

Optimisation des tournées de maintenances des voies à la SNCF

S. Lannez^{1,2} C. Artigues² M. Gendreau³ N. Marcos¹
P. Pouligny¹

¹I&R/GDA-SNCF,

²LAAS-CNRS,

³Université 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

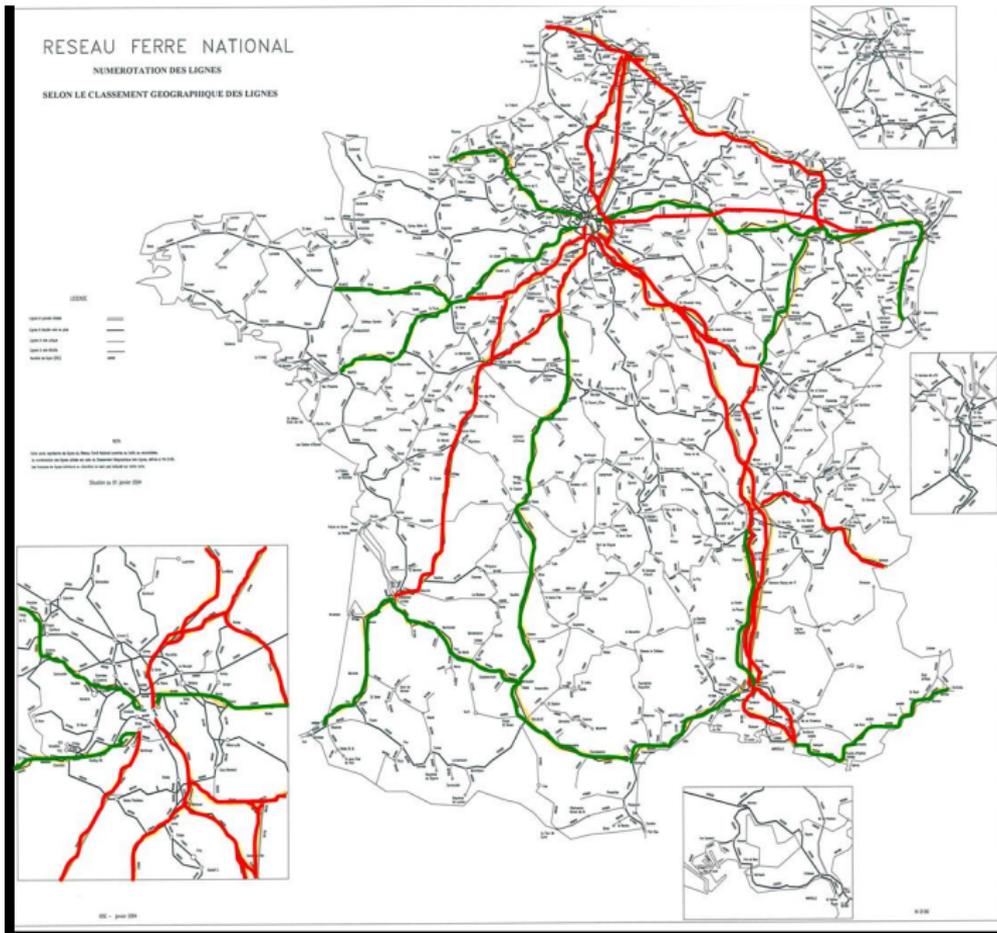
Réorganisation

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

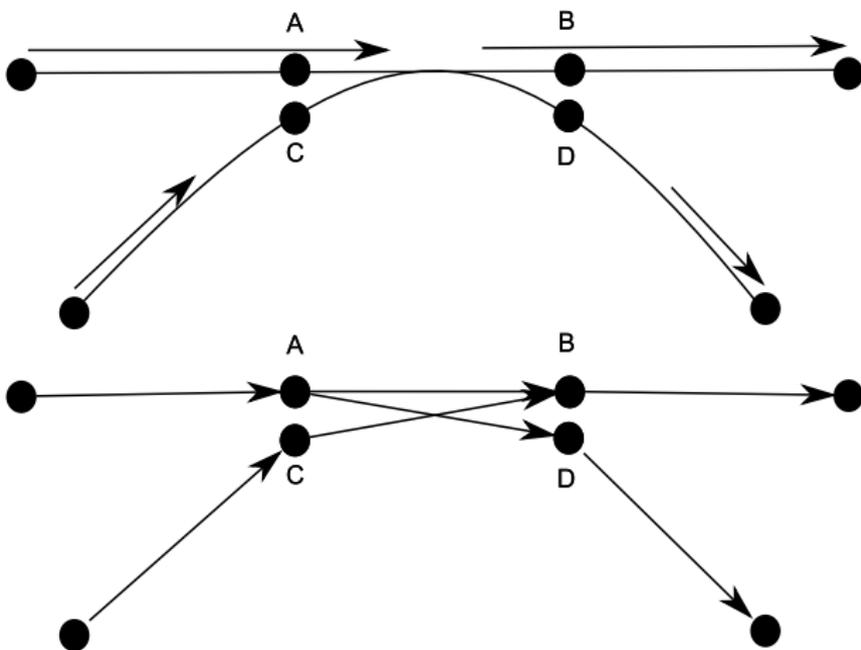
- Gare de repos
- Couplant
- Compatibilité véhicule
- Arcs/arêtes
- Capacité de la flotte
- Fenêtres fixes
 - Auscultations
 - Maintenance
 - Demandes régions

Hypothèses

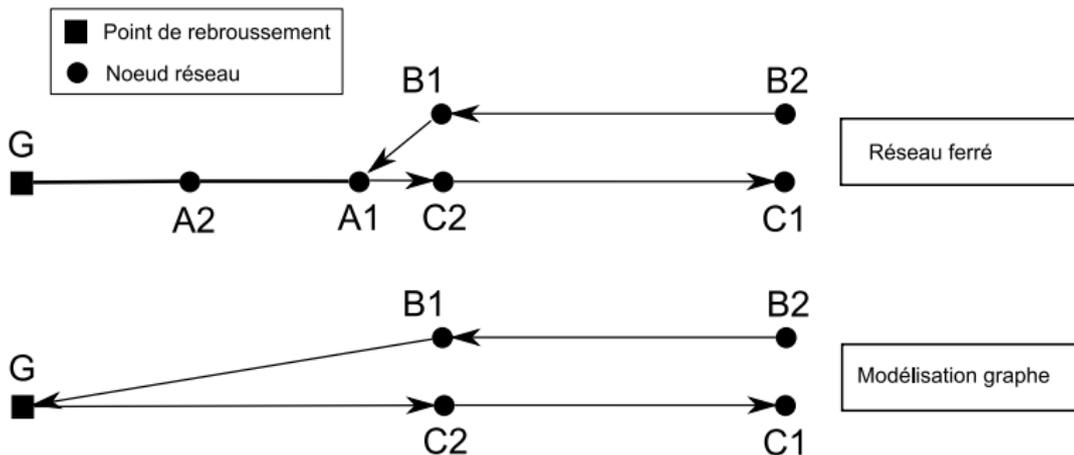
- Gare de repos (gasoil, vidange)
- Couplant
- Compatibilité véhicule
- Arcs/arêtes
- Capacité de la flotte (du rail)
- Fenêtres fixes
 - Auscultations (référentiel)
 - Maintenance (référentiel)
 - Demandes régions

- 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

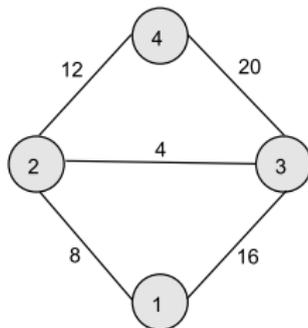
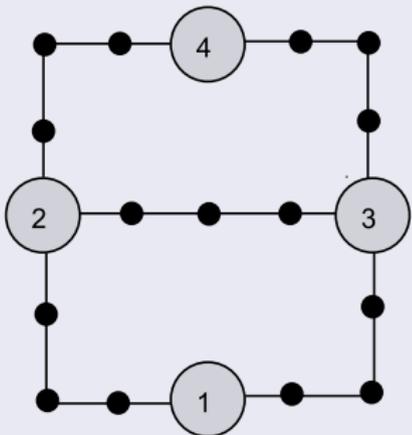
Références

- 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)

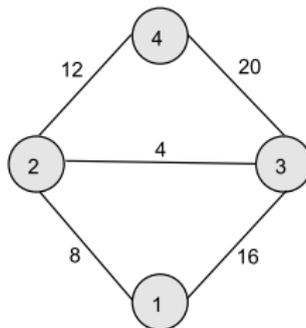
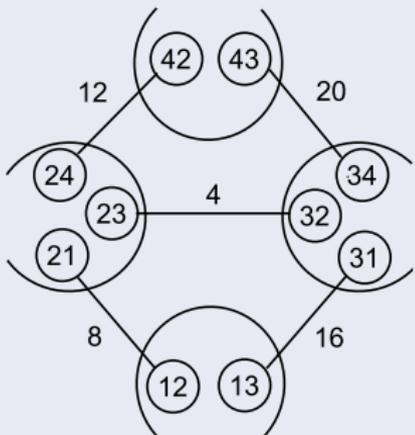
$3|R| + 1$ nœuds



Reformulation en tournées sur nœuds : exemples

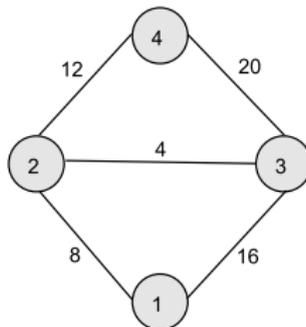
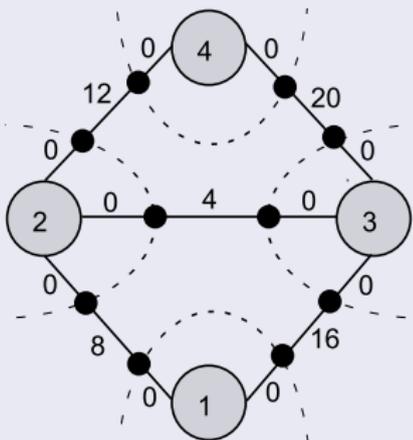
Baldacci and Maniezzo (2004)

$2|R|$ 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*

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

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

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

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

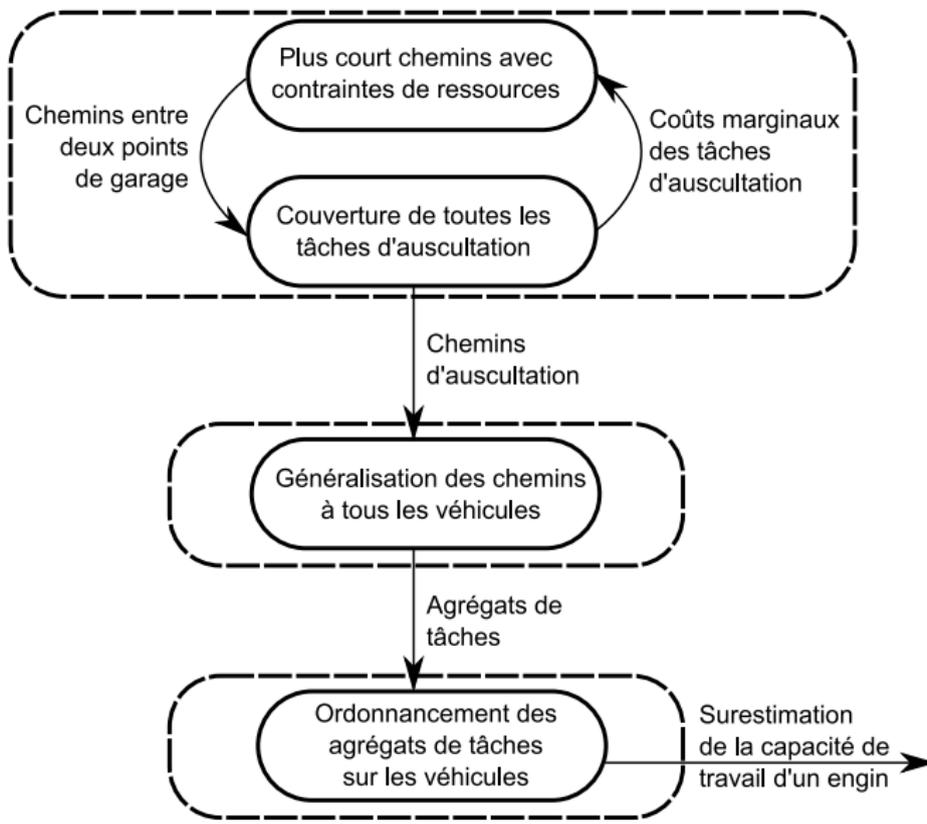
$$k_i = k_{n_i} \quad (12)$$

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

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

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

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

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.