

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@cirreлт.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

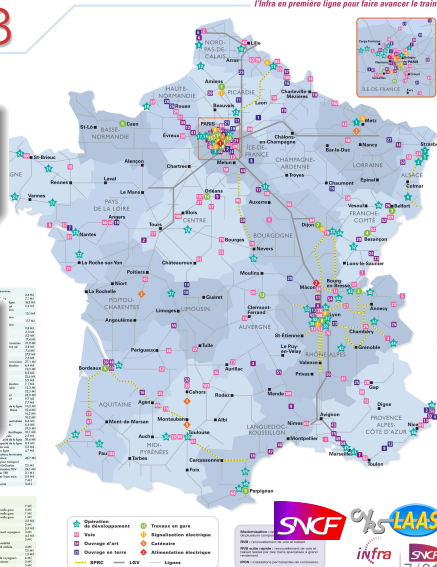
- Usure = vitesse x tonnage
- Accroissement

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

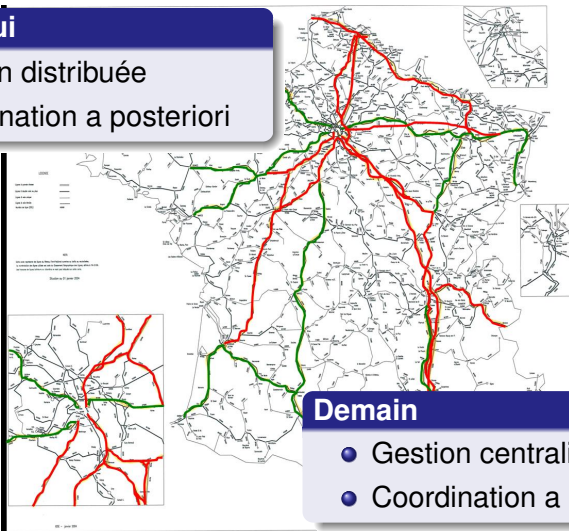


Le document communiqué est propriété de la SNCF et est strictement confidentiel. Toute réimpression ou utilisation non autorisée sans la permission écrite de la SNCF est formellement interdite.

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

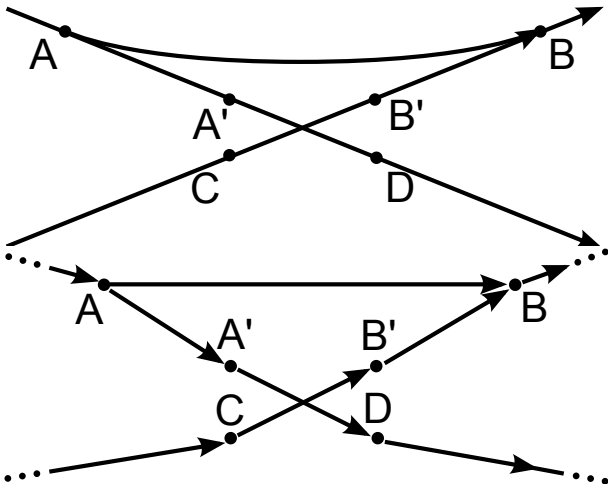
- Autonomie en gasoil
- Capacité des cuves
- Capacité du rail (sillon)

Simplifiées

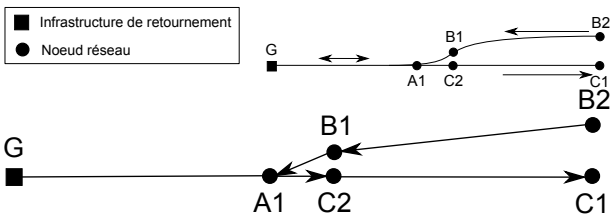
- Périodicité
- Maintenance
- Horaires du personnel

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

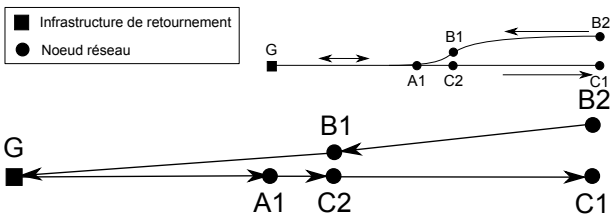
Changement de voie



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

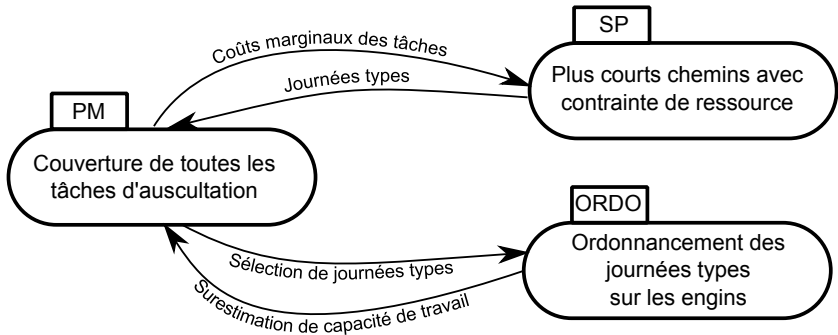
Références

- 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 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.

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				

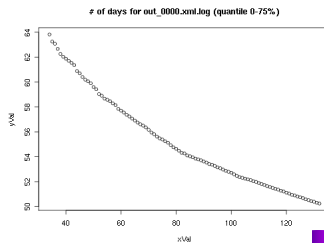
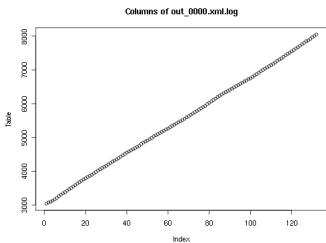
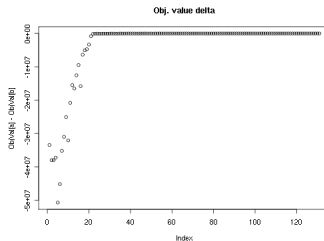
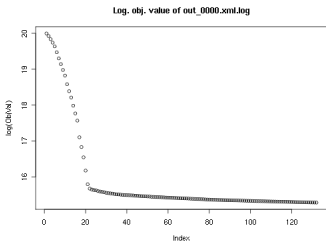
Solution réalisable < 15 minutes

Solution optimale ? > 60 minutes

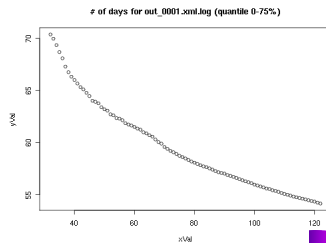
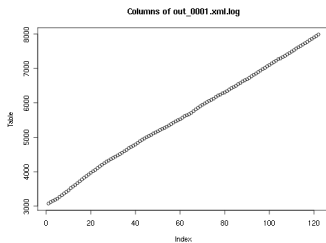
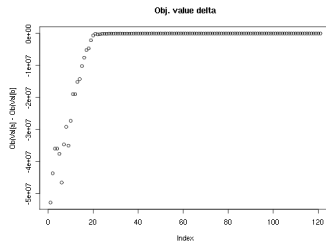
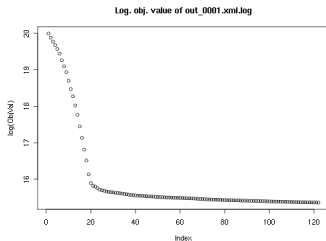
Plus court chemin [20,30] secs

Couverture [2,10] secs

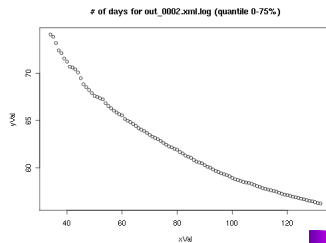
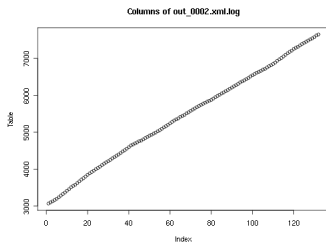
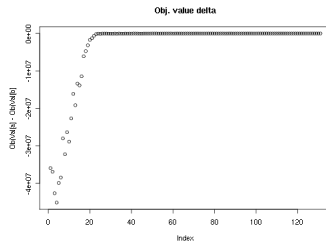
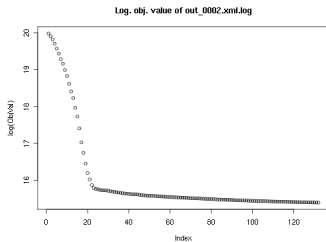
Comportement



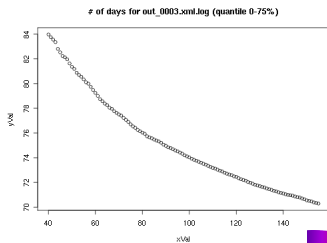
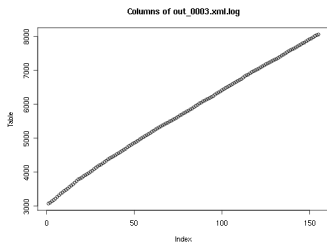
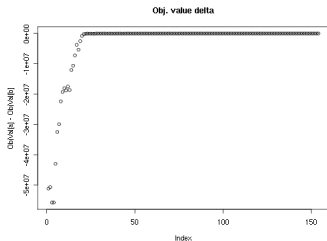
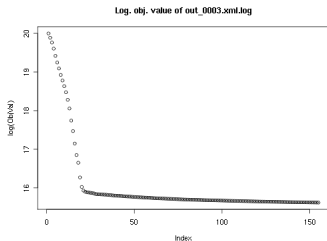
Comportement



Comportement

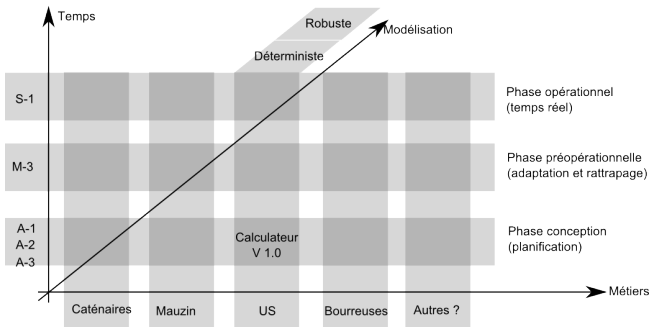


Comportement



Extensions

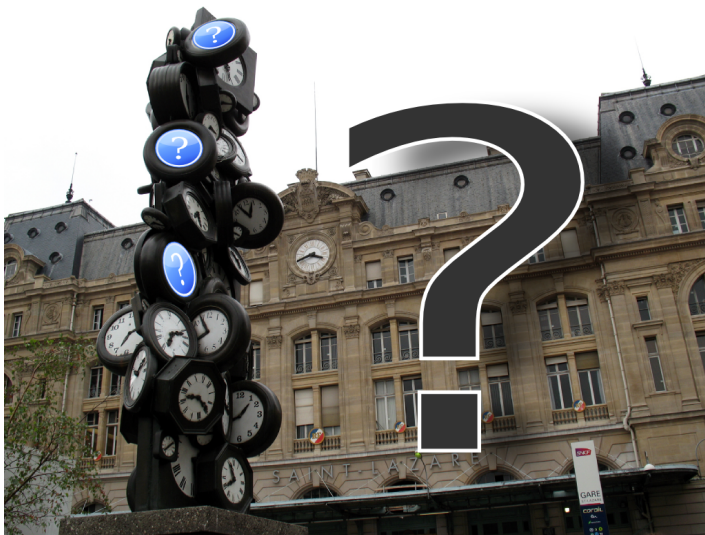
Extensions



- 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.