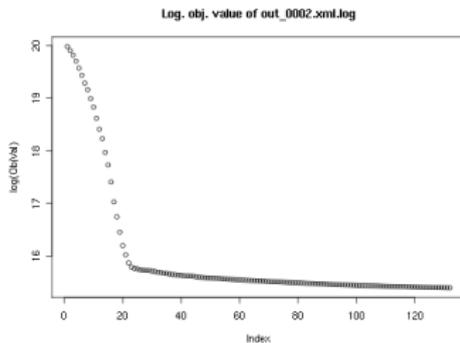
# Comportement



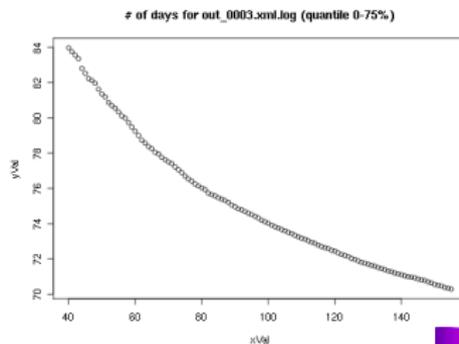
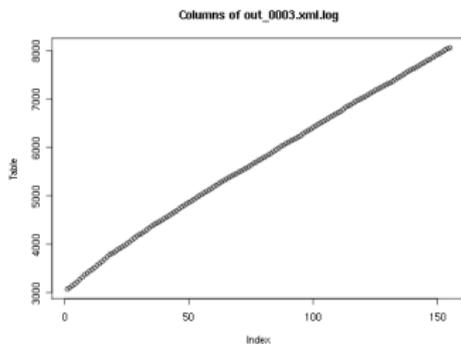
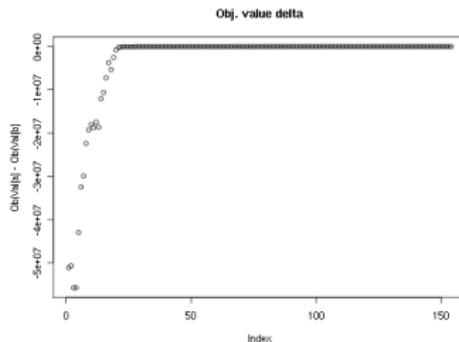
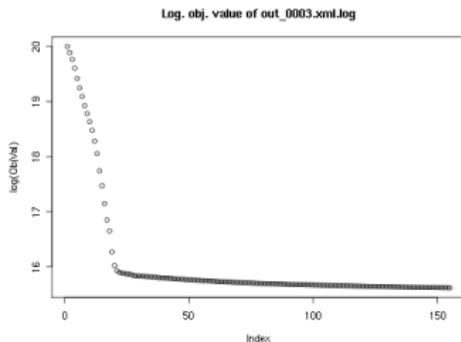
# Comportement



# Comportement

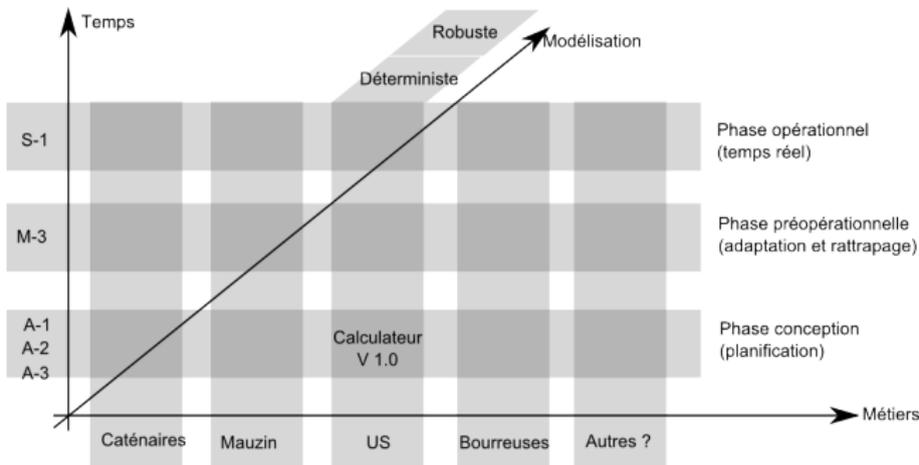


# Comportement



## Extensions

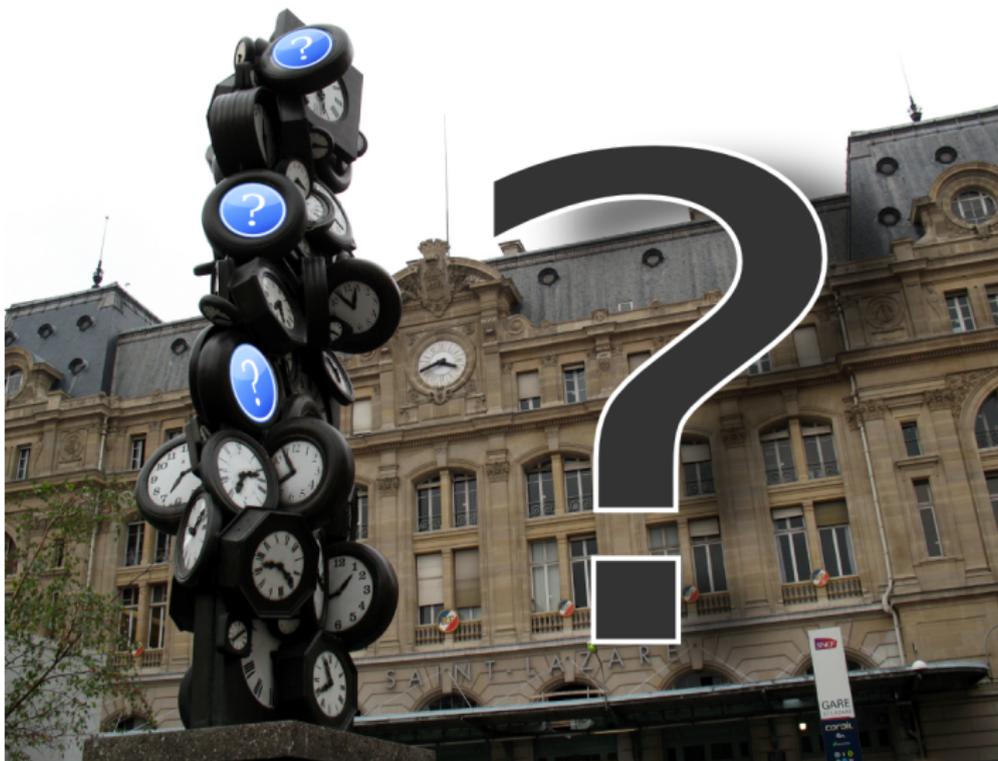
## Extensions



- Autres véhicules
- Phase de planification

- Régions
- Robustesse

# 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.
- 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.