

Optimisation des tournées d'inspection des voies ferrées

S. Lannez^{1,3}

C. Artigues³

J. Damay¹

M. Gendreau⁴

N. Marcos¹

P. Pouligny²

SNCF I&R/A²D, 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

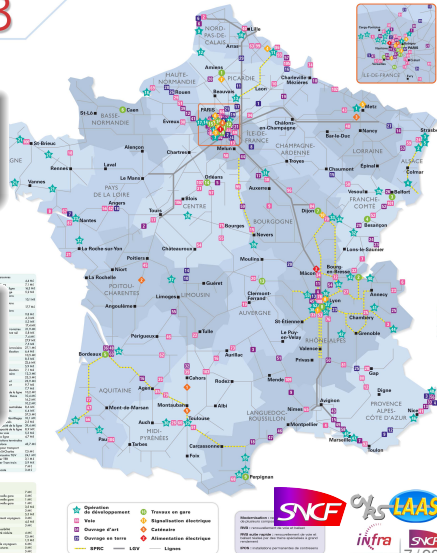
- Usure = vitesse x tonnage
- Accroissement

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

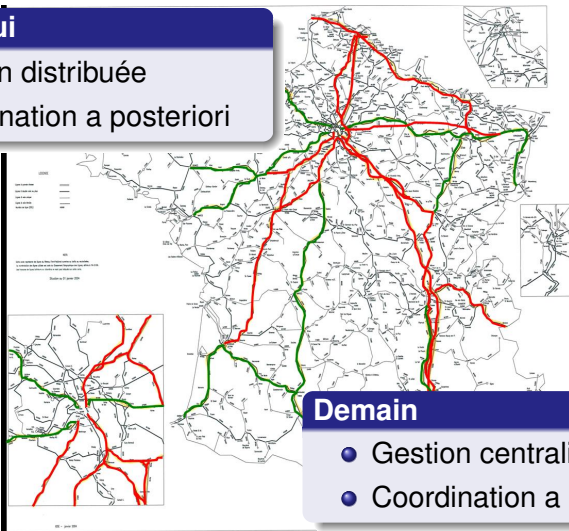


LE CHIFFRE D'AFFAIRES 2008 DE LA SNCF

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

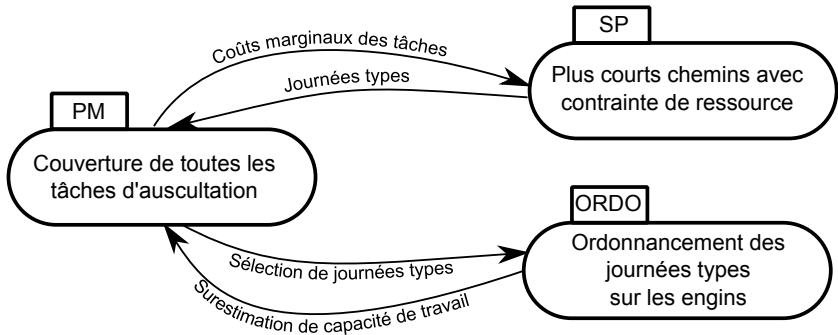
Références

- 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 π_{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 Ψ : 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

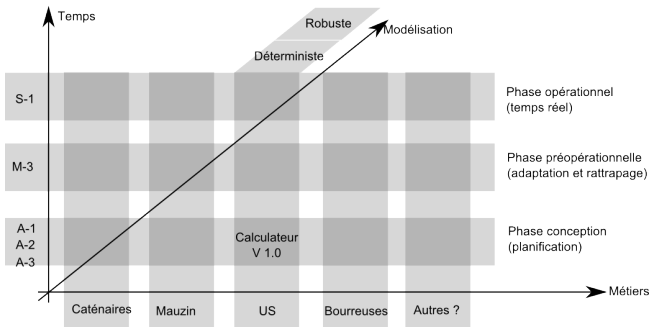
Ces résultats ne prennent pas en compte l'ordonnancement.
Réseau 1000(100) nœuds et 2000 arcs.

	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

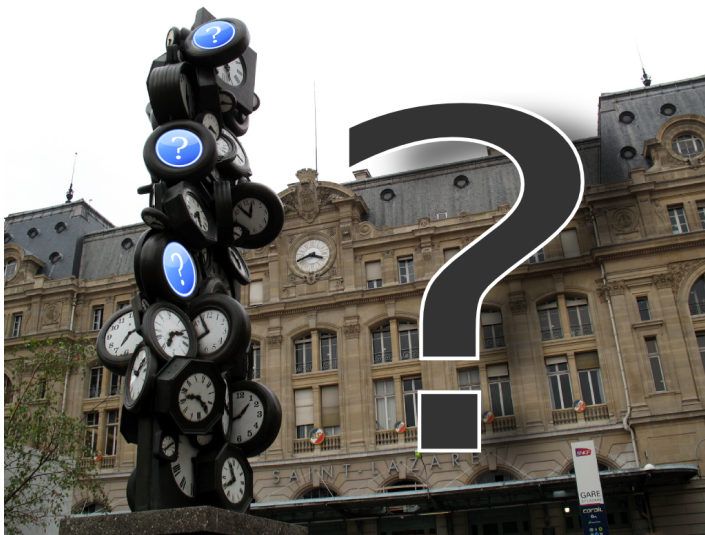


- Autres véhicules
- Phase de planification

- 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.