

# 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

EDSYS 2009, Toulouse



## 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

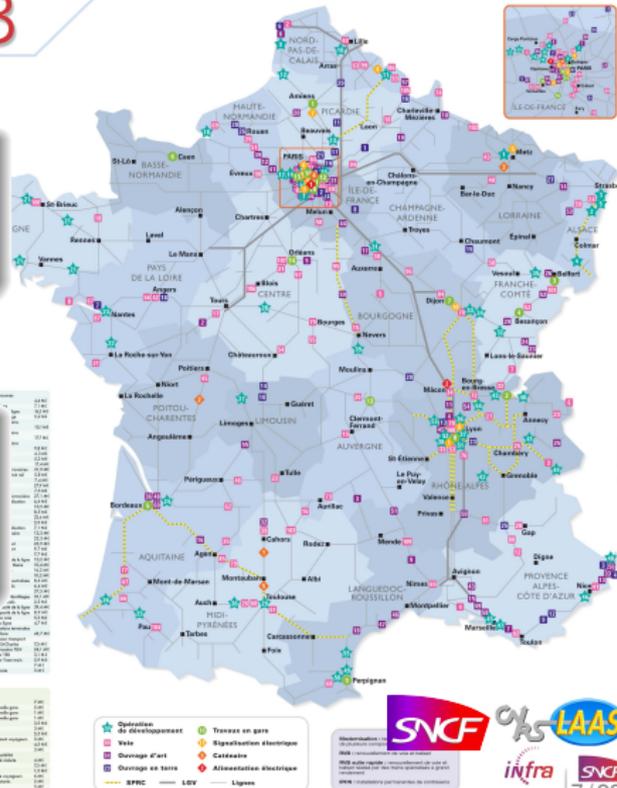
- Usure = vitesse x tonnage
- Accroissement

MOTRICE PAYSAGE 011		MOTRICE PAYSAGE 012	
1	1	1	1
2	2	2	2
3	3	3	3
4	4	4	4
5	5	5	5
6	6	6	6
7	7	7	7
8	8	8	8
9	9	9	9
10	10	10	10
11	11	11	11
12	12	12	12
13	13	13	13
14	14	14	14
15	15	15	15
16	16	16	16
17	17	17	17
18	18	18	18
19	19	19	19
20	20	20	20
21	21	21	21
22	22	22	22
23	23	23	23
24	24	24	24
25	25	25	25
26	26	26	26
27	27	27	27
28	28	28	28
29	29	29	29
30	30	30	30
31	31	31	31
32	32	32	32
33	33	33	33
34	34	34	34
35	35	35	35
36	36	36	36
37	37	37	37
38	38	38	38
39	39	39	39
40	40	40	40
41	41	41	41
42	42	42	42
43	43	43	43
44	44	44	44
45	45	45	45
46	46	46	46
47	47	47	47
48	48	48	48
49	49	49	49
50	50	50	50
51	51	51	51
52	52	52	52
53	53	53	53
54	54	54	54
55	55	55	55
56	56	56	56
57	57	57	57
58	58	58	58
59	59	59	59
60	60	60	60
61	61	61	61
62	62	62	62
63	63	63	63
64	64	64	64
65	65	65	65
66	66	66	66
67	67	67	67
68	68	68	68
69	69	69	69
70	70	70	70
71	71	71	71
72	72	72	72
73	73	73	73
74	74	74	74
75	75	75	75
76	76	76	76
77	77	77	77
78	78	78	78
79	79	79	79
80	80	80	80
81	81	81	81
82	82	82	82
83	83	83	83
84	84	84	84
85	85	85	85
86	86	86	86
87	87	87	87
88	88	88	88
89	89	89	89
90	90	90	90
91	91	91	91
92	92	92	92
93	93	93	93
94	94	94	94
95	95	95	95
96	96	96	96
97	97	97	97
98	98	98	98
99	99	99	99
100	100	100	100

### Travaux

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

MOTRICE PAYSAGE 011		MOTRICE PAYSAGE 012	
1	1	1	1
2	2	2	2
3	3	3	3
4	4	4	4
5	5	5	5
6	6	6	6
7	7	7	7
8	8	8	8
9	9	9	9
10	10	10	10
11	11	11	11
12	12	12	12
13	13	13	13
14	14	14	14
15	15	15	15
16	16	16	16
17	17	17	17
18	18	18	18
19	19	19	19
20	20	20	20
21	21	21	21
22	22	22	22
23	23	23	23
24	24	24	24
25	25	25	25
26	26	26	26
27	27	27	27
28	28	28	28
29	29	29	29
30	30	30	30
31	31	31	31
32	32	32	32
33	33	33	33
34	34	34	34
35	35	35	35
36	36	36	36
37	37	37	37
38	38	38	38
39	39	39	39
40	40	40	40
41	41	41	41
42	42	42	42
43	43	43	43
44	44	44	44
45	45	45	45
46	46	46	46
47	47	47	47
48	48	48	48
49	49	49	49
50	50	50	50
51	51	51	51
52	52	52	52
53	53	53	53
54	54	54	54
55	55	55	55
56	56	56	56
57	57	57	57
58	58	58	58
59	59	59	59
60	60	60	60
61	61	61	61
62	62	62	62
63	63	63	63
64	64	64	64
65	65	65	65
66	66	66	66
67	67	67	67
68	68	68	68
69	69	69	69
70	70	70	70
71	71	71	71
72	72	72	72
73	73	73	73
74	74	74	74
75	75	75	75
76	76	76	76
77	77	77	77
78	78	78	78
79	79	79	79
80	80	80	80
81	81	81	81
82	82	82	82
83	83	83	83
84	84	84	84
85	85	85	85
86	86	86	86
87	87	87	87
88	88	88	88
89	89	89	89
90	90	90	90
91	91	91	91
92	92	92	92
93	93	93	93
94	94	94	94
95	95	95	95
96	96	96	96
97	97	97	97
98	98	98	98
99	99	99	99
100	100	100	100

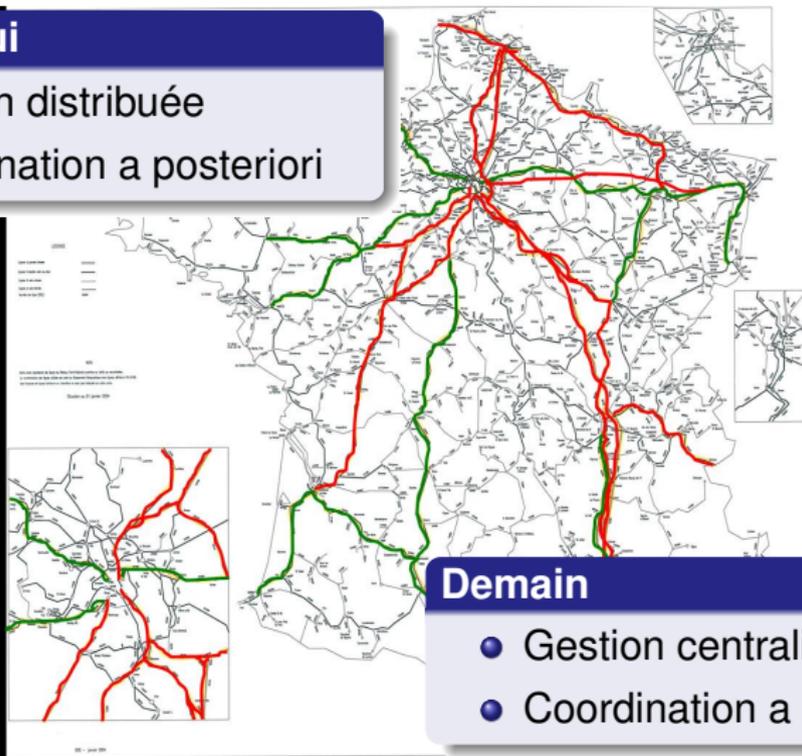


Le document communiqué est propriété de la SNCF et de ses filiales. Toute réimpression ou utilisation non autorisée sans la permission écrite de la SNCF est formellement interdite.

# 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

# Réseau

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

## 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

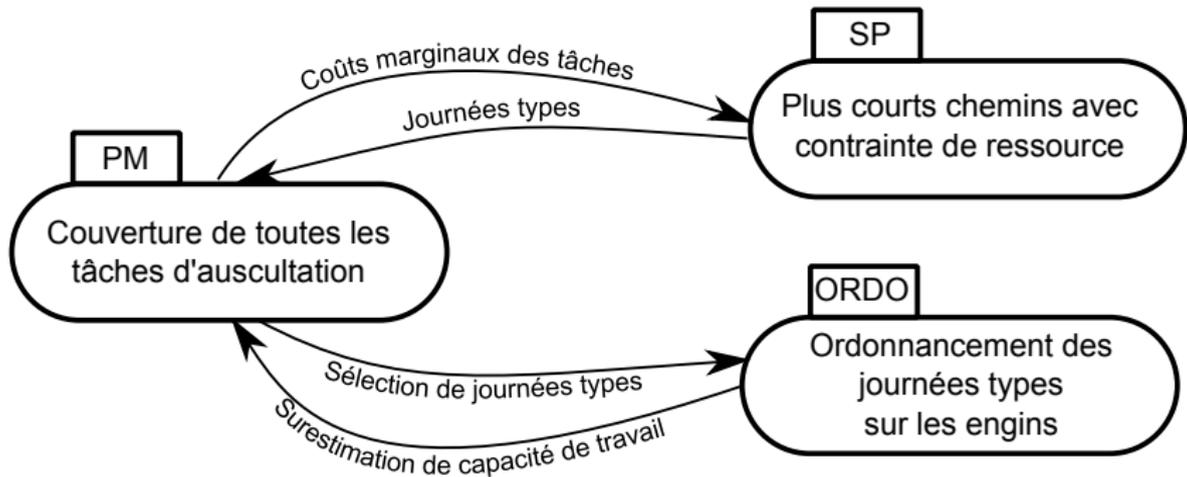
## Références

- 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

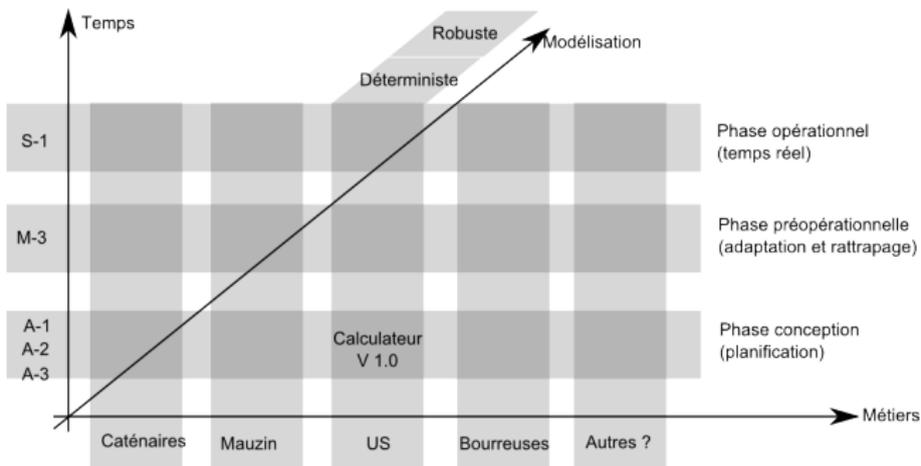
Ces résultats ne prennent pas en compte l'ordonnancement.  
Réseau 1000(100) nœuds et 2000 arcs.

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

Solution réalisable < 5 minutes  
Solution optimale > ? (4 heures)  
Plus court chemin [20,30] secs  
Couverture [2,10] secs

## Extensions

## Extensions

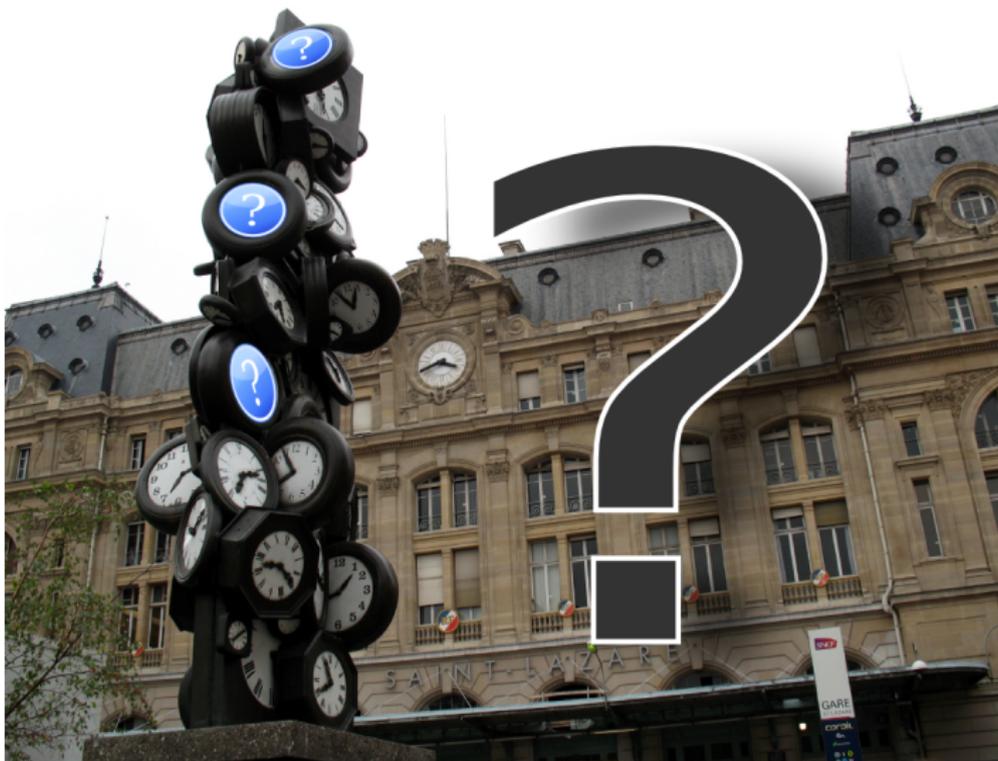


- Autres véhicules
- Phase de planification

- 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.