

UNIVERSITÉ DE PARIS 13,  
SORBONNE PARIS CITÉ  
ÉCOLE DOCTORALE GALILÉE

# THÈSE

présentée par

**Hanane ALLAOUA**

pour obtenir le grade de  
DOCTEUR D'UNIVERSITÉ  
SPÉCIALITÉ : INFORMATIQUE

## Routage et planification des personnels pour l'hospitalisation à domicile

Soutenue le 16/12/2014 devant le jury composé de :

<i>Directeur :</i>	Roberto WOLFLER CALVO	université Paris 13
<i>Co-encadrants :</i>	Sylvie BORNE	université Paris 13
	Lucas LÉTOCART	université Paris 13
<i>Président :</i>	Roberto BALDACCI	université de Bologne
<i>Rapporteurs :</i>	Caroline PRODHON	université de Troyes
	Angel RUIZ BARTOLOME	université Laval Québec



*Et voila MAMAN et PAPA je suis DOCTEUR, je ne soigne pas les malades mais je suis tout de même DOCTEUR ...*



---

## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mon directeur de thèse, Professeur Roberto Wolfler Calvo ainsi que mes deux encadrants Mme Sylvie Borne et Mr Lucas Létocart pour m'avoir accueilli au sein de leur équipe. Je leur suis également reconnaissante pour avoir partagé leur expérience scientifique avec moi.

Je voudrais remercier les rapporteurs de cette thèse Caroline Prodhon université de troyes et Angel Ruiz Bartolome Université Laval Québec CANADA pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail.

J'associe à ces remerciements Roberto Baldacci, professeur de l'université de Bologne, pour avoir accepté de présider mon jury de thèse.

Je désire grandement remercier ma marraine Sophie Toulouse ainsi que Sylvie Borne de m'avoir guidé dans l'enseignement.

Merci à tous les membres du LIPN et spécialement l'équipe AOC.

Bien sûr cette thèse n'aurait pas eu le même goût sans mes chers amis docteurs et doctorants spécialement : Karima, Hanane, Naim, Leila, Aicha, Moufida et Amine; que dire, sans votre soutien dans les moments les plus difficiles je n'aurais certainement pas pu atteindre mes objectifs, encore un grand merci.

À mes collègues du «Thésarium» Michel(e), Ievgen, aicha, Leila et Marco ce fut un plaisir d'avoir partagé ce bureau avec vous.

Je tiens à remercier spécialement ma sœur Kahina, à qui je dois ma réussite.

À mon mari Akram, merci infiniment pour ta présence et ton amour.

Je tiens également à remercier mes sœurs : Lynda, Nadjette, Salima et Sara et mon frère Sofiane ainsi que ma meilleure amie Amel pour leur amour et leur soutien durant ces trois années et sans lesquels je n'en serais pas là aujourd'hui. Sans oublier ma belle famille Dhaoui, merci ...

Je laisse les meilleurs pour la fin, mes parents (Hayette et Laaziz), je tiens de tout cœur à les remercier pour leur soutien et leur patience tout au long de la thèse et de ma vie entière.



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	La Recherche Opérationnelle . . . . .	1
1.2	La Recherche Opérationnelle dans le domaine de la santé . . .	1
1.3	L'hospitalisation à domicile . . . . .	3
1.3.1	Organisation au sein de l'HAD . . . . .	4
1.3.2	Historique . . . . .	5
1.3.3	Quelques chiffres . . . . .	6
1.4	Objet et plan de thèse . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Problème de routage et de planification des personnels pour l'hospitalisation à domicile</b>	<b>11</b>
2.1	Contexte . . . . .	11
2.2	État de l'art . . . . .	12
2.2.1	Problème de planification . . . . .	13
2.2.2	Problème de tournées de véhicules . . . . .	17
2.2.3	Problème de routage et de planification pour l'hospitalisation à domicile . . . . .	20
2.2.4	Problèmes similaires . . . . .	28
2.2.4.1	Problème de routage et de planification des techniciens . . . . .	28
2.2.4.2	Problème de tournées des agents de sécurité . . . . .	29
2.3	Conclusion . . . . .	30
<b>3</b>	<b>Problème et modélisation</b>	<b>33</b>
3.1	Notations et modélisation du problème . . . . .	33
3.2	Résolution exacte via un solveur . . . . .	36
3.3	Définition des instances . . . . .	44
3.4	Résultats expérimentaux . . . . .	45
3.5	Conclusion . . . . .	47
<b>4</b>	<b>Matheuristique</b>	<b>51</b>
4.1	Introduction . . . . .	51
4.2	Motivations . . . . .	51
4.3	Affectation des personnels aux tranches horaires . . . . .	52
4.4	Routage des personnels . . . . .	53
4.4.1	Clusterisation de l'ensemble des services . . . . .	54
4.4.1.1	Méthode basée sur la m-coupe-maximale . . . . .	54

4.4.1.2	Méthode basée sur le <i>mTSPTW</i> et le <i>bin-packing</i> . . . . .	57
4.4.2	Construction des tournées . . . . .	62
4.4.2.1	Détermination des tournées via le <i>TSPTW</i> . . . . .	62
4.4.2.2	Détermination des tournées via le <i>Prize Collecting TSPTW (PCTSPTW)</i> . . . . .	63
4.5	Planification des personnels . . . . .	65
4.6	Post-optimisation . . . . .	68
4.7	Résultats expérimentaux . . . . .	71
4.7.1	Résultats obtenus avec les instances à 30 services . . . . .	71
4.7.1.1	Minimisation du nombre de personnels . . . . .	72
4.7.1.2	Minimisation de la distance . . . . .	73
4.7.2	Résultats obtenus avec les instances à 50 services . . . . .	76
4.7.2.1	Minimisation du nombre de personnels . . . . .	76
4.7.2.2	Minimisation de la distance . . . . .	78
4.8	Conclusion . . . . .	80
<b>5</b>	<b>Variante sur un horizon étendu</b>	<b>83</b>
5.1	Motivations . . . . .	83
5.1.1	Affectation des personnels aux tranches horaires . . . . .	83
5.1.2	Construction des tournées sur l'horizon $H$ . . . . .	83
5.1.3	Planification des personnels avec des contraintes de périodicité . . . . .	84
5.1.3.1	Jours de travail successifs . . . . .	84
5.1.3.2	Jours de repos . . . . .	85
5.1.3.3	Régularité des personnels chez les patients . . . . .	85
5.1.3.4	Fonction objectif . . . . .	85
5.2	Résultats expérimentaux . . . . .	87
5.2.1	Minimisation du nombre de personnels actifs . . . . .	89
5.2.2	Minimisation de la distance parcourue . . . . .	90
5.2.3	Comparaison des résultats obtenus avec les deux objectifs . . . . .	91
5.3	Conclusion . . . . .	92
<b>6</b>	<b>Réoptimisation du routage et de la planification des personnels</b>	<b>97</b>
6.1	Introduction . . . . .	97
6.2	Contexte . . . . .	98
6.3	Distance entre deux solutions . . . . .	99
6.4	PLNE & réoptimisation . . . . .	99
6.4.1	Le nombre de personnels actifs . . . . .	99
6.4.2	La modification de l'heure de passage prévue . . . . .	100



---

6.4.3	Le nombre de personnels par patient . . . . .	100
6.4.4	Argumentation . . . . .	100
6.4.5	La fonction objectif . . . . .	101
6.5	Matheuristique & réoptimisation . . . . .	101
6.5.1	Idées d'adaptation de la matheuristique . . . . .	102
6.5.1.1	Réoptimisation du routage . . . . .	102
6.5.1.2	Réoptimisation de la planification . . . . .	103
6.6	Recherche locale . . . . .	106
6.6.1	Insertion des services . . . . .	107
6.6.2	Premier niveau d'exploration du voisinage . . . . .	108
6.6.3	Deuxième niveau d'exploration du voisinage . . . . .	109
6.7	Conclusion . . . . .	110
<b>7</b>	<b>Conclusion générale</b>	<b>111</b>
<b>A</b>	<b>Tableaux de résultats</b>	<b>115</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>153</b>



# Table des figures

1.1	Hospitalisation à domicile . . . . .	4
1.2	Progression de prise en charge en HAD depuis 2005 (journées de prise en charge) . . . . .	7
1.3	Evolution du taux de couverture de l'HAD par région depuis 2005 (en nombre de journées pour 100 000 habitants). source : [FNEHAD, 2012] . . . . .	8
2.1	Critères de mesure d'un bon planning [Partouche, 1998] . . . . .	13
2.2	Synchronisation . . . . .	21
2.3	Précédences . . . . .	22
3.1	Soins versus services . . . . .	34
3.2	Représentation du routage des personnels . . . . .	36
3.3	Représentation d'un planning . . . . .	36
4.1	Exemple . . . . .	53
4.2	m-coupe-max . . . . .	55
4.3	. . . . .	69
4.4	Exemple . . . . .	70
4.5	Planification et routage sur une journée . . . . .	71
5.1	Planification et routage sur un horizon plus étendu . . . . .	88



# Liste des tableaux

2.1	Tableau récapitulatif des caractéristiques des différents problèmes traités dans les travaux cités . . . . .	27
2.2	Aperçu des caractéristiques des trois problèmes [Misir et al., 2014] . . . . .	31
3.1	Résultats des instances à 30 services pour le PLNE . . . . .	46
3.2	Résultats des instances à 50 services pour le PLNE . . . . .	48
4.1	Nœud versus macro-nœuds . . . . .	70
4.2	Comparaison matheuristique-PLNE sous <i>l'objectif1</i> : instances à 30 services . . . . .	74
4.3	Comparaison matheuristique-PLNE sous <i>l'objectif2</i> : instances à 30 services . . . . .	75
4.4	Comparaison matheuristique-PLNE sous <i>l'objectif1</i> : instances à 50 services . . . . .	77
4.5	Comparaison matheuristique-PLNE sous <i>l'objectif2</i> : instances à 50 services . . . . .	79
5.1	Résultat de la minimisation du nombre de personnels sur un horizon étendu . . . . .	94
5.2	Résultat de la minimisation de la distance sur un horizon étendu	95
5.3	Comparaison des résultats obtenus avec les deux objectifs . . . . .	96
6.1	Récapitulatif . . . . .	98
A.1	Résultats des instances à 30 services pour le PLNE . . . . .	115
A.2	Résultats des instances à 50 services pour le PLNE . . . . .	119
A.3	Comparaison matheuristique-PLNE sous <i>l'objectif1</i> : instances à 30 services . . . . .	124
A.4	Comparaison matheuristique-PLNE sous <i>l'objectif2</i> : instances à 30 services . . . . .	128
A.5	Comparaison matheuristique-PLNE sous <i>l'objectif1</i> : instances à 50 services . . . . .	133
A.6	Comparaison matheuristique-PLNE sous <i>l'objectif2</i> : instances à 50 services . . . . .	137
A.7	Résultat de la minimisation du nombre de personnels sur un horizon étendu . . . . .	142
A.8	Résultat de la minimisation de la distance sur un horizon étendu	146
A.9	Comparaison des résultats obtenus avec les deux objectifs . . . . .	150

---

**Résumé :** En réponse aux contraintes économiques, au problème du vieillissement de la population et aussi à la volonté des patients de se faire soigner dans le milieu familial, l'Hospitalisation À Domicile (HAD) prend de plus en plus d'ampleur. Dans ce travail de recherche, nous nous intéressons aux établissements d'hospitalisation à domicile, parmi les différentes problématiques qui existent dans ce domaine, nous étudions le problème de routage et de planification des personnels.

Nous développons tout d'abord un modèle de programmation linéaire en nombres entiers qui permet de formuler clairement les contraintes du problème.

Nous présentons par la suite, une matheuristique permettant de résoudre le problème défini sur une journée de planification. Nous développons également une variante de notre matheuristique sur un horizon de 14 jours. Cette dernière prend en considération plusieurs contraintes en plus de celles considérées pour la planification sur une journée.

Enfin, nous introduisons un problème de réoptimisation de routage et de la planification des personnels pour l'hospitalisation à domicile et présentons quelques approches de résolutions.

Ces différentes méthodes combinent des heuristiques, la programmation dynamique et la programmation mathématique.

**Mots clés :** Recherche Opérationnelle, Hospitalisation À Domicile, matheuristique, Tournées de Véhicules, Planification.

---

---

**Abstract :** Home health care (HHC), i.e., visiting and nursing patients at home, is a growing sector in the medical care system. Therefore, the optimal scheduling of the health care staffs arises. The objective of this problem consists in constructing routes and rosters for the staffs while optimizing costs.

We propose an integer linear programming formulation (ILP) that clearly formulate the constraints of the problem.

We present a matheuristic to solve the daily routing and rostering problem. We also develop a variant of our matheuristic defined for a period of 14 days. It takes into account several constraints in addition to those considered in the daily planning.

Finally, we introduce the problem of reoptimizing the routing and rostering staffs and we give some ideas to solve this problem.

These methods combine heuristic algorithms, dynamic programming and mathematical programming.

**Keywords :** Operational Research, Home Health Care, matheuristic, vehicle routing, planning.

---





# CHAPITRE 1

## Introduction

---

### 1.1 La Recherche Opérationnelle

Pendant la seconde guerre mondiale le besoin d'un terme particulier s'est fait sentir pour désigner un ensemble de méthodes utiles pour l'étude systématique et quantitative de tous les facteurs susceptibles d'influencer une décision. Qu'il s'agisse de mise au point de nouvelles armes, de détermination des tactiques les plus efficaces ou même de décisions d'ordre stratégique supposant un choix entre différentes politiques. Ainsi, la Recherche Opérationnelle est née, et a donc pour but de résoudre des problèmes de décision ou d'optimisation à l'aide d'outils mathématiques et informatiques.

La Recherche Opérationnelle s'est ensuite étendue à d'autres domaines tels que l'industrie, les finances, le transport ou encore le domaine de la santé. En ce qui concerne l'optimisation en transport, elle correspond souvent à l'organisation et à l'optimisation des tournées d'un ou de plusieurs véhicules. Par ailleurs, dans le domaine de la santé, les chercheurs s'intéressent beaucoup à la planification des personnels ou encore à la gestion des blocs opératoires. Les méthodes de résolution développées pour ces deux domaines sont en général soit des méthodes exactes, dont le but est de trouver une solution optimale du problème posé, soit des méthodes approchées, dont le but est de trouver une solution de bonne qualité mais pas forcément optimale en des temps de calcul raisonnables.

### 1.2 La Recherche Opérationnelle dans le domaine de la santé

La recherche opérationnelle est connue pour fournir des outils informatiques d'aide à la décision qui permettent une bonne gestion de ressources dans différents secteurs (industriels ou autres), c'est pourquoi elle est beaucoup utilisée par les chercheurs dans différents domaines et notamment dans le domaine de la santé. Il existe plusieurs travaux qui résument les études utilisant la recherche opérationnelle dans le domaine de la santé en général, l'un des premiers fut de [Fries, 1979], puis [Rosenhead, 1978,

[Boldy and O’Kane, 1982](#), [Datta, 1993](#)]. D’autres chercheurs se sont concentrés sur des problèmes spécifiques dans le domaine comme l’ordonnancement des blocs opératoires [[Cardoen et al., 2010](#), [Guerriero and Guido, 2011](#)], la planification des infirmiers [[Burke et al., 2004](#)], les critères de mesure de performance d’un système de santé [[Li and Benton, 1996](#)], ou encore le processus d’analyse hiérarchique<sup>1</sup> pour la prise de décisions dans le milieu médical [[Liberatore and Nydick, 2008](#)]. L’application de la simulation aux événements discrets au sein d’un système hospitalier permet de modéliser les détails des flux complexes des patients, [[Jacobson et al., 2006](#)] présentent une liste de mesures qui doivent être faites rigoureusement pour modéliser chaque scénario de soins de santé avec succès en utilisant la simulation.

L’affectation et l’admission des patients est un problème qui peut être abordé de trois manières différentes : ① d’une manière stratégique dès lors que le problème est un problème d’organisation générale à long terme et que le but des études sur ce genre de problème est de dimensionner au mieux les ressources dans les différents services de l’hôpital. ② Le problème peut également être abordé au niveau tactique, généralement lors de la planification à moyen terme, ce qui permet d’allouer au mieux les ressources aux différents patients en prenant en compte les aléas prévisionnels. ③ Enfin l’approche opérationnelle dans le cas des problèmes de décision à court terme ou en temps réel, dans le but de gérer au mieux les aléas dans les plannings déjà établis [[Vissers et al., 2007](#)].

Parmi les problèmes considérés comme problème à long terme, on peut citer le problème d’ouverture de service, d’ajustement et de redistribution de lits ou encore l’étude des performances d’un hôpital. Pour résoudre ces problèmes, différentes méthodes de la recherche opérationnelle ont été utilisées par les chercheurs : la simulation [[Ramis et al., 2001](#), [Harper et al., 2002](#)], la programmation stochastique [[Utley et al., 2003](#)], les files d’attente [[Huang, 1998](#)], le modèle markovien [[Akkerman and Knip, 2004](#)] et les méthodes heuristiques [[Akcali et al., 2006](#)].

Pour les problèmes à moyen terme, nous avons la planification des rendez-vous, l’estimation des besoins futurs en ressources ou encore la planification des admissions. La plupart des méthodes utilisées sont soit des heuristiques, soit de la programmation stochastique ou bien elles sont basées sur des modèles de simulation. Nous citons quelques articles traitant de ces problèmes : [[Cayirli et al., 2006](#), [Littig and Isken, 2007](#), [Jebali, 2004](#)].

Les problèmes du pilotage des services d’urgences, d’insertion de patients

---

1. Le processus d’analyse hiérarchique (AHP) est une méthode d’aide à la décision multi-critères (multi-criteria decision making, MCDM) qui aide le décideur à faire face à un problème complexe. L’AHP est basée sur quatre étapes : la modélisation du problème, l’évaluation des poids, l’agrégation des poids et l’analyse de sensibilité. [[Ishizaka and Labib, 2009](#)]

dans un planning ou encore l'affectation des patients sont des problèmes de planification à court terme et la plupart des méthodes utilisées sont de type système multi-agent [Daknou et al., 2010], programmation linéaire [Ben Bachouch et al., 2007] ou encore heuristique [Demeester et al., 2010].

### 1.3 L'hospitalisation à domicile

Durant ces dernières années le nombre de lits dans les établissements hospitaliers et les cliniques privées n'a fait que diminuer entraînant la naissance de nouveaux besoins et de nouvelles demandes des patients. Plusieurs facteurs ont contribué à l'apparition et au développement de l'hospitalisation à domicile :

- Une espérance de vie qui augmente de plus en plus avec une durée de vie moyenne dépassant actuellement 80 ans,
- Le vieillissement de la population engendrant une augmentation du nombre de personnes atteintes de maladies chroniques dégénératives donnant lieu à des incapacités fonctionnelles et à des handicaps,
- Des patients souhaitant une prise en charge qui les soustrait le moins possible à leur environnement familial pour des raisons de confort personnel.

Par ailleurs, la situation du système de santé a nécessité la recherche de moyens de régulation pour répondre aux problèmes économiques et organisationnels qu'il subit. L'hospitalisation à domicile est apparue comme un levier potentiel permettant de réduire les dépenses du domaine de la santé tout en maintenant un niveau de qualité de service satisfaisant.

Les besoins traités en HAD sont ceux qui ne nécessitent pas des soins qui mobilisent un plateau technique de haut niveau et dont une prise en charge lourde à l'hôpital n'est pas nécessaire.

La circulaire N° DH/EO2/2000/295 du 30 mai 2000 relative à l'hospitalisation à domicile affirme que : « *L'HAD concerne les malades, quel que soit leur âge, atteints de pathologies graves aiguës ou chroniques, évolutives et/ou instables qui, en l'absence d'un tel service, seraient hospitalisés en établissement de santé.* ». Puis, la circulaire N° DHOS/O/2004/44 du 4 février 2004 relative à l'hospitalisation à domicile précise que l'HAD « *est chargée d'assurer au domicile du malade, pour une période limitée mais révisable en fonction de l'évolution de son état de santé, des soins médicaux et paramédicaux continus et nécessairement coordonnés. Ces soins se différencient de ceux habituellement dispensés à domicile par la complexité et la fréquence des actes.* ».



FIGURE 1.1 – Hospitalisation à domicile

Ainsi l'hospitalisation à domicile est donc une structure hospitalière spécifique. Elle est adaptée à la prise en charge des patients dont le profil ne correspond plus à celui des patients requérant une hospitalisation conventionnelle de très courte durée, tels que les patients atteints de maladies chroniques ou encore la vieillesse. Ce paradoxe trouve ses origines, mais aussi ses résolutions, dans l'évolution historique et réglementaire de l'HAD.

### 1.3.1 Organisation au sein de l'HAD

L'HAD prend en charge des soins pluridisciplinaires, et fait intervenir plusieurs professionnels, relevant de spécialités ou de disciplines différentes (médicaux, paramédicaux), comme par exemple des infirmiers, des cardiologues, des cancérologues, des puéricultrices, des masseurs kinésithérapeutes, ou encore des spécialistes de la gériatrie. Ces intervenants sont soit des professionnels de l'HAD (salariés), soit des professionnels de santé libéraux. La collaboration de ces derniers avec les structures d'HAD doit être formalisée dans un contrat dans lequel ils s'engagent à respecter les pratiques de l'HAD. Pour plus de détails voir la circulaire N° DH/EO2/2000/295 du 30 mai 2000 relative à l'hospitalisation à domicile.

Le médecin coordinateur est le praticien salarié relevant de l'hospitalisation à domicile. Il est le référent médical de la structure. Il fournit un avis médical pour toute admission et sortie de l'HAD, il est responsable de l'évaluation et de la prise en charge du patient. Selon l'article D 6124-308 du code de

santé publique : « Dans tous les cas, le médecin coordinateur organise le fonctionnement médical. Il veille notamment à l'adéquation et à la permanence des prestations fournies aux besoins des patients et à la bonne transmission des dossiers médicaux et des soins nécessaires à la continuité des soins »

Le médecin traitant est le praticien exerçant à titre libéral. Il est choisi librement par le malade. L'admission du patient en HAD ne peut se réaliser qu'avec son accord. Il est responsable du suivi du malade.

Les infirmiers assurent le suivi des patients et le relais avec les médecins hospitaliers ou traitants.

Généralement, les soins pris en charge en HAD sont classés en 3 catégories : des soins ponctuels, pour les maladies non stabilisées (exemple : chimiothérapie ou antibiothérapie), des soins de réadaptation au domicile, notamment après la phase aiguë d'une maladie neurologique ou cardiaque. Enfin des soins continus (cancer, maladie cardiaque ou pulmonaire).

En HAD, il existe 24 modes de prise en charge. Les pathologies cancéreuses (tumeurs des bronches, tumeurs du sein et tumeurs du colon) représentent à elles seules 33% des journées en 2008. Les soins majoritairement pris en charge en HAD sont des soins palliatifs, de cancérologie et de périnatalité. Les autres modes de prise en charge représentent un faible pourcentage des soins : les pansements complexes et les soins spécifiques (9.94% des séjours), les traitements intraveineux (9%), l'assistance respiratoire (7.16%), les traitements de rééducation, de réadaptation du patient et de son entourage (4.44%). [Ben Bachouch, 2010]

Nous trouvons dans [Chahed Jebalia, 2008] une analyse complète de l'organisation et du fonctionnement des structures d'hospitalisation à domicile.

### 1.3.2 Historique

A la fin des années 20, à Paris, la première proposition d'un système de soins à domicile a été formulée par des infirmiers spécialisés dans le cadre de l'assistance publique. Ces derniers ont proposé l'HAD en réponse à un problème d'engorgement des hôpitaux lié à un manque de lits hospitaliers, à un problème de locaux inadaptés, mais aussi à l'apparition de matériels de plus en plus performants. Cette proposition était accompagnée d'une idée de formation des familles des malades, cependant, elle fut sans suite [Callanquin et al., 2001]. En 1945, le professeur Bluestone, chef de service à l'hôpital Montefiore de New York, s'est chargé de suivre certains de ses malades à leurs domiciles par faute de lits dans l'hôpital où il exerçait. C'est ainsi qu'en 1947, fut créé le «Home Care» aux Etats-Unis, forme d'hospitalisation à domicile associant les avantages matériels, psychologiques et sociaux du cadre familial aux ressources de la médecine.

En France, la réflexion autour de la possibilité de soigner les patients à domicile, débute dans les années 50. C'est en 1957 qu'est créé le premier établissement d'hospitalisation à domicile au sein de l'Assistance Publique des Hôpitaux de Paris. Plus tard en 1970, la loi Hospitalière du 30 décembre reconnaît légalement l'HAD. En 1974 l'assurance maladie en fixe les règles de fonctionnement. En février 2004, la Direction de l'Hospitalisation et de l'Organisation des soins définit les modalités de prise en charge en HAD. Enfin en juillet 2009, l'HAD est reconnue comme une hospitalisation à part entière [Boucher, 2011].

Le développement de ces structures s'accélère, appuyé par la volonté politique et la volonté de la population, le souhait de mourir à domicile est exprimé par 80 % des français, et l'hospitalisation à domicile est un bon moyen pour répondre à leur demande, voir [Chahed Jebalia, 2008, Sentilhes Monkam, 2005].

### 1.3.3 Quelques chiffres

L'HAD a connu un essor considérable au cours des années 2000, avec une accélération depuis 2005. La France comptait à peine soixante établissements autorisés à la fin des années 90, en 2005 ce chiffre a atteint les 123 établissements et 317 en 2012 soit presque trois fois plus qu'en 2005. Le nombre de patients s'est vu passer de 35017 en 2005 pour atteindre les 104960 patients en 2012. La figure 1.2 est tirée du rapport d'activité de la La Fédération Nationale des Établissements d'Hospitalisation À Domicile (FENHAD) 2012-2013 [FNEHAD, 2012]. Elle illustre les évolutions du nombre de journées de prise en charge en HAD en France.

Cependant la plupart des établissements de l'HAD sont de faible capacité, et le volume d'activité de ces établissements n'est pas uniforme. L'évolution du taux de couverture de l'HAD par région est présentée dans la figure 1.3. Les deux plus grands établissements sont situés en Ile-de-France : il s'agit de Santé Service de Puteaux avec 1200 places et de l'HAD de l'Assistance Publique - Hôpitaux de Paris (AP-HP) avec 820 places [Durand et al., 2010].

Exemple de l'HAD de la région parisienne (AP-HP)

- 1000 malades/jour
- 610 professionnels HAD (de différentes disciplines et de spécialités).
- 250 véhicules (+1 million de kms/an)
- Professionnels libéraux partenaires de l'HAD :
  - Médecins de ville : 2000
  - Infirmiers : 500
  - Kinésithérapeutes : 650
  - Sages-femmes : 70

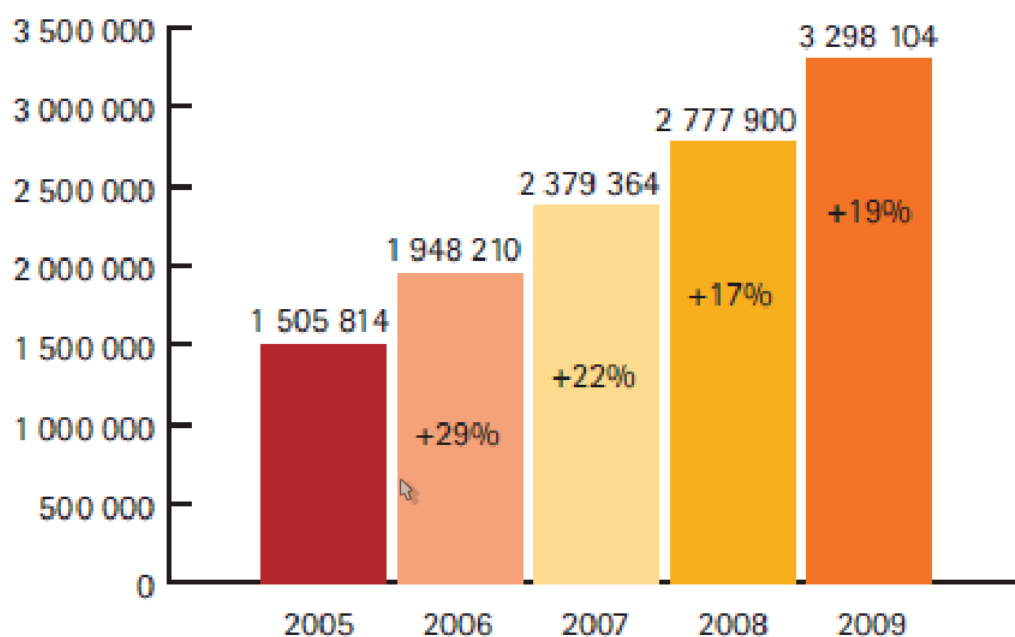


FIGURE 1.2 – Progression de prise en charge en HAD depuis 2005 (journées de prise en charge)

L'âge des patients varie selon le mode d'admission en HAD, il atteint les 72 ans pour les rééducations orthopédiques et 70 ans pour les soins palliatifs qui constituent les premiers soins en HAD. Les soins de prise en charge curative du cancer touchent une population qui est plus jeune, dont l'âge moyen des patients varie autour de 65 ans.

## 1.4 Objet et plan de thèse

Dans ce travail de recherche, nous nous intéressons aux établissements d'hospitalisation à domicile (HAD), notamment à l'augmentation de cette pratique durant ces dernières années et aussi aux différentes problématiques existantes dans ces établissements qui peuvent être résolues par le biais de la Recherche Opérationnelle. Parmi ces problématiques, on distingue le problème consistant à déterminer des tournées des personnels pour effectuer les visites aux domiciles des patients. Nous nous intéressons également à la planification des personnels sur un horizon de temps donné. Les principales questions posées pour ce problème concernent le nombre de personnels nécessaires pour répondre au mieux à la demande, l'affectation des visites pour les personnels



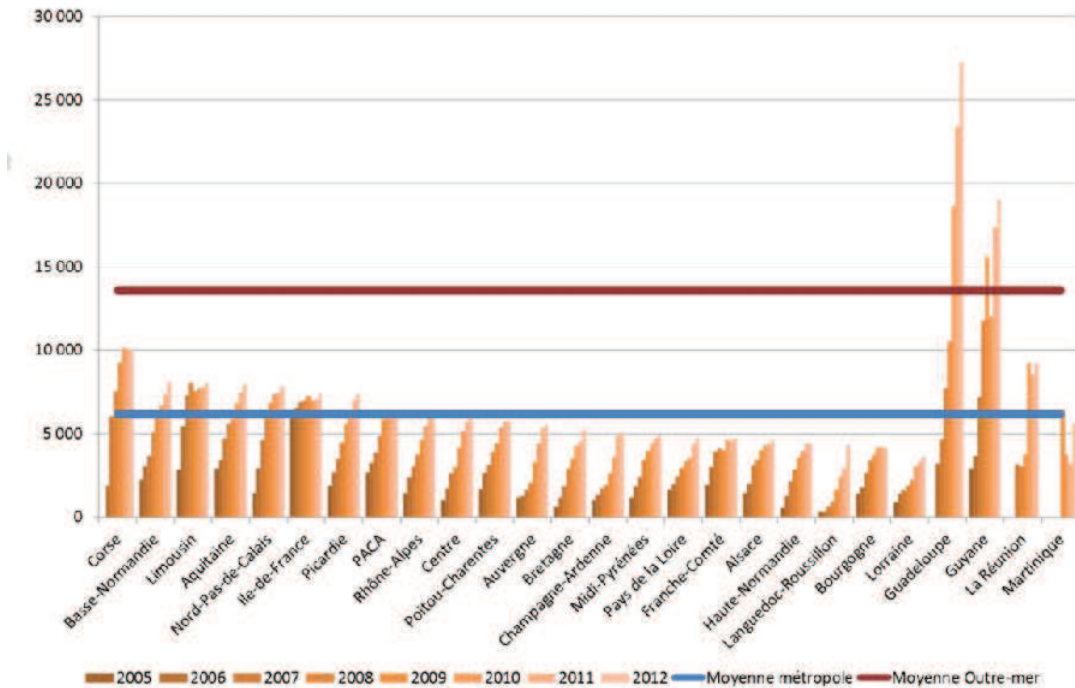


FIGURE 1.3 – Evolution du taux de couverture de l’HAD par région depuis 2005 (en nombre de journées pour 100 000 habitants). source : [FNEHAD, 2012]

et notamment le problème de routage.

Cette thèse s’articule donc autour du problème de la planification et du routage dans le domaine de l’hospitalisation à domicile. Afin de présenter nos travaux de recherche, ce rapport sera composé des chapitres suivants :

- Le *Chapitre 2* commence par introduire une présentation générale du contexte, puis une revue de la littérature composée de quatre sections. La première présente les principaux travaux effectués pour le problème de planification dans différents domaines. La seconde expose le problème de tournées de véhicules et les principaux travaux effectués autour de ce dernier. La section suivante fournit les principales études autour du problème faisant l’objet de cette thèse qui est le problème de planification et de routage dans l’hospitalisation à domicile. Enfin dans la dernière section, nous présentons les différents problèmes similaires au problème étudié et une étude comparative sera également exposée.
- Le *Chapitre 3* fixe d’abord les contraintes et les objectifs du problème, puis expose une modélisation du problème sous forme d’un Programme Linéaire en Nombres Entiers (PLNE). Ce dernier constitue une première



approche du problème, qui permet entre autre d'identifier les principales difficultés du problème. Nous présentons dans une première section les notations et la modélisation du problème. Puis nous proposons un PLNE. Enfin, nous présentons les résultats des tests effectués sur ce dernier.

- Le *Chapitre 4* est consacré à l'étude du problème sur une journée de planification, il décrit notamment notre méthode de résolution heuristique. Cette dernière combine un algorithme glouton, la programmation dynamique et la programmation mathématique. La méthode développée sera testée sur les instances définies dans le *chapitre 3*, et une comparaison des résultats avec ceux obtenus avec le PLNE sera présentée.
- Le *Chapitre 5* est consacré à l'étude du problème sur un horizon plus étendu, ce qui complique davantage le problème et nous a conduit à considérer plus de contraintes que celles définies pour la planification d'une journée. Pour résoudre ce problème, nous présentons une heuristique basée sur la méthode définie pour une journée de planification. Afin d'évaluer cette méthode, nous effectuerons des tests sur des instances du problème considéré.
- Le *Chapitre 6* est une introduction à l'une de nos perspectives. Cette dernière concerne l'étude du problème de réoptimisation du routage et de la planification des personnels pour l'hospitalisation à domicile. Dans un premier temps, nous avons défini le problème, puis, introduit la notion de distance entre deux solutions. Enfin, nous avons présenté quelques idées d'adaptation de nos méthodes pour le cas de la réoptimisation.
- Enfin la dernière partie est consacrée à la conclusion et à la discussion de plusieurs directions de recherche prolongeant ce travail de thèse.



# Problème de routage et de planification des personnels pour l'hospitalisation à domicile

---

## 2.1 Contexte

En réponse aux contraintes économiques, au problème du vieillissement de la population et aussi à la volonté des patients de se faire soigner dans le milieu familial, le secteur de la santé se préoccupe davantage de l'innovation et de la réorganisation des établissements de santé. Dans ce travail de recherche, nous nous intéressons aux établissements d'hospitalisation à domicile (HAD), notamment à l'augmentation de cette pratique durant ces dernières années ainsi qu'aux différentes problématiques qui y existent, dont la résolution peut se faire par le biais de la recherche opérationnelle. Parmi ces problématiques, on distingue le problème de détermination des tournées des personnels pour effectuer les visites aux domiciles des patients, ainsi que celui de la planification des personnels sur un horizon de temps donné.

L'HAD dispose d'un nombre de personnels de différentes spécialités et disciplines, une partie de ces personnels est chargée d'intervenir aux domiciles des patients qui quant à eux expriment plusieurs besoins en soins. Afin de satisfaire les besoins des patients, une affectation des personnels qualifiés pour effectuer les soins demandés est nécessaire. Par ailleurs, dans le domaine hospitalier, un grand intérêt est porté au confort des patients, aux besoins matériels et sans oublier les besoins émotionnels, comme par exemple garder le même intervenant chez un même patient ou encore avoir une liste d'intervenants préférés par patient. Le moment d'intervention chez les patients, est également un critère très important, car il est déterminé par les professionnels. Ce moment est généralement décrit par une date au plus tôt et une date au plus tard pour effectuer le soin. Selon le soin, ces dates peuvent ou non être violées par les intervenants, par exemple, il existe des traitements qu'il faut absolument donner aux patients à des heures précises dans la journée et ces heures doivent être respectées pour toute la durée du traitement. D'autres sont plus souples. Quand une structure d'HAD fait intervenir un personnel dans une

journee donnée, elle souhaite le faire intervenir chez un maximum de patients possibles, tant que les horaires réglementaires ne sont pas dépassés, ainsi elle évite de faire travailler plusieurs personnels dans une même journée ou de faire travailler un personnel pour une seule visite dans une journée. Les disponibilités des personnels représentent également des contraintes difficiles que la structure hospitalière doit prendre en considération, car les intervenants ne sont pas toujours disponibles pour l'HAD (fonctions libérales). À partir de ces besoins nous pouvons voir qu'un problème de tournées s'impose, ces tournées seront formées par les patients, et seront effectuées par les personnels.

Dans le domaine hospitalier en général, les personnels doivent respecter des tranches horaires de travail, qui sont dans la plupart des structures : matin, après-midi et nuit. Le problème de planification impose donc le confort des patients, le respect des tranches horaires par les personnels, les jours de repos .... Outre les problèmes de logistique, les problèmes économiques sont également au rendez-vous dans l'HAD, les structures hospitalières souhaitent dépenser moins tout en gardant une bonne qualité de service. Parmi les moyens de faire des économies, nous pouvons citer deux moyens pertinents : économiser sur le coût des trajets parcourus par les personnels lors des visites qu'ils effectuent, ou faire travailler le moins de personnels possibles.

Notre travail consiste à combiner le problème de routage des personnels et le problème de planification, il s'intitulera «Routage et Planification des personnels pour l'Hospitalisation À Domicile, RP-HAD». Notre objectif est donc d'élaborer un planning et des tournées pour le personnel de santé tout en optimisant les coûts. Le défi est de combiner deux problèmes qui sont connus pour être NP-difficiles [Lenstra and Kan, 1981, Brucker et al., 2011].

## 2.2 État de l'art

La gestion de ressources en HAD nécessite l'affectation et la planification des ressources humaines et matérielles afin d'effectuer des services de soins à un nombre élevé de patients vivant dans différentes zones géographiques. De plus, la quantité de services requise par chaque patient est intrinsèquement aléatoire, rendant ainsi le problème de planification plus complexe [De Angelis, 1998, Ettore and Matta, 2010]. Enfin, l'existence de certaines contraintes, telles que la continuité des soins [Haggerty et al., 2003] rend le problème de planification en HAD particulier et différent des problèmes de planification dans les autres domaines. Les principales questions posées pour ce problème sont le nombre de personnels nécessaires pour répondre au mieux à la demande, l'affectation des visites pour les personnels et notamment le problème de routage.

Dans notre analyse de la littérature, nous nous intéressons dans un premier temps aux problèmes de planification des personnels, suivi du problème de tournées de véhicules, ensuite nous donnerons les principales études autour du problème de planification et de routage dans l'HAD. Enfin on finira par présenter les différents problèmes similaires au problème étudié.

### 2.2.1 Problème de planification

La planification des personnels (*staff scheduling*), peut se faire manuellement, et un planning s'obtient généralement facilement, mais un bon planning est moins facile à obtenir. En effet, le coût d'un planning ne se résume pas à la somme des coûts horaires de travail. S'agissant des personnes, le coût a des dimensions plus complexes. Le chef d'entreprise veut utiliser ses ressources au bon moment pour satisfaire la demande et à moindre coût (moins d'heures supplémentaires, engager le moins de personnes possibles). L'employé a quant à lui des contraintes de préférences ou de disponibilité et enfin les clients demandent une satisfaction de service. Donc, un bon planning doit prendre en considération toutes ces exigences ; c'est pourquoi les planificateurs essayent de trouver un bon compromis entre ces trois critères (voir la figure 3.3). Le problème étant difficile à résoudre, les spécialistes en optimisation s'y sont intéressés et leurs objectifs sont construits de manière à minimiser le coût (salaires, heures supplémentaires, etc.), maximiser la qualité du service (couverture de la charge) ou bien maximiser la satisfaction des employés (minimisation des contraintes souples violées, maximisation de l'équité entre les individus). Plusieurs méthodes de résolution ont été développées [Blöchliger, 2004].

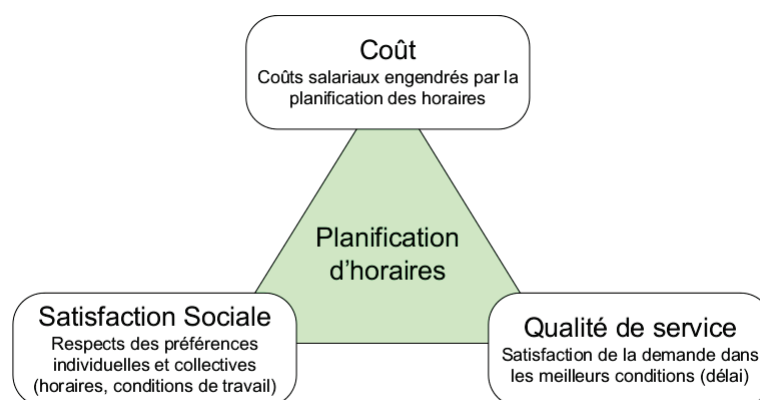


FIGURE 2.1 – Critères de mesure d'un bon planning [Partouche, 1998]

L'origine du problème de planification remonte au travaux d'Edie sur le

problème de trafic au péage [Edie, 1954]. Depuis, les méthodes de planification sont appliquées dans différents systèmes de transport : les compagnies aériennes et les chemins de fer, le domaine de la santé, les services d'urgence tels que la police, les ambulances et les pompiers, les centres d'appels, et de nombreux autres organismes de services tels que les hôtels. Pour une revue détaillée de ces applications, on peut se référer à [Aggarwal, 1982], où l'auteur résume les objectifs, les contraintes ainsi que les méthodes pour chaque application.

Le problème de planification se subdivise en trois sous-problèmes : planification des vacances (Shift Scheduling), planification des jours de repos (Day-off Scheduling) et affectation des employés aux différentes tâches (Task Assignment ou Scheduling). Dans la classification proposée par Tien et Kamiyama ([Tien and Kamiyama, 1982]), le problème de planification est précédé de deux étapes, qui traitent des problèmes à plus long terme : la prévision de la demande par période (Demand Modelling) et la prévision des effectifs nécessaires par vacation (Staffing Problem) [Trilling et al., 2007].

Dans certaines applications le planning doit être cyclique (périodique) ou doit changer d'une période à l'autre (non cyclique) ; un nouveau planning est alors généré pour chaque période de planification. Le temps passé à l'élaboration du planning est important, mais il présente l'avantage d'être relativement flexible [Valouxis and Housos, 2000]. Dans ce travail de recherche, nous allons considérer un problème de planification non cyclique, car dans l'hospitalisation en général, les plannings doivent changer d'une semaine à l'autre en raison des disponibilités des personnels, des demandes de soins qui varient,....

Les problèmes de planification peuvent également différer par rapport à la définition des tranches horaires (shifts), les exigences des services (avec ou sans qualifications, avec ou sans fenêtres de temps), tous ces éléments peuvent faire que le planning est en partie déterminé à l'avance [Beasley and Cao, 1996].

Les méthodes d'optimisation pour les problèmes de planification sont largement utilisées et décrites dans la littérature, en particulier en ce qui concerne l'affectation des personnels dans le domaine aéronautique (voir [Baker and Fisher, 1981, Desaulniers et al., 1998]) où l'amélioration des plannings est très impressionnante. L'approche la plus utilisée est la technique de décomposition. Dans cette décomposition, l'ensemble du problème est résolu en trois étapes ; dans un premier temps des équipages sont générés, suivi de l'optimisation de ces derniers et enfin la planification est établie. La génération des équipages est un processus qui permet de générer un grand nombre d'équipages réalisables. Quelques uns de ces derniers sont sélectionnés dans un premier temps pour couvrir tous les vols avec un coût minimum. Puis dans la dernière phase, les équipages sélectionnés sont ordonnés dans un planning pour chacun des personnels qui les composent. Plusieurs articles traitent les pro-

blèmes de génération, d'optimisation et enfin de planification d'équipages (voir [Anbil et al., 1991, Hoffman and Padberg, 1993, Rushmeier et al., 1995]).

Les problèmes de planification étudiés dans les chemins de fers, sont souvent appliqués à des cas réels. Parmi les différents travaux qui existent, nous pouvons citer [Caprara et al., 1999] qui traitent le problème de planification pour une compagnie ferroviaire italienne, dans lequel la méthode des trois phases (technique de décomposition) est utilisée.

**La planification dans le domaine de la santé :** Habituellement, les problèmes de planification dans le domaine de la santé sont des problèmes contenant beaucoup de contraintes et ceci est dû au fait que le planning doit respecter plusieurs exigences liées au système de santé. Chaque soin demandé par les patients doit être effectué par un personnel qualifié tout en gardant la régularité du travail. L'intervention des personnels engendre également plusieurs contraintes, comme par exemple la distribution équitable des équipes de nuit et du week-end ou bien la distribution des heures de travail pour les personnels permanents et non permanents. Dans les années 70 et 80, plusieurs formulations du problème et techniques de résolution ont été définies. Le but de la plupart de ces études est de fournir des outils qui réduisent le besoin de créer des plannings manuellement. Certaines études abordent le problème de la détermination des qualifications des personnels en se basant sur les besoins des patients [Maier Rothe and Wolfe, 1973, Ryan et al., 1975]. D'autres ont utilisé la programmation mathématique [Warner and Prawda, 1972, Warner, 1976], les techniques de branch-and-bound [Trivedi and Warner, 1976] ou encore des algorithmes itératifs [L.Smith, 1976]. La planification des personnels hospitaliers est un problème particulièrement difficile en raison de différents besoins en personnel à des jours différents et à des équipes différentes. Contrairement à la plupart des autres établissements, les institutions de soins de santé travaillent jour et nuit.

Dans les années 90 des classifications de ces problèmes ont été effectuées par plusieurs auteurs [Sitompul and Randhawa, 1989, Bradley and Martin, 1991, Siferd and Benton, 1992]. Il existe plusieurs revues où les principaux travaux établis sur le problème de planification des personnels ont été résumés ; nous présentons ci-dessous quelques articles de référence :

- [Sitompul and Randhawa, 1989] distinguent les méthodes exactes et les méthodes heuristiques. Ils remarquent que la plupart des techniques exactes sont appliquées à des versions simplifiées du problème, tandis que lorsque le problème considéré est plus complexe les auteurs appliquent des heuristiques et acceptent une solution qui n'est pas optimale. Les méthodes heuristiques sont souvent appliquées pour générer des plan-

- nings cycliques dans la plupart des cas.
- [Hung, 1995] a collecté 128 articles traitant le problème de la planification des infirmières allant des années 60 jusqu'en 1994. La plupart des articles étudient les nouveaux mécanismes de semaines de travail.
  - [Cheang et al., 2003] présentent des modèles et des approches les plus récentes pour le problème de planification des infirmières. D'après les auteurs, l'article ne vise pas à avoir une étude critique sur les articles mais, son objectif est de fournir un aperçu des différents travaux dans ce domaine. Ils ont accentué leur recherche sur les méthodes de programmation mathématique, différentes techniques de la programmation par contraintes et les métaheuristiques.
  - [Ernst et al., 2004] donnent un aperçu très complet de la littérature sur la planification des personnels, ils ne se concentrent pas sur la planification des infirmières mais sur les personnels en général. L'article contient trois parties principales : (1) Les définitions et la classification des problèmes de planification des personnels, (2) la classification de la littérature par rapport aux domaines d'application et (3) les méthodes de résolution.
  - [Burke et al., 2004] où les auteurs s'intéressent au problème de planification des personnels dans le domaine de la santé, le principal point de cet article est que les auteurs portent une analyse critique sur les approches adoptées dans la littérature pour résoudre ce problème.

Parmi les articles résumés dans les revues que nous venons de présenter, nous pouvons citer quelques travaux plus récents.

Un algorithme hybride est utilisé dans [Burke et al., 1999]. L'algorithme incorpore une variété de procédures tabou et hybrides dans un algorithme génétique.

[Dowland et al., 2000] génèrent des plannings hebdomadaires satisfaisant les tranches horaires, les exigences de coûts, les qualifications des personnels et les contraintes de préférences des personnels. Les auteurs combinent la programmation en nombres entiers et la recherche tabou.

[Bard and Purnomo, 2005] présentent un problème de planification des infirmières d'un hôpital sur un horizon allant de 4 à 6 semaines, des préférences sur les jours de travail des infirmières sont considérées. Le problème est résolu avec une approche par génération de colonnes qui combine un modèle de programmation en nombres entiers qui a comme colonnes des plannings pour les infirmières sur tout l'horizon, et une heuristique à double échange (double swapping) qui génère les colonnes. Les auteurs se sont ensuite intéressés au problème de planification cyclique. Dans [Bard and Purnomo, 2007], le problème est formulé comme un programme en nombres entiers, qui est décomposé en utilisant la relaxation lagrangienne. Deux approches sont explorées : l'une



relaxe les contraintes de préférences et l'autre relaxe les contraintes sur la demande.

La littérature est très vaste en ce qui concerne le problème de planification en général et dans le domaine de santé en particulier. Nous nous sommes contentés de citer quelques uns de ces travaux.

### 2.2.2 Problème de tournées de véhicules

Le deuxième point de notre problématique est le routage des personnels, qui est assimilé au problème de tournées de véhicules, mais avant de présenter ce dernier, nous parlerons d'un cas particulier de ce problème qui est le problème du voyageur de commerce qui a été abordé dans la littérature avant le problème de tournées de véhicules.

**Problème du voyageur de commerce :** Le problème du voyageur de commerce (Travelling Salesman Problem, TSP) consiste à trouver un cycle passant par tous les clients en minimisant le coût total du parcours. Parmi les nombreuses formulations proposées dans la littérature, l'une des plus utilisées est celle de [Dantzig et al., 1954]. Le TSP a beaucoup été étudié dans la littérature (cf. le livre de [Punnen, 2007]), une étude de [Bektas, 2006] expose différentes extensions de ce problème (fenêtres de temps, nombre non fixé de voyageurs, nombre maximal ou minimal de sommets à visiter, etc.), ses applications pratiques (ordonnancement d'impression de presses, itinéraires de bus, etc.), différentes formulations (programmation linéaire), et des heuristiques ou méthodes exactes pour la résolution. [Garey and Johnson, 1979] ont montré que le TSP est NP-difficile. Comme récapitulatif des méthodes utilisées pour résoudre le TSP nous citons le livre de [Applegate, 2006].

**Problème de tournées de véhicules :** Le problème de tournées de véhicules (Vehicle Routing Problem, VRP) dont une première formulation est donnée par [Dantzig and Ramser, 1959], est une généralisation du TSP obtenue en considérant une flotte de véhicules de capacité finie, basée dans un dépôt, qui doit assurer des tournées entre plusieurs clients (ou villes), chacun étant caractérisé par une quantité de produit demandée. L'ensemble des clients visités par un véhicule forme une tournée. Chaque client doit être desservi par un et un seul véhicule et chaque véhicule doit commencer sa tournée en partant du dépôt et la finir en rejoignant ce dernier. Ainsi l'objectif de ce problème est de construire des tournées de véhicules tout en respectant les capacités des véhicules et les tournées doivent satisfaire toutes les demandes et ceci en minimisant le coût total des trajets parcourus ou en minimisant le nombre de véhicules utilisés.

La formulation du VRP a été étendue pour modéliser plusieurs situations dans la pratique. Parmi les extensions, les plus courantes sont celles qui comportent des contraintes de fenêtres de temps (voir par exemple [Cordeau et al., 2002]), la visite de chaque client se fait dans un intervalle de temps donné ; les contraintes de ramassage et de livraison (voir par exemple [Savelsbergh and Sol, 1995]) qui exigent qu'une marchandise soit ramassée chez certains clients avant d'être livrée à d'autres ; les contraintes de distance qui limitent la distance totale parcourue par un véhicule ; les contraintes d'accessibilité qui limitent l'ensemble des véhicules autorisés à visiter un client donné ; et la possibilité de fractionner les livraisons des clients (voir par exemple [Archetti et al., 2006]). D'autre part, pour toutes les extensions de la description originale du problème, il existe une variante commune qui comprend plusieurs dépôts (voir par exemple [Cordeau et al., 1997]), à partir desquels les véhicules peuvent commencer et finir leurs tournées.

Le VRP et ses différentes variantes font partie de la classe des problèmes NP-difficiles [Garey and Johnson, 1979]. De nombreux chercheurs ont étudié ce problème ainsi que ses nombreuses variantes. Pour une revue détaillée de ces variantes, on pourra se référer à [Bodin and Golden, 1981], [Rego and Roucairol, 1994] et [Baldacci et al., 2008a].

Parallèlement aux multiples variantes du VRP, plusieurs approches sont proposées pour le résoudre. Les auteurs de [Laporte, 1992, Toth and Vigo, 2002, Laporte, 2007, Baldacci et al., 2007, Laporte, 2009, Baldacci et al., 2012] donnent un récapitulatif des méthodes utilisées pour résoudre le VRP et ses variantes. Parmi ces dernières, une méthode heuristique efficace est l'algorithme de [Prins, 2004], cet algorithme résulte d'une hybridation d'une recherche locale dans un algorithme génétique. Des algorithmes de recherche tabou ont également été utilisés avec succès (voir [Toth and Vigo, 2003, Prins et al., 2007]), ou encore un récent algorithme basé sur la procédure *split* [Duhamel et al., 2012]. En ce qui concerne les méthodes exactes récentes, le premier algorithme basé sur un *Branch-and-Cut* est due à [Augerat et al., 1995], puis une amélioration de cette méthode est présentée dans [Naddef and Rinaldi, 2002], Nous citons également [Ralphs et al., 2003, Lysgaard et al., 2004, Baldacci et al., 2004, Letchford et al., 2007] qui ont établi des algorithmes de *Branch-and-Cut*. Comme l'ont mentionné les auteurs de [Baldacci et al., 2012], les meilleures méthodes exactes récemment présentées sont basées sur le partitionnement d'ensembles (*set-partitionning*) [Fukasawa et al., 2006, Baldacci et al., 2008b].

Les approches exactes les plus récentes pour le VRP sont basées sur trois formulations : les flux de véhicules, les flux de marchandises et le partitionnement d'ensembles. Les formulations basées sur les flux de vé-

hicules [Lysgaard et al., 2004, Naddef and Rinaldi, 2002] définissent une variable entière pour chaque arc qui calcule le nombre de fois qu'un véhicule passe par ce dernier. Les formulations basées sur les flux de marchandises [Baldacci et al., 2004] sont basées sur des variables continues définies pour chaque arc, ces dernières modélisent le flux de marchandises passant entre les deux sommets de cet arc. Enfin, les formulations basées sur le partitionnement d'ensembles [Feillet et al., 2004, Feillet et al., 2005, Fukasawa et al., 2006, Rousseau et al., 2007, Baldacci et al., 2008b, Baldacci et al., 2010, Feillet, 2010], considèrent l'ensemble de toutes les tournées réalisables et sélectionnent un sous ensemble de tournées de coûts minimum de telle sorte que toutes les contraintes soient satisfaites. Comme il est souvent impossible d'énumérer l'ensemble des solutions réalisables, ces approches reposent généralement sur un système de génération de colonnes qui génère itérativement les tournées possibles (i.e., les variables du problème).

Le problème que nous traitons se rapproche le plus d'une des variantes du VRP, appelée problème de tournées de véhicules avec fenêtres de temps (Vehicle Routing Problem With Time Windows, VRPTW). Les clients doivent être servis entre deux dates : au plus-tôt et au plus-tard que l'on appelle fenêtres de temps, ces contraintes peuvent être dures ou souples. Dans le cas de contraintes dures, une arrivée avant la fenêtre de temps impose une attente, et les retards sont interdits [Solomon and Desrosiers, 1988]; alors que les contraintes souples peuvent être violées et induisent alors des pénalités [Kallehauge et al., 2005]. La littérature sur le VRPTW est vaste, des états de l'art sont proposés dans [Solomon and Desrosiers, 1988, Desrosiers et al., 1995, Cordeau et al., 2002, Bräysy and Gendreau, 2005a, Bräysy and Gendreau, 2005b]. [Kallehauge, 2008, Baldacci et al., 2012] ont résumé les méthodes exactes connues dans la littérature et parmi les articles qu'ils ont présentés nous citons les plus récents : [Feillet et al., 2004, Danna and Le Pape, 2005, Lysgaard, 2006, Irnich and Villeneuve, 2006, Chabrier, 2006, Righini and Salani, 2006, Jepsen et al., 2008]. Plusieurs approches heuristiques et métaheuristiques connues pour leur efficacité ont été proposées ces dernières années [Potvin and Rousseau, 1993, Rochat and Taillard, 1995, Chiang and Russell, 1997, Schulze and Fahle, 1999, Gehring and Homberger, 2001].

En plus des fenêtres de temps sur les clients, plusieurs chercheurs considèrent plusieurs autres contraintes supplémentaires au VRPTW. Les dépôts peuvent être multiples, en effet par exemple, dans l'hospitalisation à domicile certains auteurs considèrent que les personnels peuvent commencer leur travail à partir de leur domicile. Le nombre de véhicules est également limité. Nous pouvons citer [Cordeau et al., 2001] qui traite le problème de tournées de vé-

hicules avec fenêtres de temps et dépôts multiples (Multi-Depot Vehicle Routing Problem With Time Windows, MDVRPTW), ou encore [Lau et al., 2003] pour le problème de tournées de véhicules avec fenêtres de temps avec un nombre limité de véhicules (Vehicle routing problem with time windows and a limited number of vehicles, m-VRPTW).

Malgré une littérature importante sur le VRP et ces différentes variantes, il n'existe pas à notre connaissance une variante en particulier qui puisse correspondre à la partie routage du RP-HAD. En effet, en plus des fenêtres de temps, les dépôts sont multiples, les véhicules sont en nombre limité et hétérogènes. En effet, la notion d'hétérogénéité exprime le fait que les patients ne peuvent pas être visités par n'importe quel des véhicules (personnels).

### 2.2.3 Problème de routage et de planification pour l'hospitalisation à domicile

Ces dernières années, le problème de RP-HAD a été largement étudié et par de nombreux chercheurs, que ce soit dans un contexte appliqué à une structure hospitalière spécifique ou de manière plus générique, c'est pourquoi la définition de ce problème diffère d'un article à un autre. Les différences principales entre ces problèmes sont : 1. la prise en compte des synchronisations des services chez un même patient, 2. la considération des contraintes de précédences entre les services, 3. des préférences exprimées par les patients, 4. la considération ou non des qualifications des personnels, 5. les objectifs particuliers pour chaque problème.

La plupart des études sont consacrées à la planification quotidienne, ce qui incite les auteurs à se concentrer davantage sur le problème de routage qui est souvent modélisé tel un VRP avec des contraintes supplémentaires. Ces dernières rendent le problème plus particulier et différent d'un papier à un autre. Pour ce qui est de la planification sur un horizon plus étendu, l'horizon considéré ne dépasse généralement pas une semaine. Dans notre analyse nous allons classer les différents travaux par rapport aux différentes problématiques étudiées.

**Contraintes de synchronisation :** Certains auteurs ont considéré des soins pouvant nécessiter l'intervention de plus d'un personnel, ce qui amène à introduire la notion de synchronisation, qui, la plupart du temps, est gérée dans la partie routage du problème. Dans la plupart des travaux, ces soins sont généralement représentés par deux services à effectuer au même moment et donc nécessairement par deux personnes différentes (voir la figure 2.2).

[Eveborn et al., 2006] décrivent le système d'hospitalisation à domicile suédois, où chaque patient a une liste d'intervenants qu'il préfère avoir pour les

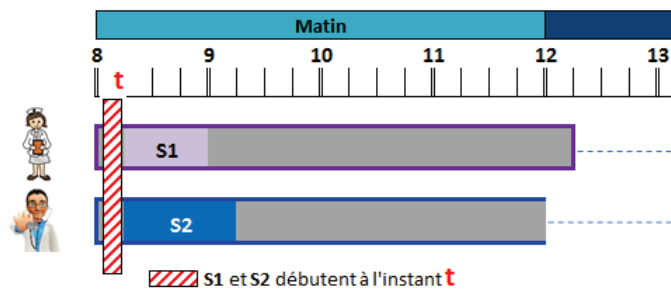


FIGURE 2.2 – Synchronisation

soins demandés, certains soins peuvent nécessiter plusieurs personnels à la fois, donc la synchronisation est prise en compte, ainsi que les pauses des personnels. Les auteurs utilisent un modèle basé sur un problème de partitionnement et résolvent le problème heuristiquement en utilisant un problème de couplage répété. Le couplage combine les personnels avec les visites (les services). Ils ont réussi en moyenne à gagner 20% du temps de voyage des personnels et dans la planification 7% du temps total de travail. L'algorithme est testé sur des instances à 20 personnels et 140 visites, le programme trouve des solutions au bout de 140 secondes en moyenne.

Les auteurs de [Dohn et al., 2008] ont également considéré des contraintes de synchronisation. Le problème est résolu via la génération de colonnes. Le problème maître est un problème de partitionnement d'ensembles dans lequel les auteurs considèrent la synchronisation. Le sous-problème est un plus court chemin avec des fenêtres de temps résolu avec la programmation dynamique. Ils minimisent le nombre de services non couverts.

Dans [Kergosien et al., 2009], les auteurs ont considéré en plus des contraintes de synchronisation, des ensembles de services qui ne peuvent pas être effectués simultanément, et d'autres ensembles de services à affecter à une même personne. Ils ont étudié l'HAD tel un problème de voyageur de commerce. Plusieurs visites chez un même patient sont représentées par plusieurs nœuds, la tâche consiste à de trouver des tournées visitant tous les nœuds une et une seule fois. Un PLNE est résolu par un solveur (CPLEX) et pour aider ce dernier des coupes sont rajoutées, ce qui a permis de résoudre des instances avec 40 services et des personnels de trois qualifications différentes. Les auteurs n'ont pas présenté de méthode pouvant résoudre des instances de plus grande taille qui ne peuvent pas être résolues avec le solveur.

Nous citons également [Mankowska et al., 2013], [Nickel et al., 2012], [Redjem et al., 2011], [Bredström and Rönnqvist, 2007] et [Thomsen, 2006] qui ont considéré des contraintes de synchronisation, nous présenterons en

détails leurs travaux dans ce qui suit.

**Contraintes de précédences :** Des contraintes de précédences sont considérées dès lors qu'un patient peut demander plus d'un soin par jour. Pour exprimer des précédences, les auteurs définissent un temps minimal et/ou maximal à respecter entre deux interventions chez un même patient (voir la figure 2.3)

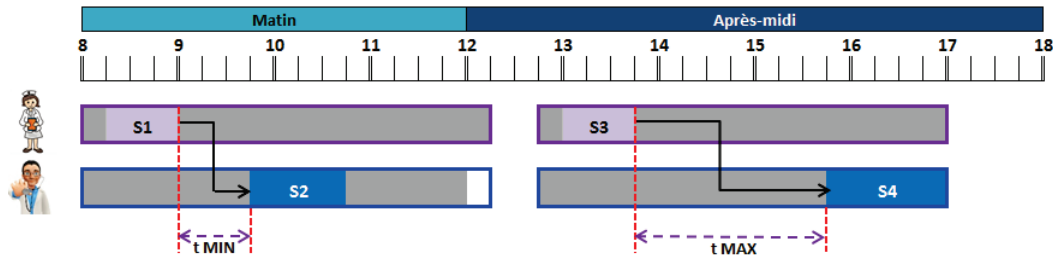


FIGURE 2.3 – Précédences

C'est le cas dans [Redjem et al., 2011] où les auteurs ont développé un modèle collaboratif pour planifier les activités des prestataires pour l'hospitalisation à domicile en France. Dans le modèle, les fenêtres de temps des patients, les précédences et les synchronisations entre les visites sont considérées. Le modèle est basé sur la structure du VRPTW, les auteurs ont évalué le modèle avec une instance composée de deux personnels et huit patients, une comparaison des résultats obtenus en changeant l'objectif est présentée.

Le travail de [Nickel et al., 2012] présente la planification à court et moyen terme pour les infirmières travaillant pour l'HAD en Allemagne, des contraintes de synchronisation ainsi que de précédences sont considérées. Dans un premier temps, les auteurs introduisent un modèle pour la planification hebdomadaire des infirmières. Par la suite, les auteurs ont développé un second modèle appelé Master Schedules Problem (MSP), qui prend en considération le planning actuel. Le MSP crée des plannings maîtres optimaux et génère les plannings avec un minimum de tournées possible. Enfin, les auteurs étudient un problème de planification opérationnel qui considère la possibilité d'intégrer des changements de dernière minute dans un planning existant. Pour résoudre chacun des problèmes, les auteurs utilisent différentes méta-heuristiques telles qu'une recherche à grands voisinages adaptatifs (adaptive large neighborhood search, (ALNS)) et une recherche tabou, combinées avec de la programmation par contraintes. Les différentes approches sont testées avec des instances réelles.

[Ben Bachouch et al., 2009] ont développé un modèle basé sur la programmation linéaire mixte pour minimiser la distance totale parcourue par les personnels. Des contraintes de synchronisation et de précédences sont prises en compte. Les auteurs ont résolu le modèle avec deux solveurs : LINGO de LINDO SYSTEMS et OPL-CPLEX d'ILOG Studio. Ils ont réussi à résoudre une instance de sept patients, trois personnels et un horizon de cinq jours.

Nous citons également [Bredström and Rönnqvist, 2008] où des contraintes de précedence sont également utilisées.

**Contraintes liées aux préférences :** Dans certains articles, les patients expriment des préférences concernant les personnels qui doivent effectuer les soins demandés. C'est le cas dans [Eveborn et al., 2006] cité ci-dessus ou encore dans [Rasmussen et al., 2012] où les auteurs ont repris le même problème étudié dans [Dohn et al., 2008] dans lequel des contraintes de préférences sont rajoutées. Ces dernières sont rajoutées dans le sous-problème de la génération de colonnes. L'objectif est de minimiser le nombre de visites non couvertes, le coût du trajet parcouru et de maximiser les préférences.

Dans [Trautsamwieser and Hirsch, 2011] des préférences sont exprimées par les patients, non seulement sur les personnels mais aussi sur les fenêtres de temps : chaque patient a deux fenêtres de temps, une fenêtre de temps préférée par le patient et une autre imposée pour le soin telles que la première est incluse dans la deuxième. Les auteurs ont étudié la planification quotidienne des infirmière en HAD en Autriche, ils ont introduit dans leurs études les temps de travail réglementaires spécifiques pour chaque infirmière. Une métaheuristique basée sur une recherche à voisinage variable (Variable Neighborhood Search, VNS) est développée pour résoudre le problème. Selon les auteurs, la méthode proposée trouve une solution optimale globale pour des instances de petites tailles et leurs analyses montrent que l'algorithme est capable de résoudre des instances avec un maximum de 512 visites et de 75 infirmières. [Mankowska et al., 2013] ont également pris en considération des contraintes de préférence et des contraintes de synchronisation dans le problème qu'ils ont étudié. Ils ont développé une heuristique de recherche locale.

Dans [Borsani et al., 2006] chaque patient a des jours de visite préférés pour les soins demandés. En plus de ces préférences, les patients ont une liste de personnels de référence auxquels il peuvent être affectés. Dans leur démarche, les auteurs affectent dans le meilleur des cas, les patients aux personnels de référence. Les auteurs considèrent que les patients ont un soin par jour et ce soin est continu sur l'horizon, un modèle d'affectation couplé à un modèle de planification est proposé et appliqué sur des données de deux structures hospitalières. Les résultats obtenus sont comparés avec ceux obtenus manuellement en se basant sur quatre indicateurs : continuité des soins



(professionnel de santé référent), sous-traitance des visites (par l'entourage du patient), jours préférentiels (du patient) et cohérence géographique (entre patient et professionnel de santé).

**Personnels homogènes :** Certains auteurs considèrent que les personnels sont homogènes, ceci simplifie un peu le problème car la notion de qualification n'est pas considérée. Ils parlent de planification et routage des infirmiers pour l'HAD. C'est le cas dans [Thomsen, 2006] où l'auteur a assimilé le problème à un VRPTW auquel il a rajouté la prise en compte des visites partagées (la synchronisation), pour chaque patient une liste des personnels permanents est définie. L'approche proposée s'appuie sur une modélisation mathématique dans laquelle la fonction objectif est composée de trois parties : le temps total de déplacement, le nombre de visites effectuées par un personnel qui n'est pas permanent chez le patient associé à la visite et enfin le nombre de visites partagées réalisées par deux personnels dont l'un n'est pas permanent chez le patient considéré.

Dans [Bredström and Rönnqvist, 2007], les auteurs considèrent également que les personnels sont identiques et les visites se différencient uniquement par rapport à leurs fenêtres de temps et la durée des services. Les personnels commencent leur travail à partir d'un même dépôt. L'objectif considéré est de minimiser une somme composée du temps parcouru par les personnels et des préférences, ces dernières sont des poids arbitraires entre les services et les personnels. Les auteurs ont développé un algorithme basé sur la méthode de *Branch-and-Price*. Dans la partie *Pricing*, ils définissent un problème de partitionnement avec des contraintes de synchronisation, ces dernières sont relâchées pour former le problème maître. Le sous-problème est un problème de plus court chemin avec fenêtres de temps. La synchronisation est traitée dans les stratégies de branchement. Dans [Bredström and Rönnqvist, 2008] les auteurs ont rajouté des contraintes de précédence au modèle étudié dans [Bredström and Rönnqvist, 2007]. Ainsi le modèle est un VRPTW avec des contraintes additionnelles de synchronisation et de précédence, ils résolvent le modèle en utilisant une heuristique.

Nous citons également [Ben Bachouch et al., 2009], [Rasmussen et al., 2012] et [Akjiratikar et al., 2007] où les auteurs ne considèrent pas les qualifications des personnels. Dans [Akjiratikar et al., 2007] la solution au problème est basée sur un algorithme d'optimisation par essaim particulaire (Particle Swarm Optimization :PSO, voir [Kennedy et al., 1995]), dans lequel un algorithme de recherche locale est intégré : le premier algorithme explore l'espace des solutions de manière globale ; tandis que la recherche locale explore le voisinage de la solution considérée, en utilisant des techniques d'amélioration telles que les techniques d'échange ou d'insertion.



**Personnels permanents et à temps partiel :** [Cheng and Rich, 1998] ont considéré des personnels permanents et non permanents. Les auteurs ont élaboré un planning sur une journée pour les infirmières d'une structure de soins à domicile, l'objectif est de minimiser le volume d'heures supplémentaires effectuées par les infirmières permanentes et les heures effectuées par les infirmières qui travaillent à temps partiel. Pour chaque infirmière, une pause déjeuner est programmée dans une fenêtre de temps avec une durée fixe. Les auteurs ont développé une heuristique à deux phases : dans la première phase, les tournées des personnels sont construites en utilisant une heuristique ; ainsi une première solution est établie. Dans la deuxième phase, cette solution est améliorée grâce à une recherche locale. La méthode est testée sur des données générées aléatoirement et des données réelles.

**Fenêtres de temps :** Certains articles prennent en compte des contraintes de fenêtres de temps sur les visites des patients ainsi que sur les disponibilités des personnels. Elles sont de deux types, des contraintes dures et des contraintes souples. C'est le cas dans [Bertels and Fahle, 2006], les auteurs utilisent une combinaison de la programmation linéaire et de la programmation par contraintes ainsi que des métaheuristiques pour résoudre le problème de planification sur un horizon d'une journée. Le modèle est résolu avec une approche en deux étapes. Dans un premier temps, ils partitionnent les services dans des ensembles pouvant être visités par un seul personnel. Puis, pour chaque ensemble, un ordre est généré. L'algorithme est testé sur des instances de 20 à 50 personnels avec 200 à 600 services à visiter.

Dans [Begur et al., 1997] les fenêtres de temps ne sont pas considérées, les auteurs décrivent un système d'aide à la décision (DSS) utilisé aux États-Unis. Le DSS fournit des routes pour les personnels en utilisant le système d'information géographique. L'objectif est de développer un planning qui minimise la distance parcourue par les personnels et qui équilibre la charge de travail des personnels. Ils ont développé un programme en variables mixtes pour un planning de cinq jours par semaine. Le modèle est formulé tel un voyageur de commerce multiple (multi Travelling Salesman problem, mTSP) avec un seul dépôt et une seule période. Pour résoudre le problème, les auteurs ont implémenté les heuristiques de Clarke et Wright [Clarke and Wright, 1964] et un algorithme de balayage [Gillett and Miller, 1974]. Afin d'améliorer les tournées, les auteurs ont utilisé les procédures d'insertion proposées dans [Rosenkrantz et al., 1977], ainsi que les procédures d'échanges d'arêtes proposées dans [Lin and Kernighan, 1973].

**Horaires de passage fixes :** Dans [Bennett, 2009] des méthodes quantitatives pour le routage et la planification pour l'HAD sont proposées, le problème considéré est un problème de tournées de véhicules périodique avec des horaires de passage fixes. L'auteur a considéré un ensemble de patients à visiter par les personnels à des fréquences hebdomadaires. Les coûts permettant d'offrir des horaires de passage fixes chez un même patient sont quantifiés. Pour résoudre le problème, l'auteur a développé une approche qui combine des idées de la génération de colonnes et de la recherche locale.

**Partitionnement territoriale :** Jusque là nous avons parlé des travaux qui cherchent essentiellement à affecter des personnels à des patients qui sont hospitalisés, dans ce qui suit nous allons présenter des articles qui considèrent l'affectation des personnels à des zones géographiques.

La première étude sur le partitionnement géographique en HAD est présentée dans [Blais et al., 2003], les auteurs ont étudié un cas pratique de la communauté locale d'une clinique canadienne. Ils ont modélisé la situation telle un problème d'optimisation multi-critères qui est résolu avec une recherche tabou. La solution obtenue a été mise en place en Septembre 2000 pour un horizon de sept ans. Plus tard, une analyse de l'approche territoriale (ou le partitionnement géographique) de services de soins à domicile est présentée dans [Lahrichi et al., 2006], dans lequel la pertinence du modèle présenté dans [Blais et al., 2003] est remise en cause, puisqu'il ne considère pas la fluctuation de la demande et n'est pas flexible quant à l'affectation des infirmières aux zones géographiques. Dans cet article les auteurs se sont basés sur des données des années 1998/99 et 2002/03, ils se sont concentrés sur le nombre de visites par infirmier et la distribution de ces visites sur les zones géographiques. Deux solutions sont proposées par les auteurs : la première consiste à affecter les infirmiers aux différentes zones géographiques selon les besoins. Dans la seconde solution, les auteurs proposent de diviser les infirmiers en deux groupes où l'un serait constitué d'infirmiers affectés à une seule zone et l'autre serait constitué d'infirmiers pouvant intervenir sur l'ensemble du territoire.

Après l'analyse de [Lahrichi et al., 2006], les auteurs de [Hertz and Lahrichi, 2009] considèrent le problème d'affectation des personnels aux patients dans les Côtes-des-Neiges pour la communauté locale d'une clinique canadienne à Montréal. La localisation géographique des patients est prise en compte ainsi que la charge de travail des infirmiers et le tout sur un horizon de planification d'un mois. Les auteurs proposent deux modèles de programmation mixte avec des contraintes et un objectif non-linéaires. Le modèle est résolu avec un algorithme de recherche tabou.

Le tableau 2.1 présente une classification des articles cités ci-dessus et pour lesquels nous avons présenté différentes caractéristiques.

Références	Objectif	Caractéristiques & méthode
[Begur et al., 1997]	coût du trajet	pas de TW ; k-opt, plus proche voisin
[Cheng and Rich, 1998]	volume horaire de travail	pause déjeuner ; MILP, heuristique
[Borsani et al., 2006]	équilibre charge de travail	préférences, continuité des soins ; PL
[Bertels and Fahle, 2006]	coût du trajet	TW souple et dure ; métaheuristique, PL, PPC
[Eveborn et al., 2006]	coût du trajet, temps d'attente	synchronisation, pauses, préférences ; couplage
[Bredström and Rönnqvist, 2008]	violation des préférences, coût du trajet	pas de qualifications, mono dépôt, synchronisation, précédences ; B&P
[Akjiratikarl et al., 2007]	coût du trajet	précédences ; PSO
[Bredström and Rönnqvist, 2007]	temps de parcours, préférences	pas de qualification ; B&P
[Rasmussen et al., 2012]	nombre de patients non couverts	pause déjeuner, synchronisation, préférences ; génération de colonnes
[Kergosien et al., 2009]	distance parcourue	synchronisation ; PLNE, coupes
[Bennett, 2009]	productivité des infirmiers	fréquences de visites ; heuristique
[Ben Bachouch et al., 2009]	coût du trajet	pause, synchronisation, précédence ; MILP
[Redjem et al., 2011]	coût du trajet, temps d'attente	précédence et synchronisation ; MILP
[Trautsamwieser and Hirsch, 2011]	coût du trajet, insatisfaction des patients et personnels	pause et temps réglementaire de travail ; VNS
[Nickel et al., 2012]	max nombre de visites effectuées, min nombre de fois qu'une qualification est violée	précédence, synchronisation ; métaheuristique, ALNS

TABLE 2.1 – Tableau récapitulatif des caractéristiques des différents problèmes traités dans les travaux cités

D'après le tableau 2.1, nous constatons que la plupart des études considèrent plus d'un objectif. Ceci est dû au fait que le problème nécessite la minimisation des coûts engendrés par la planification (volume horaire de travail) ou par le routage (la distance parcourue, le

coût du trajet), tout en assurant une qualité de service chez les patients. La notion de coût est souvent exprimée via la minimisation des distances parcourues par les personnels [Akjiratikarl et al., 2007, Bertels and Fahle, 2006, Eveborn et al., 2006, Kergosien et al., 2009, Trautsamwieser and Hirsch, 2011] ou en minimisant les temps de parcours [Begur et al., 1997, Bredström and Rönnqvist, 2007]. La qualité de service est considérée dans diverses dimensions, y compris par exemple lors de l’exécution en temps voulu des services [Bertels and Fahle, 2006, Eveborn et al., 2006, Trautsamwieser and Hirsch, 2011], le respect des préférences relatives de certains personnels pour certains patients [Bredström and Rönnqvist, 2007, Eveborn et al., 2006, Rasmussen et al., 2012, Borsani et al., 2006], la minimisation des services non couverts [Rasmussen et al., 2012, Nickel et al., 2012] ou bien la minimisation des qualifications violées [Bertels and Fahle, 2006, Nickel et al., 2012], le respect des préférences exprimées par les patients pour les journées de passage des personnels pour les soins demandés [Borsani et al., 2006].

## 2.2.4 Problèmes similaires

Le problème de routage et de planification dans l’hospitalisation à domicile trouve des similitudes avec d’autres problèmes connus dans la littérature. Néanmoins, ces problématiques diffèrent sur plusieurs points, nous donnons ci-dessous une comparaison entre ces différentes problématiques.

### 2.2.4.1 Problème de routage et de planification des techniciens

Nous pouvons associer le problème d’HAD au problème d’allocation des techniciens avec fenêtres de temps (Manpower Allocation Problem with Time Windows, MAPTW). Les demandes de techniciens peuvent être réparties à différents endroits, dans des fenêtres de temps différentes et exigent des qualifications différentes. Le nombre d’intervenants ainsi que le temps des trajets parcourus par les techniciens doivent être minimisés. Ce problème est traité par Lim et al. en 2004 (voir [Lim et al., 2004]) qui modélisent le problème tel un VRPTW, pour lequel la capacité des véhicules est remplacée par le nombre d’heures de travail maximum pour chaque technicien, et considèrent également que chaque demande peut exiger un nombre fixe de techniciens. Les auteurs ont présenté un algorithme qui utilise un recuit simulé. En 2005 Lim et al. compliquent encore plus le problème en rajoutant des contraintes liant les services aux équipes, des qualifications sur les techniciens, et chaque demande exige un certain nombre de techniciens par qualification. Ainsi des contraintes de synchronisation sont rajoutées au modèle de Lim et al. en 2004, une heu-

ristique constructive pour résoudre des instances du problème est présentée dans [Li et al., 2005].

Le MAPTW est également étudié dans [Dohn et al., 2009], une approche exacte est présentée, ils décomposent le problème en un problème de partitionnement d'ensembles et développent un algorithme de *Branch-and-Price*. Dans la génération de colonnes, le sous-problème est un problème de plus court chemin élémentaire avec fenêtres de temps. Les auteurs ont également considéré des équipes dans leur modèle, mais dans leur version ce ne sont pas les demandes qui définissent les équipes mais le nombre d'équipes est fixé au départ et les équipes diffèrent l'une de l'autre de part les qualifications des techniciens qui les composent. Ainsi le but de leur modèle est d'affecter des équipes aux clients tout en respectant pour chaque client les différentes qualifications demandées.

Dans [Pillac et al., 2012] le problème est appelé problème de routage et de planification des techniciens (Technician Routing and Scheduling Problem, TRSP), dans d'autres articles le problème est appelé problème de planification des personnels de maintenance (Maintenance Personnel Scheduling Problem, MPSP) [Kovacs et al., 2012]. Il est similaire au MAPTW avec quelques spécificités comme par exemple le fait que les techniciens soient caractérisés par des qualifications et un ensemble d'outils et au cours d'une tournée, ils peuvent rejoindre le dépôt pour se munir d'un outil donné. Dans [Pillac et al., 2012] les auteurs utilisent une matheuristique composée d'heuristiques constructives, recherche de voisinage et de la programmation mathématique.

Nous remarquons que le MAPTW a beaucoup de similitudes avec le problème que nous traitons mais ils sont également différents. En effet, comme il s'agit de patients dans notre cas, nous devons garder le même intervenant chez un même patient. La notion d'équipe considérée dans le MAPTW est différente de celle définie pour le RP-HAD que nous étudions, en effet, celle-ci est définie par une qualification comme c'est le cas pour le MAPTW et une fenêtre de temps, et les personnels qui la composent ne sont pas connus à l'avance contrairement au MAPTW. C'est pourquoi les équipes sont appelées tranches horaires dans le RP-HAD ; nous devons donc affecter les personnels aux tranches horaires et aux patients.

#### 2.2.4.2 Problème de tournées des agents de sécurité

Le problème de tournées des agents de sécurité (Routing and Rostering of the Security guards, SPRR) peut également être assimilé à l'HAD. Dans ce contexte, les visites sont des surveillances de différents bâtiments d'un même site ; par exemple, dans un site industriel, des agents de sécurité doivent surveiller les portes, les fenêtres, les serrures de différents bâtiments dispersés

sur le site. Chaque agent a une qualification : est aidé d'un chien ou non, est formé à effectuer certaines tâches spécifiques. La synchronisation est considérée quand une visite doit être effectuée par deux agents. La précedence est également prise en compte, car les agents doivent visiter un même endroit plusieurs fois dans la même journée ou nuit, ces visites doivent être ordonnées et espacées d'un temps donné [Sinuany-Stern and Teomi, 1986]. Des heuristiques sont présentées dans [Misir et al., 2011, Wolfler Calvo and Cordone, 2003, Willemse and Joubert, 2012] pour résoudre le problème.

La différence principale entre le SPRR et le RP-HAD est la notion de régularité chez les patients. Comme il s'agit de lieux et non de personnes, garder le même intervenant dans un même lieu n'est pas important.

Le tableau 2.2 montre les différents objectifs et les différentes contraintes considérés pour les trois problèmes : routage et planification en HAD noté HCSP, le problème de tournées des agents de sécurité noté SPRR et le problème d'allocation des techniciens avec fenêtres de temps noté MPSP. Dans ce tableau on distingue des contraintes souples (soft) qui sont notées par s, et les contraintes dures (hard) notées par h.

## 2.3 Conclusion

D'après notre analyse de la littérature, les auteurs qui ont étudié le RP-HAD se sont concentrés davantage sur le routage des personnels. Aussi, la plupart des articles cités ont introduit des contraintes de synchronisations et de précédences au routage des personnels. Par ailleurs, certains articles considèrent des préférences sur des journées de visites pour les patients, tandis que d'autres des préférences de personnels par les patients. Cette notion de préférence peut s'interpréter par ce que l'on appelle la régularité des personnels chez un même patient, au lieu de vouloir garder un même intervenant chez un même patient, les auteurs ont considéré pour chaque patient une liste de personnels qu'ils préfèrent avoir pour les soins demandés. Dans notre problématique, on retrouve la notion de régularité induite par le fait que l'on s'intéresse aux soins continus sur un horizon de planification de plus d'une journée. Or, dans notre cas, ce ne sont pas des préférences qui sont exprimées mais nous avons mis en contraintes, qu'un patient doit avoir un même intervenant (quand cela est possible) durant toute sa durée des soins.

L'étude du problème sur un horizon plus étendu engendre davantage de contraintes qui concernent la partie planification, telle que la gestion des jours de repos des personnels ou les journées successives de travail. Cependant, nous avons constaté que dans les différents articles étudiés, ces contraintes ne sont

	HCSP	SPRR	MPSP
<i>Fonction objectif</i>			
minimiser le temps de trajet	x	x	x
minimiser le temps d'attente	x	x	x
maximiser l'aspect aléatoire des tournées		x	
minimiser violation des contraintes soft	x	x	x
<i>Contraintes de routage</i>			
affecter toutes les tâches	h	h	h
les tournées doivent être réalisables	h	h	h
respecter les tâches fixes		h	h
respecter les fenêtres de temps	s	s	s
affecter des tâches préférées pour les personnels	s		
respecter les tâches synchronisées	s		
respecter les priorités	s		s
<i>Contraintes de planification des personnels</i>			
effectuer une seule tâche à la foi	h	h	h
respecter les tâches fixes	h	h	h
affecter des personnels qualifiés	s	s	h
pas de dépassement d'honoraires	s		
affecter les personnels préférés pour les tâches	s		
un maximum de jours de travail successifs		s	
un maximum de temps de travail successifs par jour		s	s
un maximum de temps de travail successif par semaine		s	
un maximum de temps de travail successif par mois		s	
un minimum de temps de repos entre deux jours de travail		s	s
un maximum de weekends de travail successifs		s	
le nombre préféré de jours de travail par semaine		s	
pas d'affectation en dehors des régions de faisabilité		s	s

TABLE 2.2 – Aperçu des caractéristiques des trois problèmes [Misir et al., 2014]

pas considérées par les auteurs et la figure 2.2 tirées de [Misir et al., 2014] montre bien que cet aspect du problème n'a pas été étudié pour le RP-HAD. Ceci nous a motivé à aller dans ce sens et à considérer également les contraintes induites par la planification, telles que la gestion des jours de repos ou des journées successives de travail ou encore l'introduction des tranches horaires de travail auxquelles les personnels doivent être affectés.

Pour ce qui est des méthodes de résolution utilisées dans la littérature, la plupart des approches introduisent deux phases de résolution : la première phase est consacrée à la construction des tournées et une première solution est déterminée ; la seconde phase est consacrée à l'amélioration de la solution déterminée lors de la phase précédente par le biais des heuristiques de recherche de voisinage ou de la génération de colonnes. Notre approche est une

matheuristique, qui induit trois phases de traitement : affectation horaire, construction des tournées et enfin détermination du planning. Contrairement aux autres approches, lors de la construction des tournées, nous nous repons sur des modèles mathématiques qui nous permettent de nous rapprocher un peu plus de la solution optimale.



# Problème et modélisation

---

Notre étude de l'état de l'art sur le problème de RP-HAD a révélé l'existence de multiples variantes du problème. Dans ce chapitre nous allons fixer les contraintes et les objectifs du problème et ceci en le modélisant sous forme d'un Programme Linéaire en Nombres Entiers (PLNE). Ce dernier constitue une première approche du problème, qui permet entre autre d'identifier les principales difficultés. Dans ce chapitre nous présentons dans une première section les notations et la modélisation du problème. Puis nous proposons un PLNE. Enfin, nous présentons les résultats des tests effectués sur ce dernier.

## 3.1 Notations et modélisation du problème

Dans cette première étude, nous considérons un ensemble de patients ayant besoin de soins à domicile. Chaque patient a besoin du même soin étalé sur un horizon de temps, les soins sont définis par une qualification, une durée de soin ainsi qu'une fenêtre de temps durant laquelle le soin considéré doit commencer. De plus, nous considérons un ensemble de personnels de santé. Chaque personnel est caractérisé par une qualification et une fenêtre de temps représentant le moment où le personnel considéré est disponible. Les personnels de santé doivent commencer leurs tournées en partant de leur domicile et le rejoindre à la fin de leurs services, donc chaque personnel dispose de coordonnées géographiques qui lui sont propres. En plus des fenêtres de temps, les personnels de santé doivent respecter des tranches horaires de travail liées à leurs qualifications, car dans la pratique les lois du travail diffèrent d'une spécialité à une autre. Par conséquent, en plus des deux ensembles de patients et de personnels, nous considérons également un ensemble de tranches horaires, ces dernières sont caractérisées par des fenêtres de temps. Chaque personnel affecté à une tranche horaire doit respecter la fenêtre de temps de cette dernière.

De nombreuses contraintes sont à considérer dans ce premier modèle. Des contraintes dites d'affectation ; comme nous l'avons précisé dans le paragraphe ci-dessus, les patients doivent être affectés aux personnels et ces derniers doivent à leur tour être affectés aux tranches horaires. Ces différentes affectations se font en respectant à la fois les fenêtres de temps ainsi que les

qualifications. Par ailleurs, l'étude du problème sur un horizon plus étendu engendre plus de contraintes qui concernent principalement la partie planification, des contraintes de réglementations liées au temps de travail des personnels, comme le respect d'un nombre maximal de jours successifs de travail ainsi qu'un nombre minimal de jours de repos pour chaque personnel. Des contraintes dites de régularité sont également considérées, dès lors qu'un patient demande un soin continu sur l'horizon, ainsi la régularité des personnels chez ce patient est importante.

**Notations :** Comme nous l'avons précisé ci-dessus, pour chaque patient, nous considérons un soin continu sur l'horizon de planification, afin de simplifier les notations, nous allons considérer un ensemble de services, où chaque service est lié à un seul patient et un seul soin (voir la figure 3.1)

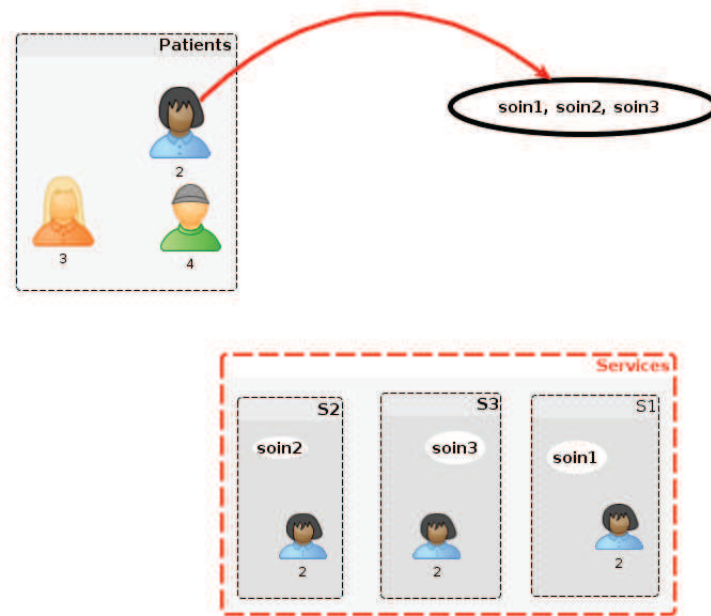


FIGURE 3.1 – Soins versus services

Dans la figure 3.1, le patient numéro 2 a besoin de trois soins ; *soin1*, *soin2* et *soin3*, ces soins sont respectivement représentés par trois services *s1*, *s2* et *s3*.

Nous notons  $id_s$  l'ensemble des patients,  $id_p$  l'ensemble des identifiants des personnels et  $J$  l'ensemble des tranches horaires. L'horizon de planification est noté  $H$  et  $t$  est l'indice du jour dans cet horizon. Les notations que nous utilisons sont les suivantes :

- $S$  : l'ensemble des services, chaque service  $i \in S$  est lié à un seul patient  $id_s^i \in id_s$  et il est défini par une qualification  $Q_i$ , une durée de soin  $D_i$

ainsi qu'une fenêtre de temps  $[e_i, l_i]$ .

- $Sid_s^i$  : l'ensemble des services liés au patient  $i \in id_s$  sur tout l'horizon
- $P$  : l'ensemble des personnels, chaque personnel  $k \in P$  est défini par un identifiant  $id_p^k \in id_p$ , une qualification  $Q_k$  et une fenêtre de temps  $[e_k, l_k]$ .

**Exemple 1** :  $P = \{P1, P2, P3, P4\}$ ,  $id_p = \{Dr X, Mme Y, Dr Z\}$ , tels que :

- $id_p^{P1} : X$ ,  $Q_{P1} : \text{cardiologue}$ ,  $[e_{P1}, l_{P1}] : [8h, 19h]$
- $id_p^{P2} : Y$ ,  $Q_{P2} : \text{infirmière}$ ,  $[e_{P2}, l_{P2}] : [12h, 19h]$
- $id_p^{P3} : X$ ,  $Q_{P3} : \text{cardiologue}$ ,  $[e_{P3}, l_{P3}] : [12h + 1t, 19h + 1t]$
- $id_p^{P4} : Z$ ,  $Q_{P4} : \text{cardiologue}$ ,  $[e_{P4}, l_{P4}] : [8h + 4t, 19h + 4t]$

$X$  est un cardiologue qui est disponible pour l'HAD le premier jour de l'horizon de planification de 8h jusqu'à 19h et le deuxième jour de la planification de 12h jusqu'à 19h également.  $Y$  est une infirmière disponible le premier jour de l'horizon de 12h à 19h, et enfin  $Z$  est aussi cardiologue mais il ne peut commencer le travail qu'à partir du 5ème jour de l'horizon.

- $I_k$  : les personnels ayant le même identifiant  $k \in id_p$ , dans l'exemple ci-dessus, pour  $k = X$ ,  $I_k = \{P1, P3\}$ .
- $P^{k+t}$  : le personnel ayant l'identifiant  $k \in id_p$  et qui intervient le jour  $t \in H$ .
- Chaque tranche horaire  $j \in J$  est définie par une qualification  $Q_j$  et une fenêtre de temps  $[e_j, l_j]$ .
- La période de planification considérée s'étend sur deux semaines, pour chaque jour  $t$  de l'horizon  $H$ , notons par  $S_t$  l'ensemble des services à effectuer le jour  $t$  et par  $P_t$  l'ensemble des personnels présents le jour  $t$ . Ce qui implique que  $S = \cup_{t \in H} S_t$  et  $P = \cup_{t \in H} P_t$  qui sont respectivement les services et les personnels considérés sur tout l'horizon  $H$ .

**Modélisation** : La partie routage de notre problématique peut être modélisée sous forme d'un graphe orienté, on définit un graphe  $G = (V, A)$ , tel que  $V = P \cup S$  est l'ensemble des nœuds et  $A = \{(i, j) : i \in V, j \in V, i \neq j\}$  est l'ensemble des arcs du graphe  $G$ . Chaque arc  $(i, j), i, j \in V$  a un coût  $d_{ij}$  qui est la distance entre  $i$  et  $j$ . Les déplacements d'un dépôt (domicile d'un personnel) à un autre ne sont pas possibles. Les nœuds de l'ensemble  $S$  sont caractérisés par une durée de service  $D_i$ . Des fenêtres de temps ainsi que des qualifications sont à considérer pour tous les nœuds de  $V$ . Sur le coté gauche de la figure 3.2 un graphe illustre ce problème.

L'objectif est de trouver un ensemble d'arcs formant des tournées, de manière à ce que tout les sommets de  $S$  soient dans les tournées (voir la figure

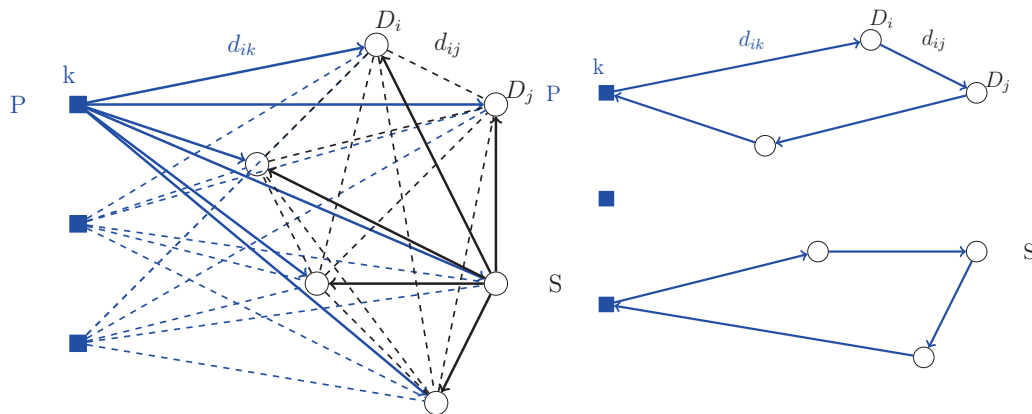


FIGURE 3.2 – Représentation du routage des personnels

3.2). L'objectif est de minimiser le nombre de tournées tout en respectant les fenêtres de temps et les qualifications. Mais notre tâche ne consiste pas uniquement à définir des tournées, il nous faut aussi établir un planning (voir la figure 3.3) qui doit respecter un ensemble de contraintes.

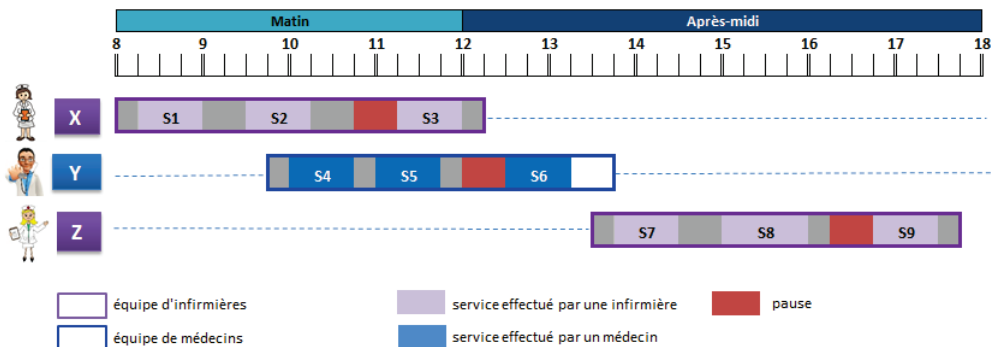


FIGURE 3.3 – Représentation d'un planning

## 3.2 Résolution exacte via un solveur

Avant de présenter le modèle, nous allons introduire quelques libertés qui nous ont permis d'alléger la formulation. Chaque personnel de santé doit commencer sa journée de travail en partant de son domicile et doit rejoindre son domicile une fois sa tournée finie. Ainsi, dans notre modélisation, en plus des  $|S|$  services, nous considérons  $2|P|$  autres services qui représentent les domiciles des personnels, comptabilisés deux fois (pour avoir la sortie du domicile

et le retour au domicile). Ces services ont les mêmes caractéristiques que les personnels qu'ils représentent (qualification et fenêtres de temps), avec une durée de service qui est nulle.

## Les variables

Les variables utilisées lors de la formulation sont les suivantes :

- $y_k$  est la variable liée à l'affectation du personnel  $k$  à l'HAD. Elle est égale à 1 si le personnel  $k$  est dans la solution et 0 sinon ( $\forall k \in P$ ).
- $v_{k,i}$  est la variable d'affectation des personnels aux services. Elle vaut 1 si le personnel  $k$  est affecté au service  $i$ , 0 sinon ( $\forall k \in P, \forall i \in \{1, \dots, |S| + 2|P|\}$ ).
- $z_{i,k}$  vaut 1 si le personnel ayant l'identifiant  $k \in id_p$  intervient chez le patient  $i \in id_s$  au moins une fois sur l'horizon  $H$ .
- $N_i$  est la variable qui représente le nombre de personnels différents intervenant chez un même patient  $i \in id_s$ .
- $w_{j,i}$  est la variable d'affectation des personnels et services aux tranches horaires. Elle vaut 1 si le personnel ou le service  $i$  est affecté à la tranche horaire  $j$ , égale 0 sinon ( $\forall i \in \{1, \dots, |S| + 2|P|\}, \forall j \in J$ ).

**Remarque 1** *Les variables  $w_{j,i}$  donnent l'affectation des services aux tranches horaires, ainsi l'affectation des personnels aux tranches horaires se déduit par l'affectation des services fictifs représentant les domiciles des personnels, i.e.  $w_{j,|S|+k}, k \in id_p$  est l'affectation du personnel  $k$  à la tranche horaire  $j \in J$ . Ainsi,  $w_{j,|S|+P^{k+t}}, k \in id_p, t \in H$  donne l'affectation du personnel  $k$  intervenant le jour  $t$  à la tranche horaire  $j$ .*

- $\xi_{k,i,h}$  est la variable de routage. Elle est égale à 1 si le personnel  $k$  effectue le service  $i$  avant le service  $h$ , elle est égale à 0 sinon ( $\forall k \in P, \forall i, h \in \{1, \dots, |S| + 2|P|\}$ ).
- $p_{k,i}$  est la variable qui représente l'heure d'arrivée du personnel  $k$  pour effectuer le service  $i$  ( $\forall k \in P, \forall i \in \{1, \dots, |S| + 2|P|\}$ ).

**Contraintes d'affectation**

$$\sum_{k=1}^{|P|} v_{k,i} = 1 \quad \forall i \in S \quad (3.1)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} w_{j,i} = 1 \quad \forall i \in S \quad (3.2)$$

$$v_{k,|S|+k} = y_k \quad \forall k \in P \quad (3.3)$$

$$v_{k,|S|+|P|+k} = y_k \quad \forall k \in P \quad (3.4)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} w_{j,|S|+k} = y_k \quad \forall k \in P \quad (3.5)$$

$$\sum_{j=1}^{|J|} w_{j,|S|+|P|+k} = y_k \quad \forall k \in P \quad (3.6)$$

$$v_{k,i} \leq y_k \quad \forall k \in P, \forall i \in S \quad (3.7)$$

les contraintes (3.1) traduisent le fait qu'un service doit être affecté à un seul personnel, les contraintes (3.2) impliquent que chaque personnel et chaque service soient affectés à une seule tranche horaire et les contraintes (3.3) et (3.4) font le lien entre les services qui représentent les domiciles des personnels et ces derniers. Les contraintes (3.5), (3.6) et (3.7) imposent qu'un personnel soit affecté à un service ou à une tranche horaire si et seulement si ce personnel est pris dans la solution.

**Contraintes de routage :** Les contraintes ci-dessous expriment les contraintes de routage.

$$\sum_{h=1}^{|S|} \xi_{k,|S|+k,h} = y_k \quad \forall k \in P \quad (3.8)$$

$$\sum_{h=1}^{|S|} \xi_{k,h,|S|+|P|+k} = y_k \quad \forall k \in P \quad (3.9)$$

$$\sum_{i=1, h \neq i}^{|S|} \xi_{k,i,h} + \xi_{k,|S|+k,h} = v_{k,h} \quad \forall k \in P, \forall h \in S \quad (3.10)$$

$$\sum_{h=1, h \neq i}^{|S|} \xi_{k,i,h} + \xi_{k,i,|S|+|P|+k} = v_{k,i} \quad \forall k \in P, \forall i \in S \quad (3.11)$$

Les contraintes (3.8) et (3.9) assurent le fait qu'un personnel commence le travail en sortant de son domicile et le finit en rentrant chez lui si et seulement

si ce personnel est affecté à l'HAD. Un service  $k$  doit être précédé soit par un autre service, soit par une sortie du domicile (3.10). Un service doit précéder, un autre service ou bien un retour au domicile (3.11).

### Contraintes de fenêtres de temps

$$v_{k,i}e_k \leq p_{k,i} \leq v_{k,i}(l_k - D_i) \quad \forall k \in P, \forall i \in \{1, \dots, |S| + 2|P|\} \quad (3.12)$$

$$\sum_{k=1}^{|P|} v_{k,i}e_i \leq \sum_{k=1}^{|P|} p_{k,i} \leq \sum_{k=1}^{|P|} v_{k,i}l_i \quad \forall i \in \{1, \dots, |S| + 2|P|\} \quad (3.13)$$

$$\sum_{k=1}^{|P|} p_{k,i} - e_j \geq (w_{j,i} - 1)M \quad \forall j \in J, i \in \{1, \dots, |S| + 2|P|\} \quad (3.14)$$

$$\sum_{k=1}^{|P|} p_{k,i} + D_i - l_j \leq (1 - w_{j,i})M \quad \forall j \in J, i \in \{1, \dots, |S| + 2|P|\} \quad (3.15)$$

Les contraintes (3.12), (3.13), (3.14) et (3.15) assurent le respect des fenêtres de temps des services, personnels ainsi que celles des tranches horaires.

$$p_{k,h} \geq p_{k,i} + D_i + d_{ih} + (\xi_{k,i,h} - 1)M \quad \forall k \in P, i, h \in \{1, \dots, |S| + 2|P|\} \quad (3.16)$$

Les contraintes (3.16) représentent les contraintes temporelles entre deux services effectués par le même personnel de santé.

**Contraintes supplémentaires** Les contraintes ci-dessous assurent le respect des qualifications des services, personnels et tranches horaires.

$$v_{k,i}(Q_k - Q_i) = 0 \quad \forall k \in P, \forall i \in S \quad (3.17)$$

$$w_{j,i}(Q_j - Q_i) = 0 \quad \forall j \in J, \forall i \in S \quad (3.18)$$

Les contraintes ci-dessous expriment le fait qu'un personnel de santé doit appartenir à la même tranche horaire que les services qu'il effectue.

$$(1 - v_{k,i}) + w_{j,i} \geq w_{j,|S|+k} \quad \forall k \in P, \forall j \in J, \forall i \in S \quad (3.19)$$

$$(v_{k,i} - 1) + w_{j,i} \leq w_{j,|S|+k} \quad \forall k \in P, \forall j \in J, \forall i \in S \quad (3.20)$$

$$w_{j,|S|+k} = w_{j,|S|+|P|+k} \quad \forall k \in P, \forall j \in J \quad (3.21)$$

### Contraintes de précédences

$$|p_{k,i} - p_{k',i'}| \geq \min(D_i, D_{i'}) (v_{k,i} + v_{k',i'} - 1), \forall k \neq k' \in P, \forall i \neq i' \in S, id_s^i = id_s^{i'} \quad (3.22)$$

Les contraintes (3.22) assurent que les personnels qui interviennent chez un même patient pour effectuer des services différents ne soient pas chez ce patient au même moment.

### Contraintes liées à la planification

$$Hmin_k y_k \leq p_{k,|S|+|P|+k} - p_{k,|S|+k} \leq Hmax_k y_k, \forall k \in P \quad (3.23)$$

Les contraintes (3.23) assurent le respect d'un nombre minimal d'heures de repos entre deux tranches horaires affectées à un même personnel

**Jours de travail successifs** L'accord des jours de travail ou de repos est un fait contractuel ou syndical. Dans un milieu aussi difficile que celui de la santé où il faut trouver des personnels avec les compétences requises pour satisfaire toute la demande, il faudra donner une garantie sur le partitionnement des jours de repos et des jours de travail.

Pour les jours de travail, dans la planification des personnels en général, les personnels ne doivent pas dépasser un certain nombre de jours de travail successifs. Ce dernier varie d'un milieu de travail à un autre. La contrainte ci-dessous exprime le fait qu'un personnel ne doit pas dépasser  $c$  jours de travail successifs.

Rappelons que  $I_k$  est l'ensemble des personnels ayant l'identifiant  $k \in id_p$  et  $P^{k+t}$ ,  $t \in H$  est le personnel ayant l'identifiant  $k$  et qui correspond au jour de travail  $t \in H$ . Nous avons  $\sum_{j=1}^{|J|} w_{j,|S|+k'}$ ,  $\forall k' \in I_k$  égale 1 si le personnel  $k'$  est actif, ce qui implique que  $\sum_{j=1}^{|J|} w_{j,|S|+P^{k+t}}$ ,  $\forall k \in id_p, \forall t \in H$  égale 1 si le personnel ayant l'identifiant  $k$  travaille le jour  $t$ . Pour mieux comprendre, nous reprenons l'exemple 1 :

Soit  $P = \{P1, P2, P3, P4\}$ ,  $id_p = \{\text{Dr X, Mme Y, Dr Z}\}$ , tels que :

- $id_p^{P1} : X, Q_{P1} : \text{cardiologue}, [e_{P1}, l_{P1}] : [8h, 19h]$
- $id_p^{P2} : Y, Q_{P2} : \text{infirmière}, [e_{P2}, l_{P2}] : [12h, 19h]$
- $id_p^{P3} : X, Q_{P3} : \text{cardiologue}, [e_{P3}, l_{P3}] : [12h + 1t, 19h + 1t]$
- $id_p^{P4} : Z, Q_{P4} : \text{cardiologue}, [e_{P4}, l_{P4}] : [8h + 4t, 19h + 4t]$

Nous avons  $I_X = \{P1, P3\}$ , le personnel  $X$  travail le jour 0 et le jour 1, ainsi,  $P^X$  représente le personnel  $X$  le jour 0 et  $P^{X+1}$  représente le personnel

$X$  le jour 1. Ainsi,  $\sum_{j=1}^{|J|} w_{j,|S|+P^X}$ , égale 1 si le personnel  $X$  est actif le jour 0 et

$\sum_{j=1}^{|J|} w_{j,|S|+P^{X+1}}$ , égale 1 si le personnel  $X$  est actif le jour 1. Ainsi nous pouvons

donner la formulation de la contrainte.

$$\sum_{t=t'}^{t'+c+1} \sum_{j=1}^{|J|} w_{j,|S|+P^{k+t}} \leq c, \forall k \in id_p, \forall t' \in \{1, 2, \dots, |H| - c + 1\} \quad (3.24)$$



Ainsi, sur  $c + 1$  jours successifs, on a au moins un jour de repos.

Nous considérons que les salariés sont partagés entre le travail à l'hôpital et le travail à l'HAD, c'est pourquoi on introduit une contrainte imposant que si un personnel intervient à l'HAD, il doit le faire pour au moins deux jours successifs. Ceci évite que les personnels changent de secteurs de travail tous les jours de la semaine.

$$\sum_{j=1}^{|J|} w_{j,|S|+P^{k+t}} \leq \sum_{j=1}^{|J|} w_{j,|S|+P^{k+t-1}} + \sum_{j=1}^{|J|} w_{j,|S|+P^{k+t+1}}, \forall k \in id_p, \forall t \in H \quad (3.25)$$

**Jours de repos** Lorsque la durée de travail hebdomadaire d'un salarié ne correspond pas à la semaine ouvrée du milieu de son travail, il faut mettre en place le calcul des journées de repos. Par exemple, la semaine de 5 jours dans des entreprises ouvertes 7 jours par semaine dans le cas d'un salarié à temps plein. Différents cas de repos hebdomadaires peuvent être envisagés :

- 2 jours de repos par semaine
- 2 jours consécutifs par semaine
- 4 jours de repos sur 2 semaines, dont 2 jours consécutifs
- 4 jours de repos sur 2 semaines, dont 1 week-end

Dans notre cas, on considère que les salariés sont partagés entre le travail à l'hôpital et le travail à l'HAD. Ceci implique que quand les personnels ne sont pas affectés à l'HAD alors ces derniers sont soit à l'hôpital soit au repos. C'est pourquoi nous considérons la contrainte qui dit que si un personnel n'est pas affecté à l'HAD, il ne doit pas l'être sur au moins deux jours successifs. Ceci permet à la foi de garantir les deux jours de repos ainsi que le non changement de secteurs de travail pour au moins deux jours successifs.

$$1 - \sum_{j=1}^{|J|} w_{j,|S|+P^{k+t}} \geq - \sum_{j=1}^{|J|} (w_{j,|S|+P^{k+t-1}} + w_{j,|S|+P^{k+t+1}}) + 2, \forall k \in id_p, \forall t \in H \quad (3.26)$$

**Contrainte de régularité :** Avant de donner cette nouvelle contrainte, nous rappelons que  $z_{ik}$  vaut 1 si le personnel  $k \in id_p$  intervient au moins une fois chez le patient  $i \in id_s$ . Aussi, la variable  $N_i$  donne le nombre de personnels intervenant chez le même patient  $i \in id_s$ .

$$|Sid_s^i| z_{ik} \geq \sum_{i' \in Sid_s^i} \sum_{k' \in I_k} v_{k'i'}, \forall i \in id_s \forall k \in id_p \quad (3.27)$$

La partie droite de la contrainte (3.27) donne le nombre de fois que le personnel  $k$  intervient chez le patient  $i$  sur l'horizon  $H$ .

$$N_i \geq \sum_{k \in id_p} z_{ik}, \forall i \in id_s \quad (3.28)$$

$\sum_{k \in id_p} z_{ik}$  nous donne le nombre de personnels intervenant chez le patient  $i$ . Ainsi pour avoir un minimum de personnels différents chez un même patient nous introduisons dans la fonction objectif la minimisation de  $\sum_{i \in id_s} N_i$ .

### La fonction objectif

Nous pouvons distinguer plusieurs objectifs : 1. minimiser le nombre de personnels actifs, 2. minimiser le nombre de personnels intervenant chez un même patient, 3. minimiser la distance parcourue par les personnels. Ces objectifs peuvent être partagés en deux ; d'un point de vue structure hospitalière, il est plus important de minimiser les coûts du travail et les objectifs 1 et 3 répondent à cette exigence. L'objectif 2 est plus du côté des patients et de la qualité de service.

1. Minimiser le nombre de personnels affectés à l'HAD. Ceci permet de garder un maximum de personnels à l'hôpital là où la demande est plus importante. La formulation de cette fonction est la suivante :

$$\min \sum_{k=1}^{|P|} y_k$$

2. Minimiser le nombre de personnels par patient, pour cela il suffit de minimiser la somme des  $N_i, \forall i \in id_s$ , sachant que  $N_i$  est supérieure au nombre maximal de personnels différents intervenant chez le patient  $i$ .

$$\min \sum_{i \in id_s} N_i$$

3. Minimiser le coût des trajets parcourus par les personnels de santé : le coût des trajets peut être vu comme étant le coût du transport ou la durée totale du trajet. Ci-dessous la formulation de cet objectif :

$$\min \sum_{k=1}^{|P|} \sum_{i=1}^{|S|+2|P|} \sum_{h=1}^{|S|+2|P|} \xi_{k,i,h} d_{ih}$$

Cependant nous allons définir deux fonctions objectif, dans lesquelles nous voulons satisfaire à la fois la structure hospitalière et le patient, ceci implique que les fonctions objectifs considérées soient pondérées. Soit  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  et  $\alpha_3$  les poids liés respectivement aux objectifs 1, 2 et 3, tels que,  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$  et  $\alpha_3 + \alpha_2 = 1$ .

$$\text{Objectif1} : \min \alpha_1 \sum_{k=1}^{|P|} y_k + \alpha_2 \sum_{i \in id_s} N_i \quad (3.29)$$

$$\text{Objectif2} : \min \alpha_3 \sum_{k=1}^{|P|} \sum_{i=1}^{|S|+2|P|} \sum_{h=1}^{|S|+2|P|} \xi_{k,i,h} d_{ih} + \alpha_2 \sum_{i \in id_s} N_i \quad (3.30)$$

Dans le cas général, les poids définis pour les critères qui composent une fonction à optimiser, peuvent soit intégrer la notion d'importance relative des critères et soit être un facteur de normalisation des échelles des critères. Dans notre cas, l'*objectif1* est constitué de deux termes qui sont du même ordre de grandeur, tandis que, l'*objectif2* somme deux quantités qui ne sont pas du même ordre de grandeur, la première qui est la somme des distances est de l'ordre de milliers, et la deuxième est de l'ordre des centaines. Par conséquent, une normalisation des poids est indispensable, cette dernière se fait comme suit :

$$\begin{cases} \alpha_3 + \alpha_2 = 1 \\ \alpha_2 = 10 \alpha_3 \end{cases} \quad (3.31)$$

du système d'équations (3.31) on déduit que  $\alpha_3 = \frac{1}{11}$  et  $\alpha_2 = \frac{10}{11}$ .

## La taille du PLNE

### Le nombre de variables

#### Le nombre de variables binaires :

- Les variables  $y_k, k \in P$  dont le nombre est égal à  $|P|$
- Les variables  $v_{k,i}, k \in P, i \in \{1, \dots, |S| + 2|P|\}$  dont le nombre est égal à  $|P|(|S| + 2|P|)$
- Les variables  $w_{j,i}, j \in J, i \in \{1, \dots, |S| + 2|P|\}$  dont le nombre est égal à  $|J|(|S| + 2|P|)$
- Les variables  $\xi_{k,i,h}, k \in P, i, h \in \{1, \dots, |S| + 2|P|\}$  dont le nombre est égal à  $|P|(|S| + 2|P|)(|S| + 2|P|)$
- Les variables  $z_{i,k}, i \in id_s, k \in id_p$  dont le nombre est égal à  $|id_s| \times |id_p|$

Ainsi le nombre total de variables binaires est égal à

$$|P| + (|S| + 2|P|)(3|P| + |J| + |S|) + |id_s| \times |id_p|$$

**Le nombre de variables entières :**

- Les variables  $p_{i,k}, i \in P, k \in S$
- Les variables  $N_i, i \in id_s$

ainsi le nombre total de variables entières est le suivant :

$$|P|(|S| + 2|P|) + |id_s|$$

**Le nombre de contraintes** Pour calculer le nombre de contraintes, nous avons séparé les contraintes engendrées par une planification quotidienne (3.32) de celles liées à une planification sur un horizon plus étendu (3.33).

$$|S|(4 + 3|J| + |S|) + |P|(12 + |S|(6 + 2|J| + |S| + 4|P|) + 2|P|(3 + 2|P|) + 5|J|) \quad (3.32)$$

$$3.32 + |id_s|(1 + |id_p|) + 3(|id_p| \times |H|) \quad (3.33)$$

### 3.3 Définition des instances

Étant donné que la taille du modèle est relativement proportionnelle au nombre de services et de personnels sur tout l'horizon, nous avons testé notre modèle dans un premier temps sur des instances définies pour une journée de planification.

Les instances utilisées pour tester le PLNE sont des instances extraites de la littérature [Kergosien et al., 2009]. Ces dernières ont été adaptées afin d'être en accord avec la problématique que nous traitons. À ce titre, nous avons considéré deux types d'instances : des instances de 30 patients et disposant de 7 à 9 personnels; des instances à 50 patients et disposant de 14 à 18 personnels sur un horizon d'une journée, et comportant une tranche horaire par qualification. Cette tranche horaire indiquées en minutes est égale à  $[0, 700]$  qui est équivalente à une journée de travail de 8h à 19h30. La durée des soins varie dans l'intervalle  $[10, 60]$ , la longueur des fenêtres de temps est entre 30 minutes et une heure et enfin les localisations géographiques sont générées aléatoirement sur un carré de  $100 \times 100$  et les distances  $d_{ij}$  sont les distances Euclidiennes entre deux localisations. Le PLNE est codé sous Cplex IBM solver version 12.6 et sur une machine avec les caractéristiques suivantes : Bi Xeon quad core 2,8 Ghz - 16 Go RAM - 8 cœurs.

## 3.4 Résultats expérimentaux

**Instances de type 1 :** Nous avons 200 instances avec 30 patients et 200 autres avec 50 patients, telles que chaque patient requière un seul soin. Le nombre de personnels varie de 7 à 9 pour les 200 premières instances et de 14 à 18 pour les 200 restantes, et le nombre de qualifications est égal à 3. Ces instances sont sur un horizon d'une journée. Rappelons que nous considérons deux objectifs différents :

$$\text{Objectif1} : \min \alpha_1 \sum_{k=1}^{|P|} y_k + \alpha_2 \sum_{i \in id_s} N_i \quad 3.29$$

$$\text{Objectif2} : \min \alpha_3 \sum_{k=1}^{|P|} \sum_{i=1}^{|S|+2|P|} \sum_{h=1}^{|S|+2|P|} \xi_{k,i,h} d_{ih} + \alpha_2 \sum_{i \in id_s} N_i \quad 3.30$$

Comme dans ce type d'instance la planification se fait sur une journée, le deuxième terme des deux objectifs 3.29 et 3.30 ne sera donc pas considéré.

**Instances à 30 services :** Sur les 200 instances, 3 ne disposent pas d'une solution réalisables. Dans le tableau 3.1 nous rapportons les résultats obtenus sur les 50 premières instances, les résultats obtenus pour les 200 instances sont rapportées sur le tableau A.1 qui est en annexe. Les résultats obtenus sont regroupés selon l'*objectif1* et l'*objectif2*. Les colonnes du tableau indiquent respectivement :

- le nombre total des personnels noté  $|id_p|$ ,
- la valeur de la relaxation continue (PL),
- le nombre des personnels actifs après la résolution noté  $\#id_p$  qui représente l'optimum pour l'*objectif 3.29* car le nombre de personnels actifs est à minimiser,
- la distance parcourue *dist* qui représente l'optimum pour l'*objectif2 3.30*,
- la taille moyenne des tournées *taille*,
- le temps de calcul en secondes.

On constate que pour l'*objectif1* la valeur de la relaxation continue est toujours égale à 3 et que le nombre de personnels actifs  $\#id_p$  varie entre 5 et 7 et plus ce nombre est grand moins les tournées sont chargées et leur taille moyenne varie entre 4 et 6 services. Les distances parcourues prennent la valeur minimale égale à 858 et la valeur maximale égale à 1804. Pour les résultats obtenus avec l'*objectif2*, on constate que le nombre de personnels actifs est plus grand que celui trouvé avec l'*objectif1*, il varie entre 6 et 9 personnels, les distances sont quant à elles beaucoup plus réduites. Ces dernières varient

Ins	id <sub>p</sub>	objectif 1					objectif 2				
		PL	#id <sub>p</sub>	dist	taille	temps	PL	#id <sub>p</sub>	dist	taille	temps
kA000	7	3	5	1108	6	104	188	6	571	5	65
kA001	7	3	6	988	5	106	284	6	736	5	68
kA002	8	3	6	1466	5	101	478	8	1188	3	65
kA003	7	3	6	1456	5	101	447	7	1039	4	65
kA004	6	3	5	1099	6	103	257	5	693	6	67
kA005	7	3	6	1203	5	102	294	6	808	5	67
kA006	9	3	6	1844	5	102	468	9	1202	3	64
kA007	7	3	7	1795	4	103	485	7	1039	4	66
kA008	8	3	7	1569	4	104	376	8	1088	3	65
kA009	7	3	5	1130	6	100	370	7	820	4	66
kA010	7	3	7	1767	4	118	234	7	1003	4	76
kA012	7	3	5	999	6	103	148	6	593	5	66
kA013	8	3	6	1506	5	102	364	6	909	5	66
kA014	6	3	6	1137	5	104	500	6	777	5	66
kA015	7	3	6	1272	5	103	303	7	675	4	65
kA016	7	3	6	1511	5	102	373	7	1093	4	66
kA017	8	3	7	1617	4	102	444	8	1202	3	66
kA018	9	3	7	1710	4	106	321	8	1032	3	68
kA019	8	3	6	1525	5	103	276	6	786	5	65
kA020	7	3	6	1405	5	102	374	7	1128	4	66
kA021	6	3	5	1116	6	104	154	6	656	5	66
kA022	8	3	6	1658	5	103	434	8	1046	3	64
kA023	7	3	5	1270	6	102	500	6	940	5	71
kA024	7	3	6	1205	5	103	406	7	898	4	66
kA025	7	3	6	1701	5	101	334	7	1053	4	65
kA026	7	3	6	1398	5	103	269	7	703	4	64
kA027	8	3	6	1470	5	101	460	7	1033	4	66
kA028	8	3	6	1458	5	102	451	8	960	3	65
kA029	7	3	6	1409	5	101	311	7	726	4	64
kA030	8	3	6	1770	5	102	544	8	1170	3	68
kA031	7	3	6	1403	5	102	287	7	745	4	66
kA032	8	3	5	858	6	103	182	7	680	4	67
kA033	8	3	5	1203	6	101	319	7	887	4	67
kA034	8	3	5	1129	6	105	278	6	633	5	67
kA035	7	3	5	1107	6	102	266	6	777	5	66
kA036	8	3	5	1491	6	106	324	7	1039	4	65
kA037	8	3	5	1503	6	101	297	8	874	3	66
kA038	8	3	5	1057	6	117	274	6	717	5	107
kA039	9	3	7	1459	4	104	282	8	950	3	68
kA040	7	3	5	1248	6	103	316	5	944	6	65
kA041	8	3	6	1346	5	113	462	8	1092	3	71
kA042	8	3	6	1804	5	103	367	7	1169	4	73
kA043	8	3	5	1332	6	103	286	7	893	4	67
kA044	8	3	6	1351	5	102	562	6	1064	5	64
kA045	7	3	5	1018	6	101	334	6	696	5	65
kA046	7	3	6	1418	5	102	527	6	852	5	66
kA048	7	3	6	1409	5	102	409	7	1034	4	67
kA049	8	3	6	1496	5	101	315	8	914	3	65

TABLE 3.1 – Résultats des instances à 30 services pour le PLNE

en moyenne de 571 à 1202. Pour ce qui est du temps de calcul, avec l'*objectif2* le programme met moins de temps qu'avec l'*objectif1*, mais ils restent tout deux rapides il ne dépassent pas les 2 minutes.

L'ensemble de ces instances sont résolues à l'optimum.

**Instances à 50 services :** Vue la difficulté du problème, avec les instances qui ont 50 services, le PLNE met beaucoup plus de temps pour trouver des solutions exactes. C'est pourquoi nous avons fixé le temps de calcul sur ces instances à 30 minutes. Dans le tableau 3.2 nous rapportons les résultats obtenus sur les 50 premières instances, les résultats obtenus pour les 200 instances sont rapportées sur le tableau A.2 qui est en annexe. En plus des critères rapportés dans le tableau 3.1, on rajoute une colonne dans laquelle nous rapportons une  $\star$  si le PLNE est résolu de manière exacte.

Comme pour les résultats précédents, on constate que pour l'*objectif1* la valeur de la relaxation continue est toujours égale à 3 et que le nombre de personnels actifs  $\#id_p$  varie entre 5 et 9 et plus ce nombre est grand moins les tournées sont chargées et leur taille moyenne varie entre 5 et 10 services. Les distances parcourues ont des valeurs qui tournent autour des 1800. Pour les résultats obtenus avec l'*objectif2*, on constate que le nombre de personnels actifs est beaucoup plus grand que celui trouvé avec l'*objectif1*, il varie entre 12 et 18 personnels, les distances sont quant à elles beaucoup plus réduites. Ces dernières ne dépassent pas les 500. Avec l'*objectif1* sur les 50 instances, le programme arrive à trouver des solutions exactes que pour 3 instances, au bout de 30 minutes le programme ne trouve pas de solution réalisable pour deux instances et enfin pour toutes les autres instances, le programme s'arrête car le temps limite est atteint et les solutions rapportées sont les meilleures solutions trouvées après 30 minutes de calcul. Par ailleurs, pour l'*objectif2* toutes les instances sont résolues à l'optimum et le temps de calcul ne dépasse pas les 3 minutes.

## 3.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fixé la définition, les notations ainsi que les contraintes du problème. Le modèle présenté est testé sur des instances définies pour une planification d'une journée. Ces dernières sont partagées en deux, celles avec 30 services et d'autres avec 50 services. Avec les instances à 30 services, la solution est atteinte au bout de 3 minutes de calcul. Par ailleurs, les instances ayant 50 services prennent beaucoup plus de temps et d'ailleurs au bout de 30 minutes de calcul la solution optimale est rarement trouvée avec l'*objectif1*.

Ins	id <sub>p</sub>	objectif 1						objectif 2					
		PL	#id <sub>p</sub>	dist	taille	temps	st	PL	#id <sub>p</sub>	dist	taille	temps	st
kA000	14	3	6	854	8	1810		1	12	56	4	120	*
kA001	14	3	8	936	6	1801		29	14	141	3	132	*
kA002	16	3	8	1443	6	1808		132	16	381	3	108	*
kA003	14	3	8	1292	6	1809		122	14	275	3	146	*
kA004	12	3	7	870	7	1800		104	12	176	4	119	*
kA005	14	3	8	993	6	1803		34	14	181	3	126	*
kA006	18	3	6	1268	8	1800		154	17	411	2	109	*
kA007	14	3	8	1328	6	1800		105	14	373	3	115	*
kA008	16	3	9	1483	5	1804		176	16	404	3	118	*
kA009	14	3	7	1166	7	1800		46	12	194	4	108	*
kA010	14	3	8	1361	6	1802		30	13	185	3	143	*
kA011	16	3	8	1237	6	1817		69	16	108	3	109	*
kA012	14	3	8	809	6	1802		47	14	113	3	138	*
kA013	16	3	8	997	6	1800		32	16	217	3	115	*
kA014	12	3	7	978	7	1814		41	12	192	4	139	*
kA015	14	3	7	1113	7	1801		58	13	148	3	113	*
kA016	14	3	7	1301	7	1800		62	14	223	3	126	*
kA017	16	3	8	1239	6	1800		76	15	327	3	133	*
kA018	18	3	9	1881	5	1806		75	18	292	2	114	*
kA019	16	3	8	1367	6	1808		110	16	247	3	129	*
kA020	14	3	8	1452	6	1825		163	14	275	3	119	*
kA021	12	3	5	864	10	234	*	61	11	231	4	115	*
kA022	16	3	7	1322	7	1805		174	15	443	3	107	*
kA023	14	3	7	1086	7	1819		67	14	196	3	133	*
kA024	14	3	7	845	7	1807		150	14	168	3	110	*
kA025	14	3	7	1593	7	1818		103	14	447	3	123	*
kA026	14	3	8	1545	6	1814		65	13	319	3	165	*
kA027	16	3	7	1087	7	1812		82	15	149	3	112	*
kA028	16	3	7	1180	7	1800		90	15	310	3	114	*
kA029	14	3	8	1164	6	1800		124	13	228	3	113	*
kA050	16	3	8	1534	6	1837		221	15	474	3	131	*
kA031	14	3	7	1177	7	1814		97	14	279	3	115	*
kA032	16	3	7	879	7	1801		32	15	172	3	122	*
kA033	16	3	6	968	8	75	*	53	14	279	3	130	*
kA034	16	3	7	1407	7	1810		39	16	185	3	130	*
kA035	14	3	6	1148	8	1808		51	14	108	3	116	*
kA036	16	3	8	1667	6	1811		52	15	187	3	120	*
kA037	16	3	7	1117	7	1020	*	58	16	174	3	116	*
kA038	16	-	-	-	-	-	-	10	15	56	3	161	*
kA039	18	3	7	1260	7	1800		82	15	272	3	127	*
kA040	14	3	8	1108	6	1822		47	14	236	3	108	*
kA041	16	3	8	1302	6	1816		130	14	249	3	109	*
kA042	16	3	7	1291	7	1814		131	13	253	3	130	*
kA043	16	3	8	1580	6	1803		137	15	205	3	132	*
kA044	16	3	9	1782	5	1820		188	16	474	3	108	*
kA045	14	3	8	1003	6	1840		42	13	151	3	119	*
kA046	14	3	7	1001	7	1800		71	13	238	3	123	*
kA047	14	-	-	-	-	-	-	102	15	208	3	117	*
kA048	14	3	7	991	7	1830		80	13	192	3	112	*
kA049	16	3	6	1116	8	1803		43	15	203	3	114	*

TABLE 3.2 – Résultats des instances à 50 services pour le PLNE



---

En ce qui concerne la planification sur un horizon plus étendu, le problème se complique davantage et sa taille devient de plus en plus grande, ce qui naturellement entraîne un temps de calcul plus important. En effet, pour les instances dont nous disposons qui sont définies pour un horizon de 14 jours, le PLNE met au moins une heure pour charger le modèle. Par conséquent, dans le chapitre suivant nous proposons une matheuristique capable de trouver de bonnes solutions au bout d'un temps raisonnable que ce soit sur une planification d'une journée ou un horizon plus long.



# Matheuristique

---

## 4.1 Introduction

Ce chapitre présente une méthode de résolution heuristique qui combine un algorithme glouton, la programmation dynamique et la programmation mathématique. L'horizon de planification considéré est une journée  $t \in H$ , toutefois, la planification sur un horizon plus étendu sera étudiée dans le prochain chapitre. Dans un premier temps, nous présentons les motivations qui nous ont conduit à choisir une méthode heuristique, puis nous aborderons plus en détails le principe de la méthode. Enfin, la méthode sera testée sur les instances définies dans le chapitre 3, et nous effectuerons une comparaison des résultats avec ceux obtenus par le PLNE.

## 4.2 Motivations

L'objet de notre étude est de résoudre une combinaison de deux problèmes connus pour être NP-difficiles. Comme pour tous les problèmes NP-difficiles, l'obtention d'une solution optimale prend beaucoup de temps voir peut s'avérer impossible, c'est pourquoi la recherche d'une méthode qui permet de trouver en un temps raisonnable une solution de bonne qualité est l'une des principales préoccupations des spécialistes du domaine. Pour cela, les chercheurs s'appuient généralement sur les heuristiques de recherche de voisinages, la génération de colonnes, etc qui sont connues pour être efficaces en terme de temps de résolution. Notre approche se distingue des autres méthodes utilisées dans la littérature pour résoudre le RP-HAD en s'appuyant sur des modèles mathématiques durant plusieurs phases de détermination de la solution.

Dans la littérature, la plupart des auteurs ont étudié le problème sur une journée de planification, ceci conduit à une concentration sur le problème de routage. C'est pourquoi dans un premier temps nous nous sommes restreints à une journée de planification. Par ailleurs, l'étude du problème de planification sur une journée implique la suppression de certaines contraintes. Ces dernières sont liées soit à la succession des journées de travail (ou de repos) des personnels, soit à la fidélité des personnels aux patients tout au long de

l'horizon de planification. Ainsi le PLNE présenté dans le chapitre 3 se simplifie en supprimant les contraintes 3.24, 3.26, 3.27 et 3.28. Par conséquent, les deux fonctions objectif définies dans le chapitre précédent deviennent

$$\text{Objectif1} : \min \alpha_1 \sum_{i=1}^{|P_t|} y_i \quad (4.1)$$

$$\text{Objectif2} : \min \alpha_3 \sum_{i=1}^{|P_t|} \sum_{k=1}^{|S_t|+2|P_t|} \sum_{h=1}^{|S_t|+2|P_t|} \xi_{i,k,h} d_{kh} \quad (4.2)$$

La matheuristique est basée sur une décomposition du problème en deux. Le premier problème représente le problème de routage qui est similaire au problème du voyageur de commerce avec fenêtres de temps et dépôts multiples (multi Travelling Salesman Problem with Time Windows, mTSPTW). Le deuxième problème est un problème de partitionnement, il représente la partie planification de notre problème. La matheuristique commence par affecter les personnels aux tranches horaires de manière fictive, puis résout le routage des personnels et enfin résout la planification des personnels, elle alterne entre ces deux derniers jusqu'à ce qu'une solution soit trouvée.

### 4.3 Affectation des personnels aux tranches horaires

Les différentes affectations des personnels aux tranches horaires peuvent se déduire dans les plannings de chaque personnel. En effet, les intervalles de temps durant lesquels les personnels effectuent leurs tournées doivent obligatoirement s'accorder avec les fenêtres de temps des tranches horaires. C'est pourquoi, nous avons remplacé chaque personnel de  $P_t$  par un ensemble de personnels, tel que ces derniers aient des fenêtres de temps qui s'accordent avec les fenêtres de temps des tranches horaires. Ainsi, les personnels de  $P_t$  seront représentés par ces ensembles de personnels que nous allons regrouper dans un même ensemble noté  $P'_t$ . Nous avons employé le mot affectation fictive (provisoire), car un personnel de  $P_t$  sera définitivement affecté à une tranche horaire donnée, si et seulement si, le personnel qui le représente dans  $P'_t$  et qui a une fenêtre de temps qui s'accorde avec celle de la tranche horaire considérée est pris dans la solution finale de notre problème. Afin de mieux comprendre la démarche nous illustrons l'exemple défini sur la figure 4.1

Nous considérons un personnel  $k$  dans  $P_t$  dont la fenêtre de temps est égale à  $[9, 20]$ . Soient  $[8, 12]$ ,  $[12, 18]$  et  $[18, 00]$  les fenêtres de temps respectives de la tranche horaire du matin, de la tranche horaire de l'après-midi et enfin de

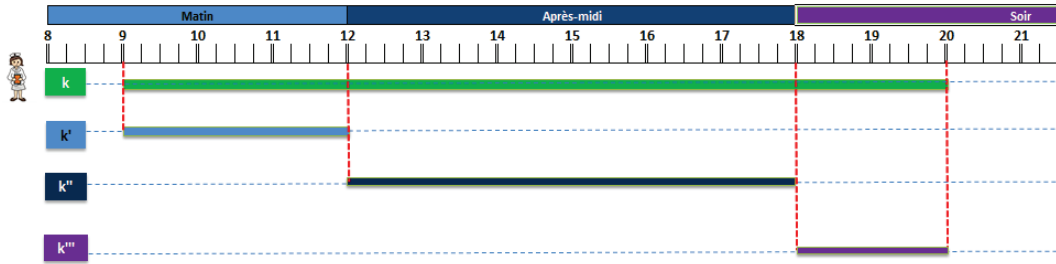


FIGURE 4.1 – Exemple

celle du soir. Dans  $P_t'$  le personnel  $k$  sera représenté par trois personnels  $k'$ ,  $k''$  et  $k'''$  dont les fenêtres de temps respectives égalent  $[9,12]$ ,  $[12,18]$  et  $[18,20]$ . Ainsi si le personnel  $k'$  est pris dans la solution, alors le personnel  $k$  est affecté à la tranche horaire du matin.

## 4.4 Routage des personnels

Dans notre démarche les résultats de la partie routage des personnels forment des ensembles de tournées. Ils constituent les données pour le problème de planification tel que chaque tournée va former une journée de travail pour un personnel. On considère plusieurs contraintes spécifiques à l'HAD dans la planification ce qui demande de diversifier au mieux les tournées afin de garantir l'existence d'une solution réalisable. Les tournées doivent être de tailles différentes et doivent contenir des services différents. Par exemple chacun des services doit appartenir à au moins une tournée, les services qui composent les tournées doivent varier d'une tournée à une autre.

Le problème de routage étant connu pour être NP-difficile, nous avons opté pour une heuristique permettant d'obtenir rapidement des résultats. Cette dernière est basée sur la méthode «clusters-first, route-second». Celle-ci consiste à partitionner l'ensemble des services en clusters non-disjoints, puis à résoudre un problème de tournée pour chaque cluster. Cette méthode est une des heuristiques les plus connues. Elle est basée sur une approche géométrique qui permet de former des groupes de clients, puis des tournées avec ces groupes de clients.

Plusieurs méthodes du type «clusters-first, route-second» ont été proposées dans la littérature. Une de ces méthodes est l'algorithme de balayage (sweep) dû à Gillett et Miller [Gillett and Miller, 1974]. Des clusters qui respectent les capacités des véhicules ainsi que les tailles moyennes des tournées sont créés en balayant un rayon centré autour du dépôt et en incluant

des clients un à un dans un cluster tant que la capacité du véhicule et la taille moyenne d'une tournée n'est pas dépassée. Le processus est répété tant que les clients ne sont pas encore tous affectés à des véhicules et que toute la surface n'est pas encore balayée. Puis, à l'intérieur de chaque cluster des routes sont construites en résolvant les TSP correspondants. Une extension naturelle de l'algorithme de balayage est de générer plusieurs routes, appelées pétales [Ryan et al., 1993], après lequel on résout un problème de partitionnement (set partitioning problem) pour trouver la solution finale. Un autre algorithme de type «cluster-first, route-second» est présenté dans [Fisher and Jaikumar, 1981]. Il consiste à résoudre un problème d'affectation (Generalized Assignment Problem (GAP)) pour créer les clusters, le nombre de véhicules est fixé à  $K$ .

Notre heuristique est donc constituée de deux phases, dans la première phase, deux méthodes sont utilisées pour obtenir les clusters. Tandis que dans la deuxième phase, des tournées sont construites.

#### 4.4.1 Clusterisation de l'ensemble des services

Il existe de nombreuses définitions du mot cluster. Dans notre cas on va définir un cluster comme un ensemble de services de même qualification, que l'on a regroupé en estimant qu'ils puissent former une tournée réalisable.

Le but de cette étape dans la matheuristique est de définir des sous-ensembles de services (clusters) que l'on va noter  $S^1, S^2, S^3, \dots \subseteq S_t$  de sorte que l'on puisse former des tournées réalisables pour les différents personnels de  $P'_t$ . Chaque service dans  $S_t$  doit appartenir à au moins un cluster, ceci implique que l'union des clusters est exactement l'ensemble  $S_t$ .

Dans notre problématique, un personnel peut effectuer uniquement les services pour lesquels il est qualifié, c'est pourquoi, dans cette étape, l'ensemble des services  $S_t$  est disjoint en sous-ensembles  $S_t^l, l \in Q$ , et l'ensemble des personnels  $P'_t$  disjoint en  $P_t^l, l \in Q$ .

Afin de diversifier au mieux les tournées, nous avons utilisé deux méthodes différentes pour construire les clusters. Ainsi nous obtenons des sous-ensembles différents ce qui permet d'obtenir un grand nombre de tournées réalisables, de bonnes qualité et diversifiées.

##### 4.4.1.1 Méthode basée sur la m-coupe-maximale

Avant de présenter la méthode, nous avons besoin de donner quelques définitions. Rappelons que le problème de la coupe maximale dans un graphe non orienté peut se formuler sous la forme suivante :

**Données :** un ensemble de sommets  $X = \{1, \dots, n\}$ , et des poids  $w_{ij}(i, j = 1, \dots, n)$  sur les arêtes du graphe complet non orienté sur  $X$ .

**Questions :** trouver une partition  $\{A, B\}$  de  $X$  qui maximise

$$\sum_{i \in A, j \in B} w_{ij}$$

Le problème est NP-difficile [Karp, 1972]. Par ailleurs, la multi-coupe maximale (m-coupe-maximale) est une généralisation de la coupe maximale, le but est de trouver non pas une partition en deux sous ensembles mais en plusieurs de manière à ce que la somme des poids des arêtes séparant ces sous ensembles soit de valeur maximale.

Le but de cette étape étant de construire des clusters de services ; nous nous sommes inspirés du problème de la m-coupe-maximale de manière à partitionner l'ensemble des services en plusieurs sous ensembles, afin que ces derniers puissent nous donner des tournées réalisables. Pour se faire nous définissons le graphe suivant : soit  $S_t^l$  un sous-ensemble de services de qualification  $l$ . On définit un graphe complet non orienté  $G = (S_t^l, E)$ , où  $E$  est l'ensemble d'arêtes tel que  $E = \{e = (i, j) : i \in S_t^l, j \in S_t^l, i \neq j\}$ . Chaque arête  $e = (i, j)$  a un coût  $CH_{ij}$  qui est le chevauchement entre les deux fenêtres de temps des services  $i$  et  $j$ .  $CH_{ij} = \infty$  si les deux services  $i$  et  $j$  ne sont pas compatibles<sup>1</sup>.

Le principe consiste donc à séparer deux services ayant un grand chevauchement de fenêtres de temps ou deux services qui ne sont pas compatibles<sup>1</sup> dans deux sous-ensembles différents.

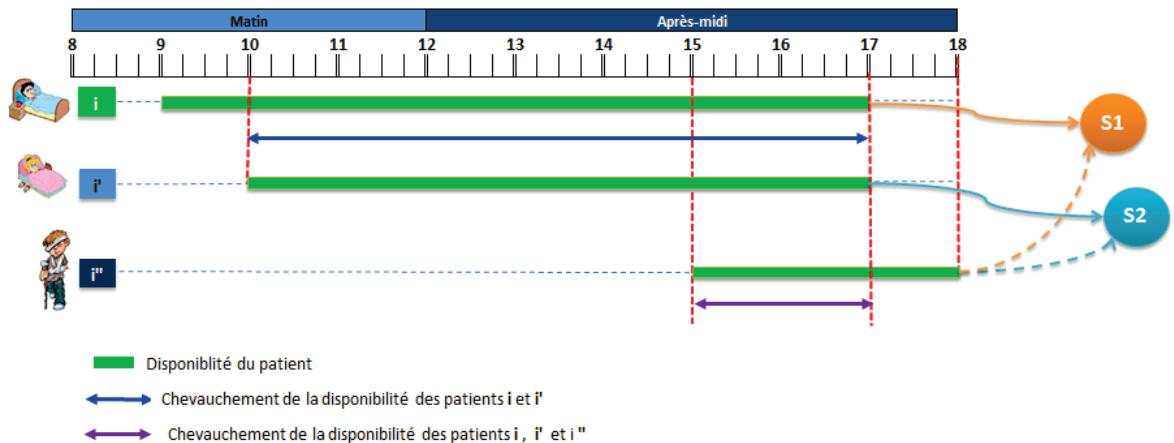


FIGURE 4.2 – m-coupe-max

1. Deux services  $i$  et  $j$  ne sont pas compatibles si et seulement si le service  $i$  ne peut pas précéder le service  $j$  et le service  $j$  ne peut pas précéder le service  $i$ .

Dans la figure 4.2, trois services sont considérés avec des fenêtres de temps différentes, les deux premiers services ont des fenêtres de temps qui se chevauchent de beaucoup, la première égale  $[9h, 17h]$  et la deuxième est  $[10h, 17h]$ ; l'idée est de mettre les deux services dans des sous ensembles différents,  $i$  dans le sous ensemble  $s1$  et  $i'$  dans  $s2$ . Par ailleurs, le service  $i''$  a le même chevauchement avec les deux services  $i$  et  $i'$ , qui est petit, alors le service  $i''$  peut être mis dans  $s1$  ou  $s2$ . Cette méthode maximise la probabilité d'avoir des tournées réalisables avec les sous-ensembles de services obtenus.

L'algorithme 1 est un algorithme glouton qui procède par la coloration des nœuds telle que les nœuds ayant la même couleur appartiennent au même sous-ensemble.

---

**Algorithme 1** Clusterisation basée sur la m-coupe-maximale

---

**Données** :  $G = (S_t^l, E)$ ,  $CH_{ij} \forall (i, j) \in E$

**Arête de coût min** : déterminer l'arête  $(i', j') \in E$  telle que  $CH_{i'j'} = \min(P_{ij}, i \in S_t^l, j \in S_t^l)$ .

**Coloration** des deux nœuds  $i'$  et  $j'$  :

1. **Si** ( $CH_{i'j'} \neq \infty$ )
  - Supprimer l'arête  $(i', j')$ .
  - **Si**  $i'$  et  $j'$  ne sont pas encore colorés, colorer  $i'$  et  $j'$  avec une nouvelle couleur.
  - **Si** l'un des nœuds  $i'$  ou  $j'$  est coloré, colorer le nœud non encore coloré avec la même couleur que le nœud coloré, aller à **Fusion**.
- Fin Si**
2. **Si** ( $CH_{i'j'} = \infty$ )
  - Supprimer l'arête  $(i', j')$ .
  - **Si**  $i'$  et  $j'$  ne sont pas encore colorés, colorer  $i'$  et  $j'$  avec deux nouvelles couleurs.
  - **Si** l'un des nœuds  $i'$  ou  $j'$  est coloré, colorer le nœud non encore coloré avec une nouvelle couleur.

**Fin Si**

**Fusion** : fusionner les nœuds  $i'$  et  $j'$  en un seul nœud. Remplacer toutes les arêtes parallèles (i.e. les arêtes ayant des nœuds en commun) liées aux nœuds  $i'$  et  $j'$  par une seule arête avec un coût égal à la somme des coûts de ces arêtes.

**Critère d'arrêt** : l'algorithme termine quand tous les nœuds sont colorés.

---



#### 4.4.1.2 Méthode basée sur le *mTSPTW* et le *bin-packing*

La méthode que nous allons définir s'appuie sur deux problèmes connus dans la littérature : le problème du multi-voyageur de commerce avec fenêtres de temps (*mTSPTW*, multi Travelling Salesman Problem with Time Windows) (voir la sous section 2.2.2) et le problème de *bin – packing*.

Par ailleurs, avant de présenter la méthode nous allons donner les principales motivations qui nous ont conduit à sa construction.

**Motivations :** La partie routage du problème que nous étudions se rapproche du multi-voyageur de commerce avec fenêtres de temps (*mTSPTW*, multi Travelling Salesman Problem with Time Windows). Soit un graphe orienté défini par un ensemble de sommets représentant les services et les personnels. Ces derniers forment respectivement les clients et les dépôts (voyageurs) dans le *mTSPTW* classique. Entre chaque paire de sommets, un arc représente une liaison entre les services et entre les services et les personnels. Chaque arc  $(i, j)$  est muni d'un poids, qui est égal à la distance du trajet entre les deux sommets  $i$  et  $j$ . Trouver une solution au problème revient à déterminer les tournées des véhicules (personnels) tels que tous les sommets doivent être traversés exactement par un seul véhicule ce qui traduit une des contraintes de notre problématique qui est d'effectuer un service par exactement un personnel. Nous pouvons facilement en déduire qu'il s'agit du problème multi-voyageurs de commerce avec des contraintes supplémentaires : fenêtres de temps, plusieurs dépôts car chaque personnel commence sa journée de travail depuis son domicile, un voyageur ne peut pas passer par tous les sommets du graphe ce qui implique la prise en compte du type de véhicule ceci est dû aux qualifications des services et des personnels.

Pour pouvoir utiliser le *mTSPTW* comme modélisation à ce problème il nous faut connaître le nombre de véhicules, mais nous n'avons pas de contrainte sur le nombre de personnels à affecter à l'hospitalisation à domicile (la valeur du  $m$  n'est pas connue). C'est pourquoi dans notre démarche nous allons d'abord estimer le nombre de personnels nécessaire pour effectuer tous les services ce qui va nous donner la valeur du  $m$  dans le problème du *mTSPTW*. Pour cela nous allons utiliser le problème de *bin – packing*.

**Problème du *bin-packing* :** Soit un ensemble de boîtes identiques de même capacité et un ensemble d'objets munis de poids. Combien faudra-t-il au minimum de boîtes pour y ranger l'ensemble des objets considérés ? Ce problème a fait l'objet depuis plusieurs années d'une attention croissante pour deux raisons : outre son intérêt théorique, il a de nombreuses applications. On trouve le problème essentiellement dans l'industrie, le problème de découpe

de bois ou de verre. On peut citer plusieurs applications moins courantes telles que les caisses des supermarchés, lorsque l'on veut sauvegarder sans les couper un ensemble de fichiers sur des supports identiques (des Clouds) ou encore lorsqu'il s'agit de répartir un ensemble de flux sur différents canaux comme les fibres optiques par exemple. Le problème de bin-Packing a été abordé dès les années 50 par de nombreux chercheurs, parmi les différents travaux connus dans la littérature nous citons [?],[Gilmore and Gomory, 1965], [Berkey and Wang, 1987] et [Clautiaux et al., 2007]. .

Étant donné que nous cherchons une estimation de  $m$ , le problème du *bin – packing* ne sera pas résolu de manière exacte, mais nous allons nous contenter de calculer une borne inférieure.

**Borne inférieure du *bin-packing*** Pour chaque qualification donnée  $l$ , la solution du problème de *bin – packing* constitue une borne inférieure pour notre problème dans le cas du premier objectif (*objectif1*). En effet, nous cherchons le nombre minimal de personnels nécessaire pour effectuer l'ensemble des services, nous savons que si un personnel effectue un certain nombre de services, alors la durée globale de sa tournée doit être comprise dans sa fenêtre de temps. C'est pourquoi, nous pouvons considérer la boîte du problème de *bin – packing* comme étant la fenêtre de temps du personnel, avec une capacité égale à sa largeur. Chaque service peut être considéré comme un objet à mettre dans une boîte (fenêtre de temps d'un personnel) dont le volume est égal à sa durée de service. Cependant, la durée d'une tournée n'est pas uniquement égale à la somme des durées des services car entre deux services qui se suivent dans la tournée il y a une durée de trajet.

Afin de prendre en considération la durée de toute la tournée qu'effectue un personnel, nous devons rajouter au volume de chaque objet (service) la durée du trajet entre ce dernier et le service qui le suit dans la tournée. Mais, à cette étape, aucun ordre de tournées n'est connu pour aucun des personnels, nous disposons uniquement d'un ensemble de services qui doivent être affectés à un ensemble de personnels. C'est pourquoi dans le calcul de cette borne nous considérons comme volume de chaque objet (service), sa durée de service à laquelle nous rajoutons la durée du plus court trajet entre ce service et les services restants. Pour ce qui est des boîtes (fenêtres de temps des personnels), dans notre cas, elle ne sont pas identiques, car les fenêtres de temps des personnels sont de largeurs différentes. Afin d'y remédier, les boîtes sont supposées être identiques, et de largeur égale à la plus large fenêtre de temps des personnels  $P_t^l$ . Ainsi le calcul de cette borne inférieur se fait avec l'équation 4.3,

$$lb1_l = \left\lceil \frac{\sum_{i \in S_t^l} (D_i + \min_{j \in S_t^l} (d_{i,j}))}{l_k - e_k - \min_{j \in S_t^l} (d_{k,j})} \right\rceil \quad (4.3)$$

Le personnel  $k$  est choisi dans  $P_t^l$  tel que  $k$  est le personnel de santé de qualification  $l$  ayant la plus large fenêtre de temps.

$lb1_l$  est un minorant du nombre de personnels nécessaire pour effectuer tous les services. Maintenant que nous avons estimé la valeur des m-voyageurs du problème du  $mTSPTW$ , nous pouvons passer à sa résolution.

**Borne inférieure du  $mTSPTW$**  Les clusters que nous voulons obtenir vont former des tournées pour les personnels de santé, nous cherchons donc dans cette étape à construire des tournées avec les services de l'ensemble  $S_t^l$ , telles que ces tournées soient affectées à un sous-ensemble de personnels qui est inclus dans l'ensemble  $P_t^l$ . La cardinalité du sous-ensemble de personnels est égale à  $lb1_l$ . Ce problème est le  $mTSPTW$  que nous allons définir comme un  $TSPTW$  et ceci en considérant les personnels comme des services (clients). La matrice des coûts sera modifiée de manière à obtenir une tournée par personnel, ainsi le  $TSPTW$  est alors défini comme suit :

Soit  $I$  l'ensemble des personnels de santé dont les qualifications correspondent à  $l$ , tel que  $|I| = lb1_l$ , et  $S' = S_t^l \cup I$ . Le problème est défini sur le graphe  $G = (S', A)$  où l'ensemble des arcs est  $A = \{(i, j) : i \in S', j \in S', i \neq j\}$ . Chaque arc  $(i, j) \in A$  est muni d'un coût égal à  $D_i + d_{ij}$ . De plus,  $p_i$  est la variable représentant l'heure d'arrivée au nœud  $i$ , la variable  $x_{ij}$  égale 1 si le service  $i$  précède le service  $j$  dans la tournée. Ainsi nous pouvons écrire la formulation suivante :

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i,j \in S' \times S'} (D_i + d_{ij})x_{ij} \\ \text{s.c.} \quad & \sum_{i \in S'} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in S' \quad (4.4) \end{aligned}$$

$$\sum_{j \in S'} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in S' \quad (4.5)$$

$$M(1 - x_{ij}) \geq p_i + D_i + d_{ij} - p_j \quad \forall i, j \in S' \times S' \quad (4.6)$$

$$e_i \leq p_i \leq l_i \quad \forall i \in S' \quad (4.7)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in S' \times S'$$

**Remarque 2** La détermination des personnels considérés dans l'ensemble  $I$  se fait en classant les personnels de  $P_t^l$  dans l'ordre décroissant des largeurs de leurs fenêtres de temps, puis en choisissant les  $lb_1$  premiers personnels.

Étant donné le  $TSPTW$ , il suffit de relâcher l'ensemble des contraintes de fenêtres de temps (4.7) pour obtenir la formulation du  $TSP$  définie par les équations (4.4), (4.5) et (4.6). Le  $TSP$  est un problème NP-difficile, une relaxation est nécessaire pour obtenir un problème dont la solution optimale sera trouvée en un temps polynomial, parmi les relaxations connues pour les problèmes de routage, on peut citer le problème d'affectation qui est défini par les équations (4.4) et (4.5). Dans le problème d'affectation considéré, la relaxation des contraintes de fenêtres de temps et des contraintes de précédences du problème  $TSPTW$  se fait en les rajoutant partiellement dans la fonction objectif, ceci se fait de la manière définie dans [Wolfler Calvo, 2000].

Soit  $W_{ij} = \max(e_j - d_{ij} - D_i - e_i, 0)$  le temps d'attente (a priori) entre  $i$  et  $j$ . Pour obtenir des solutions exploitables, il est nécessaire de faire attention aux contraintes sur les fenêtres de temps 4.7. La partie gauche de cette dernière ( $e_i \leq p_i$ ) donne le temps d'attente chez le client  $i$ . Tandis que la partie de droite ( $p_i \leq l_i$ ) assure que la solution soit réalisable. Soit le problème auxiliaire suivant :

$$\min \quad \sum_{i \in S'} p_i \quad (4.8)$$

$$\text{s.c.} \quad \sum_{i \in S'} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in S' \quad (4.4)$$

$$\sum_{j \in S'} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in S' \quad (4.5)$$

$$p_i \in \mathbb{N} \quad \forall i \in S'$$

Pour que ce problème se rapproche plus d'un problème d'affectation, il est nécessaire de faire apparaître les variables  $x_{ij}$  dans la fonction objectif. Pour ce faire, les auteurs ont commencé par considérer une solution  $X = \{(i, j) \in A : x_{ij} = 1\}$ . Ainsi la contrainte 4.6 devient

$$p_j \geq p_i + D_i + d_{ij}$$

En utilisant le fait que  $e_j \leq p_j$ ,

$$\begin{aligned} p_j &\geq \max(p_i + D_i + d_{ij}, e_j) \\ &\geq \max(e_i + D_i + d_{ij}, e_j) = e_i + D_i + d_{ij} + W_{ij} \end{aligned}$$

Ainsi la fonction objectif 4.8 devient

$$\sum_{(i) \in X} e_i + \sum_{(i) \in X} D_i + \sum_{(i,j) \in X} d_{ij} + \sum_{(i,j) \in X} W_{ij}$$

En considérant maintenant le cas général, i.e.,  $\forall i, j \in S'$ , la fonction objectif devient

$$\min \left( \sum_{i,j \in S' \times S'} (D_i + d_{ij})x_{ij} + \sum_{i,j \in S' \times S'} W_{ij}x_{ij} \right)$$

Le problème d'affectation est alors défini comme suit :

$$(P1) \quad \min \sum_{i,j \in S' \times S'} (D_i + d_{ij} + W_{ij})x_{ij} \quad (4.9)$$

$$\text{s.c.} \quad \sum_{i \in S'} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in S' \quad (4.10)$$

$$\sum_{j \in S'} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in S' \quad (4.11)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in S' \times S'$$

La fonction objectif (4.9) minimise donc la durée totale de travail de chaque personnel, les contraintes (4.10) et (4.11) assurent respectivement que chaque service soit précédé et suivi par un et un seul autre service.

Donc comme pour le problème de *bin – packing*, nous n'allons pas résoudre le *mTSPTW* de manière exacte, mais nous allons résoudre un problème d'affectation qui constitue une borne inférieure au *mTSPTW*.

Soit  $X^*$  la solution optimale obtenue en résolvant le problème d'affectation via un algorithme défini dans [Wolfer Calvo, 2000]. La solution  $X^*$  se présente sous forme de séquences de services affectées à chaque personnel  $k$  considéré dans l'ensemble  $I$ . Nous remarquons que nous pouvons utiliser cette solution pour améliorer la borne inférieure  $lb1_l$ . Effectivement avec les séquences données nous avons une estimation plus réaliste pour les volumes des objets dans le problème de bin-packing. Ainsi la nouvelle borne peut être calculée comme suit :

$$lb2_l = \left\lceil \frac{\sum_{i,j \in S'_l \times S'_l} (D_i + x_{ij}^* \times d_{ij})}{l_k - e_k - \sum_{j \in S'_l} x_{k,j}^* d_{k,j}} \right\rceil.$$

Comme pour le calcul de  $lb1_l$ ,  $k$  est l'indice du personnel ayant la plus grande fenêtre de temps.

**Remarque 3** *Après une meilleure estimation du nombre de personnels nécessaires pour couvrir tous les services, nous faisons appel au problème d'affectation, en parcourant toutes les valeurs de  $|I|$  comprises entre  $lb1_l$  et  $lb2_l$ . Ceci permet de diversifier encore plus les sous-ensembles de services obtenus.*

Les problèmes d'affectation nous fournissent un nombre de séquences et de sous séquences de services pour chaque personnel considéré dans les ensembles  $I$ . Afin de répondre à notre objectif de départ, qui est de construire des clusters pouvant nous donner des tournées réalisables, pour chacune de ces séquences, nous regroupons les services qui la composent dans un même ensemble  $S^i$ . A partir de ce dernier, nous construisons d'autres sous-ensembles de services, et ceci en rajoutant à l'ensemble  $S^i$  les services qui composent les sous séquences liées au même personnel qui effectue la séquence considérée. Ainsi, nous obtenons des sous-ensembles de services  $S^1, S^2, S^3, \dots$  que nous allons utiliser pour construire l'ensemble de tournées. Le pseudo algorithme 2 résume cette méthode.

---

**Algorithme 2** Méthode basée sur le *mTSPTW* et le *bin-packing*

---

**Entrées:**  $G = (S_t^l, E), P_t^l$

1. Calculer  $lb1_l$
  2. Résoudre (P1) avec  $|I| = lb1_l$
  3. Calculer  $lb2_l$  en utilisant  $X^*$  obtenue en 2
- pour**  $|I|$  allant de  $lb1_l$  à  $lb2_l$  **faire**
- a. Résoudre (P1)
  - b. Construire les clusters  $S^i$  en regroupant les services des séquences et sous séquences obtenues en a
- fin pour**
- 

## 4.4.2 Construction des tournées

Rappelons que nous disposons de plusieurs clusters (sous-ensembles de services) obtenus lors de la clusterisation de l'ensemble des services, avec lesquels nous souhaitons construire des tournées réalisables pour les personnels de santé. Naturellement, nous avons associé ce problème au TSPTW, tel que chaque cluster sera associé à des personnels de  $P_t'$ , dont les qualifications sont égales à la qualification des services qui appartiennent au sous-ensemble considéré, et ceci dans le but de construire des tournées réalisables.

### 4.4.2.1 Détermination des tournées via le TSPTW

Soit  $S^k, k \in P_t'$  un cluster pouvant être servi par le personnel  $k$ , et  $S'' = S^k \cup \{k\}, k \in P_t'$ . Le TSPTW est défini sur un graphe orienté noté  $G = (S'', A)$ , tel que l'ensemble des arcs est  $A = \{(i, j) : i \in S'', j \in S'', i \neq j\}$ . Chaque arc  $(i, j)$  est muni d'un coût  $d_{ij}$  représentant la distance entre les nœuds  $i, j$ . Les services de l'ensemble  $S^k$  sont définis par une durée  $D_i, \forall i \in S^k$ , le nœud

$k$  qui représente le personnel a une durée nulle. De plus,  $p_i$  est la variable représentant l'heure d'arrivée au nœud  $i$ , la variable  $x_{ij}$  égale 1 si le service  $i$  précède le service  $j$  dans la tournée. Ainsi nous pouvons écrire la formulation suivante :

$$(P2) \quad \min \sum_{i,j \in S''} x_{ij} d_{ij}$$

$$\text{s.c.} \quad \sum_{i \in S''} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in S'' \quad (4.12)$$

$$\sum_{j \in S''} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in S'' \quad (4.13)$$

$$e_i \leq p_i \leq l_i \quad \forall i \in S'' \quad (4.14)$$

$$p_j \geq x_{ij}(p_i + D_i + d_{ij}) \quad \forall i, j \in S'' \quad (4.15)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in S'' \quad (4.16)$$

(P2) est résolu avec un algorithme basé sur la programmation dynamique et qui est proposé dans [Righini and Salani, 2009], ceci pour chaque cluster généré à l'étape précédente.

**Remarque 4** *Comme le problème d'affectation (P1) est une borne inférieure du mTSPTW et les personnels considérés sont les personnels dont les fenêtres de temps sont les plus larges, les sous-ensembles de services ne forment pas forcément des tournées réalisables avec les différents personnels. Par conséquent, le TSPTW ne trouve pas dans tous les cas de solution réalisable.*

#### 4.4.2.2 Détermination des tournées via le *Prize Collecting* TSPTW (*PCTSPTW*)

Pour construire le plus de tournées possibles, nous avons utilisé le *PCTSPTW* pour construire les tournées. L'avantage avec ce problème, est que le personnel n'est pas obligé de passer par tous les services du sous-ensemble considéré, mais il passe par un maximum de services possibles de manière à ne pas violer sa fenêtre de temps. Il existe peu de recherche sur le *PCTSPTW*, notamment à cause de sa complexité. Nous pouvons trouver dans la littérature les travaux de Bar Yehuda et al. (voir [Bar-Yehuda et al., 2005]) qui présentent un algorithme d'approximation ( $\mathcal{O}(n \log(n))$ ) ou encore Zhang et Tang (voir [Zhang and Tang, 2007]) qui quant à eux ont utilisé les réseaux de neurones artificiels comme approche de résolution. Enfin Casazza et al. (voir [Casazza et al., 2013]) ont élaboré un algorithme de résolution basé sur la programmation dynamique que nous avons utilisé pour résoudre notre problème de *PCTSPTW*.

On peut formuler le *PCTSPTW* de la manière suivante : Soit  $b_i$  qui vaut 1 si le service  $i$  est dans la solution (tournée), et vaut 0 sinon.  $pn_i$  est une p enalt e à payer si le service  $i$  n'est pas pris dans la solution. L'objectif de ce problème est de minimiser la p enalt e totale pour les services non visités.

$$(P3) \quad \min \quad \sum_{i \in S''} pn_i(1 - b_i)$$

$$\text{s.c.} \quad \sum_{i \in S''} x_{ij} \leq 1 \quad \forall j \in S'' \quad (4.17)$$

$$\sum_{j \in S''} x_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in S'' \quad (4.18)$$

$$e_i \leq p_i \leq l_i \quad \forall i \in S'' \quad (4.19)$$

$$M(1 - x_{ij}) \geq p_i + D_i + d_{ij} - p_j \quad \forall i, j \in S'' \times S'' \quad (4.20)$$

$$\sum_{j \in S'' \setminus i} x_{ij} = b_i \quad \forall i \in S'' \quad (4.21)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in S'' \times S'' \quad (4.22)$$

$$b_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in S'' \quad (4.23)$$

Les contraintes (4.17) et (4.18) veillent respectivement à ce que chaque service, soit pr ec ed e et suivi par au plus un service. Les contraintes (4.19) représentent la fenêtre de temps de chaque service. Les contraintes (4.20) assurent la non existence de cycles dans les tournées obtenues et les équations (4.21) à (4.23) sont les contraintes sur les valeurs des variables.

L'algorithme  elabor e par les auteurs de [Casazza et al., 2013] et qui est bas e sur la programmation dynamique est une adaptation de la méthode décrite dans [Dumas et al., 1995]. L'algorithme est constitu e des étapes suivantes :

**Méthode gloutonne** Dans un premier temps une heuristique du plus proche voisin est utilisée pour trouver une solution réalisable pour le TSPTW : il commence par le dépôt (le domicile du personnel  $k$ ) à l'instant  $e_k$  puis passe au plus proche voisin non encore visité, jusqu'à ce que tout les services soient visités, ou qu'aucun autre service ne puisse être visité sans violer les fenêtres de temps. Si cette procédure arrive à couvrir tout les services, une solution réalisable pour le TSPTW est trouvée, on arrête. Sinon on passe aux étapes suivantes.



**Structure des étiquettes** Chaque chemin partiel est défini par une étiquette  $\lambda = (v, t, i)$ , qui stocke l'ensemble des services visités  $v \subseteq S''$ , la durée total du chemin ( $e_k \leq t \leq l_k$ ) et le dernier service visité  $i$ .

**Initialisation** Une étiquette initiale est créée  $\lambda = (\emptyset, e_k, k)$ , le personnel  $k$  commence la tournée à l'instant  $e_k$ . Cette étiquette est dite ouverte.

**Extension des étiquettes** De manière itérative, une étiquette ouverte  $\lambda' = (v', t', i')$  telle que la durée totale  $t'$  est la minimale parmi les étiquettes marquées comme ouvertes. Cette étiquette est ensuite étendue vers tout autre service  $i'' \in S'' \setminus v'$  correspondant aux services non encore visités et qui peuvent être rajoutés à l'étiquette  $\lambda'$  sans violer leur fenêtre de temps. Ainsi, ces services vérifient l'inégalité ci-dessous :

$$t' + d_{i'i''} + D_{i''} \leq l_{i''}$$

Pour chacun de ces services, une nouvelle étiquette est créée  $\lambda'' = (v' \cup \{i''\}, \max\{e_{i''}, t' + d_{i'i''}\} + D_{i''}, i'')$ , qui est marquée comme étant ouverte. Par ailleurs, l'étiquette  $\lambda'$  est fermée.

**Dominance** Si après l'extension, deux étiquettes différentes sont apparues  $\lambda' = (v', t', i')$  et  $\lambda'' = (v'', t'', i'')$ , tel que,  $v' \subseteq v''$  et  $t' \geq t''$ , alors l'étiquette  $\lambda'$  est supprimée. Car les étiquettes obtenues avec l'extension de  $\lambda'$  peuvent être obtenues avec l'extension de  $\lambda''$ .

**Condition d'arrêt** L'algorithme s'arrête si l'un de ces cas se présentent : si une étiquette passant par tous les services est trouvée  $v = S''$ , ainsi, une solution réalisable pour le TSPTW est trouvée, par ailleurs, s'il n'existe plus d'étiquette ouverte, alors l'algorithme ne peut plus rajouter de services non couverts, dans ce cas la solution trouvée est une solution pour le PCTSPTW. Si aucun des deux cas ne se présente, itérer encore une fois les deux étapes **Extension des étiquettes** et **Dominance**.

Le nombre de problèmes PCTSPTW résolus est égal au nombre de sous-ensembles de services générés et ce pour chaque personnel  $k \in P_j'$ , l'algorithme 3 résume l'étape de construction du lot de tournées.

## 4.5 Planification des personnels

Maintenant que nous disposons d'un ensemble de tournées réalisables, nous passons à l'élaboration du planning. Pour ce faire, nous introduisons le pro-

**Algorithme 3** Construction des tournées

---

Faire appel à l'algorithme 1 : obtenir  $n1$  clusters notés  $S^n, n = 1, \dots, n1$   
 Faire appel à l'algorithme 2 : obtenir  $n2$  clusters notés  $S^m, n = 1, \dots, n2$   
**pour**  $n = 1$  **jusqu'à**  $n1$  **faire**  
   **pour tout**  $k \in P'_t$  **faire**  
     **si**  $k$  a la même qualification que  $S^n$  **alors**  
       faire appel au *PCTSPTW*  
     **fin si**  
**fin pour**  
**fin pour**  
**pour**  $n = 1$  **jusqu'à**  $n2$  **faire**  
   **pour**  $k \in P'_t$  **faire**  
     **si**  $k$  a la même qualification que  $S^m$  **alors**  
       faire appel au *PCTSPTW*  
     **fin si**  
**fin pour**  
**fin pour**  
 À la fin de l'algorithme on obtient un lot de tournées  $R_t$

---

blème de partitionnement ci-dessous :

Soit  $R_t$  un sous-ensemble de tournées réalisables obtenues dans la section 4.4.2,  $R_t^i$  représente l'ensemble des tournées passant par le service  $i$ ,  $R_t^k$  représente l'ensemble des tournées du personnel  $k$ . Notez que pour chaque service, nous construisons des tournées fictives afin d'avoir des solutions réalisables. La variable  $y_l$  est égale à 1 si la tournée  $l$  est dans la solution, 0 sinon.  $dist_l$  est la distance de la tournée  $l$ . Ainsi nous pouvons écrire les deux formulations suivantes :

$$(P4) \quad \min \quad \sum_{l \in R_t} y_l$$

$$\text{s.c.} \quad \sum_{l \in R_t^i} y_l = 1 \quad \forall i \in S_t \quad (4.24)$$

$$\sum_{l \in R_t^k} y_l \leq 1 \quad \forall k \in P'_t \quad (4.25)$$

$$y_l \in \{0, 1\} \quad \forall l \in R_t \quad (4.26)$$

$$(P5) \quad \min \sum_{l \in R_t} y_l * dist_l$$

$$\text{s.c.} \quad \sum_{l \in R_t^i} y_l = 1 \quad \forall i \in S_t \quad (4.24)$$

$$\sum_{l \in R_t^k} y_l \leq 1 \quad \forall k \in P'_t \quad (4.25)$$

$$y_l \in \{0, 1\} \quad \forall l \in R_t d \quad (4.26)$$

Les contraintes (4.24) nous assurent que chaque service est couvert par un et un seul personnel. Chaque personnel assure au maximum une tournée par jour (4.25). (P4) est la planification qui minimise le nombre de personnels actifs et (P5) correspond à la minimisation des distances parcourues. Pour résoudre ce problème nous utilisons Cplex-IBM.

**Résumé de la matheuristique** La matheuristique commence par l'affectation des personnels aux tranches horaires, puis la clusterisation des services en utilisant la première méthode définie dans 4.4.1.1, cette méthode nous donne des groupes de services avec lesquels des tournées se forment grâce au PCTSPTW. Ainsi, nous obtenons un ensemble de tournées réalisables qui est donné au problème de planification. Une fois qu'une première planification est trouvée, nous testons si tous les services sont servis. S'il existe au moins un service non assuré, alors la solution n'est pas réalisable, la partie routage des personnels sera reprise en utilisant la deuxième méthode définie dans 4.4.1.2. De nouvelles tournées sont générées, nous les rajoutons à l'ensemble de tournées obtenues avec la première méthode (voir l'algorithme 3). Puis, nous faisons appel au problème de planification une seconde fois. On teste encore une fois si tous les services sont servis, si ce n'est pas le cas nous utilisons une méthode qui sert à renforcer la matheuristique, cette méthode est définie ci-dessous.

## 4.6 Post-optimisation

Lors de la planification, s'il existe des services qui ne sont pas encore couverts, nous insérons ces derniers dans les tournées planifiées. Pour cela nous faisons appel à une méthode connue pour faire face aux fenêtres de temps dans les problèmes de routage. Le principe est de modifier une solution courante qui est une séquence de nœuds, par la suppression de certains arcs et la réorganisation de la séquence de manière à pouvoir insérer de nouveaux nœuds. Ainsi les solutions obtenues sont voisines de la solution courante et partagent des séquences de nœuds.

Les différents algorithmes approchés utilisés pour le problème de tournées de véhicules, génèrent un voisinage de solutions en utilisant des modifications (suppressions ou déplacements) dans la solution courante. Cette dernière sera remplacée par une des solutions du voisinage considéré. Le choix de la nouvelle solution se fait de manière à optimiser un profit donné, ceci se fait par le biais d'une méthode classique (la recherche locale), ou bien en utilisant des méthodes stratégiques (recherche tabou, recuit simulé, etc,...).

Par ailleurs, il est connu que dans les procédures de la recherche locale, les contraintes sur les fenêtres de temps sont des contraintes difficiles à considérer. En effet, les algorithmes de recherche locale visitent un grand nombre de solutions pour lesquelles la faisabilité et la valeur sont à estimer. Une simple évaluation se fait en  $O(n)$ , ceci pénalise tout algorithme nécessitant des tests. [Savelsbergh, 1985] a prouvé que si des solutions sont explorées dans un ordre donné, cette opération peut être archivée en calculant des quantités convenables et les mettre à jour à chaque nouvelle solution considérée. Ceci permet de vérifier les solutions en un temps qui en  $O(1)$  (voir [Vidal et al., 2011]).

La méthode que nous avons utilisée est tirée de [Cordone and Wolfer Calvo., 2000], celle-ci est basée sur le résultat de [Savelsbergh, 1985]. Les auteurs ont proposé une manière plus simple pour manipuler les séquences de nœuds. Cette dernière consiste à remplacer une séquence de nœuds par un seul nœud à qui on peut associer sa propre fenêtre de temps. Ainsi, la recherche locale dont le but est d'améliorer la solution, se réduit à manipuler des ensembles de nœuds et de macro-nœuds. Les macro-nœuds permettent d'évaluer les propriétés (faisabilité et valeur de la fonction objectif) des différentes solutions (voisinage) explorées lors de la recherche locale de manière simple et rapide. Cette méthode est expliquée plus en détails ci-dessous.

**Définition 1** Soit  $p_i$  l'heure de début du service  $i$ ,  $p_i = \max(e_i, a_i)$  tel que,

$a_i$  est l'heure d'arrivée au service  $i$ . Étant donné un arc  $(i, j)$ , le retard local est défini par :

$$r_{i,j} = e_i + d_{i,j} + D_i - e_j$$

L'idée est d'utiliser une échelle de temps différente pour chaque nœud, en prenant le début de sa fenêtre "temps zéro". Ainsi, l'arrivée à l'intérieur de sa fenêtre de temps est considérée comme un retard positif et l'arrivée à l'avance comme retard négatif.

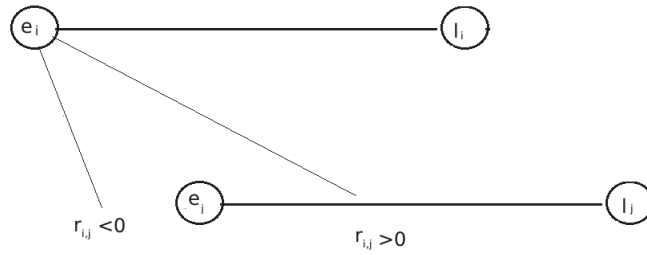


FIGURE 4.3 –

**Définition 2** Soit une séquence de nœuds  $\Pi = (\pi_1, \dots, \pi_s)$  le retard global est défini par :

$$\Gamma = \sum_{k=1}^{s-1} r_{\pi_k, \pi_{k+1}}$$

et le retard cumulé est

$$R_{\pi_s} = p_{\pi_s} - e_{\pi_s} = \max(a_{\pi_s} - e_{\pi_s}, 0) \geq 0$$

Pour un seul nœud  $i$ ,  $R_i$  est confondu avec  $p_i$ . La largeur de sa fenêtre de temps est  $f_i = l_i - e_i$ .

**Proposition 1** Étant donné une séquence de nœuds  $\Pi = (\pi_1, \dots, \pi_s)$

$$R_{\pi_s} = \max(R_{\pi_1} + \Gamma_{\pi_1, \pi_s}, R_{\pi_1, \pi_s}^0)$$

tel que  $R_{\pi_1, \pi_s}^0 = \max_{k \in [1, \dots, s]} \Gamma_{\pi_k, \pi_s}$

L'avantage est que  $R_{\pi_s}$  dépend de  $R_{\pi_1}$  et que les deux termes ne sont pas liés avec  $p_{\pi_1}$ . Si les deux quantités  $\Gamma_{\pi_1, \pi_s}$  et  $R_{\pi_1, \pi_s}^0$  sont connues, il est possible de passer du nœud  $\pi_1$  au nœud  $\pi_s$  sans toutefois passer à travers toute la séquence  $\Pi$ . Soit  $S_{\pi_r, \pi_s}^0 = \min_{k \in [r, \dots, s]} (f_{\pi_k} - \Gamma_{\pi_r, \pi_k})$ .

Dans le tableau 4.1, on résume les différentes propriétés définies pour un nœud et ce qui leur correspond dans le cas d'un macro-nœud. Le terme le plus utiles dans la manipulation des macro-nœuds est le  $S_{\pi_r, \pi_s}^0$ , car il correspond à la fenêtre de temps du macro-nœud.

nœud $i$	macro-nœuds $\Pi_r^s$
$R_i$	$R_{\pi_r}$
$r_{i,j}$	$\Gamma_{\pi_r, \pi_s}$
0	$R_{\pi_r, \pi_s}^0$
$f_i$	$S_{\pi_r, \pi_s}^0$

TABLE 4.1 – Nœud versus macro-nœuds

### Insertion des services dans les tournées (utilisation des macro-nœuds) :

Dans notre cas, on veut intégrer des services dans des tournées existantes, pour ce faire, on doit tester pour chaque tournée, si on peut insérer ce service et où il serait possible de le faire ?

Pour cela, la tournée est transformée en un ensemble de macro-nœuds, pour lesquels les différentes propriétés définies ci-dessus sont calculées. Supposons que nous considérons une tournée (séquence de nœuds)  $\Pi = (\pi_r, \dots, \pi_{i-1}, \pi_i, \dots, \pi_s)$ , nous voulons tester si un service  $x$  peut être inséré dans cette tournée. Pour ce faire cette tournée est représentée par un ensemble de macro-nœuds,  $\Pi_r^s, \dots, \Pi_{i-1}^s, \Pi_i^s, \dots, \Pi_s^s$  (voir la figure 4.4).

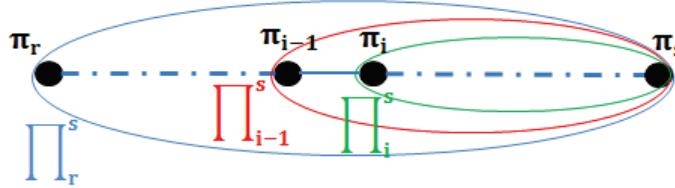


FIGURE 4.4 – Exemple

Ainsi, pour tester si le service  $x$  peut être inséré dans la tournée, avant un nœud donné  $i$ , nous testons le macro-nœud  $\Pi_i^s$  de la manière suivante :

- On calcule  $p_x = \max(p_{i-1} + d_{i-1,x} + D_{i-1}, e_x)$  l'heure de début du service  $x$ . Cette dernière dépend de l'heure de début du service  $i - 1$ , en effet, avant de commencer le service  $x$ , le service  $i - 1$  doit être effectué puis, on rajoute le temps de trajet entre les deux services  $i - 1$  et  $x$ . Par ailleurs, si l'arrivée au service  $x$  est avant le début de sa fenêtre de temps il débutera à  $e_x$ , autrement, il débutera à l'arrivée.
- **Si**  $p_x + d_{x,i} + D_x - e_i \leq S_{\pi_i, \pi_s}^0$  ( $S_{\pi_i, \pi_s}^0$  étant considérée comme fenêtre de temps du macro-nœud  $\Pi_i^s$ )

**Alors** le service  $x$  peut être intégré avant le service  $i$  tout en gardant la séquence réalisable.

Maintenant que nous avons bien défini toutes les étapes de la matheuristique, nous pouvons présenter la figure 5.1. Celle-ci illustre la matheuristique établie pour une journée de planification.

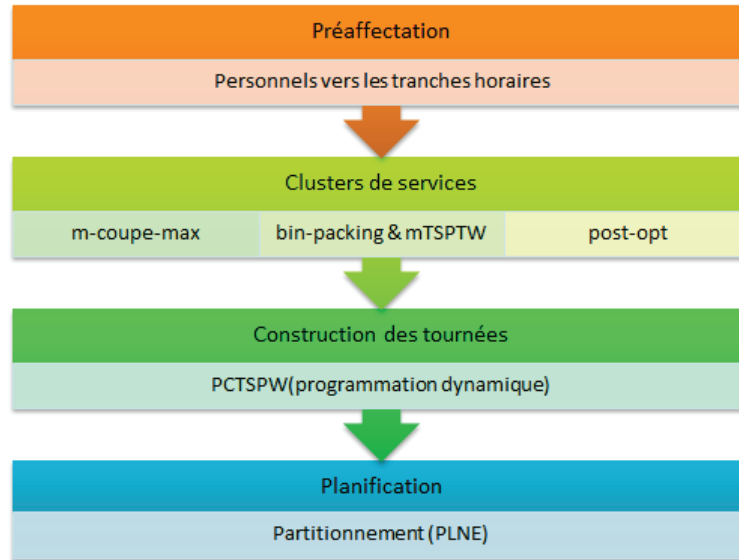


FIGURE 4.5 – Planification et routage sur une journée

## 4.7 Résultats expérimentaux

La méthode décrite ci-dessus a été testée avec les instances définies dans la section 3.3, rappelons que ces instances sont sur une journée de planification et que le nombre de services est égal à 30 pour les 200 premières instances et de 50 services pour les 200 autres. Afin d'évaluer cette méthode, nous présenterons une comparaison des résultats avec ceux fournis par le PLNE résumés dans la section 3.4.

### 4.7.1 Résultats obtenus avec les instances à 30 services

Rappelons que parmi les 200 instances définies, 3 ne sont pas réalisables. Dans les deux tableaux 4.2 et 4.3 nous comparons les résultats obtenus grâce à la matheuristique avec ceux obtenus par le PLNE, et ce sur les 50 premières instances avec respectivement l'*objectif1* et l'*objectif2*. La comparaison concernant les 150 autres instances sera rapportée sur les tableaux A.3 et A.4 disponibles en annexe.

Nous rapportons dans les deux tableaux les deux bornes inférieures obtenues dans la partie 4.4.1.2 de la matheuristique notées  $lb_1$  et  $lb_2$ , ainsi que

la valeur de la relaxation continue ( $PL$ ) du PLNE. Aussi, pour chacune des deux méthodes (la matheuristique et le PLNE) nous rapportons le nombre de personnels actifs, la distance totale parcourue par les personnels, la taille moyenne ( $moy$ ), la taille minimale ( $min$ ) et la taille maximale des tournées ( $max$ ), et enfin le temps de calcul.

#### 4.7.1.1 Minimisation du nombre de personnels

Les résultats obtenus lors de la minimisation du nombre de personnels actifs sont rapportés dans le tableau 4.2. Dans notre matheuristique, avant de calculer le nombre de personnels actifs, nous l'estimons en calculant deux bornes inférieures  $lb_1$  et  $lb_2$ , tandis que pour le  $PLNE$  la relaxation continue constitue une autre borne inférieure pour le problème. Dans un premier temps, nous allons comparer les valeurs de ces bornes inférieures : nous remarquons que la valeur de  $PL$  reste inchangée pour toutes les instances, elle est égale à 3. Tandis que, dans la plupart des instances la valeur de  $lb_1$  est égale à 3, et sur le reste elle est égale à 4. D'autre part,  $lb_2$  prend des valeurs dans l'intervalle  $[3, 6]$ . Afin de mieux analyser ces bornes inférieures, nous allons utiliser le gap entre ces dernières et la valeur de  $\#id_p$ . Pour le PLNE,  $\#id_p$  prend ses valeurs dans l'intervalle  $[5, 7]$ , ainsi le gap entre la relaxation continue  $PL$  et la valeur optimale  $\#id_p$  varie entre 40% et 57%. Par ailleurs, pour la matheuristique  $\#id_p$  prend ses valeurs dans l'intervalle  $[5, 7]$  et le gap entre la première borne inférieure  $lb_1$  et la valeur de  $\#id_p$  (qui constitue une borne supérieure pour le problème) varie entre 20% et 57%. Le gap entre la deuxième borne inférieure  $lb_2$  et la valeur de  $\#id_p$  est au maximum égal à 57%, dans certains cas, le gap est de 0% ce qui veut dire que  $lb_2$  égale  $\#id_p$ .

À partir de la valeur des gaps, nous constatons dans un premier temps que la relaxation continue trouvée pour le  $PLNE$  a des valeurs proches de celle de la première borne  $lb_1$  calculée par la matheuristique, néanmoins, cette dernière se rapproche un peu plus de la solution finale sur certaines instances dont le gap égale à 20%. D'un autre côté, le gap lié à  $lb_2$  dont la valeur est plus petite que celle trouvée pour  $lb_1$ , confirme bien que l'utilisation du  $mTSPTW$  améliore de beaucoup la valeur de la première borne  $lb_1$  et permet de se rapprocher un peu plus de la solution finale, tel que dans certaines instances, cette valeur égale la valeur de la solution finale  $\#id_p$  (voir les instances kA006, kA035 et kA037).

Pour ce qui est du nombre de personnels actifs trouvés par les deux méthodes, rappelons que la valeur trouvée par le  $PLNE$  est optimale pour le problème. Nous constatons que sur toutes les instances la valeur de  $\#id_p$  obtenue avec la matheuristique est au plus égale à la valeur optimale obtenue par le PLNE plus 1. Sur les 50 instances, 31 sont résolues à l'optimum par



la matheuristique. Nous remarquons que les distances trouvées par les deux méthodes ont des valeurs plus au moins égales. Aussi, dans certains cas (voir les instances soulignées), les deux méthodes utilisent le même nombre de personnels actifs, mais la matheuristique donne une distance qui est plus petite, ceci est dû au fait que dans la matheuristique la construction des tournées se fait via le PCTSPTW qui optimise le temps de parcours. Pour ce qui est des temps de calculs la matheuristique prend un peu moins de temps que le *PLNE*.

#### 4.7.1.2 Minimisation de la distance

Les résultats obtenus lors de la minimisation des distances parcourues par les personnels sont rapportés dans le tableau 4.3. Nous remarquons que le nombre de personnels actifs  $\#id_p$  pour la matheuristique et le *PLNE* varient respectivement dans les intervalles  $[5, 7]$  et  $[5, 8]$ . Parmi les 50 instances, 14 fournissent le même nombre de personnels actifs avec les deux méthodes, 4 instances donnent un  $\#id_p$  avec la matheuristique qui est supérieur de 1 à celui du *PLNE*. Sur le reste des instances, la matheuristique donne un nombre de personnels actifs qui est moindre que celui du *PLNE*, telles que 23, 6 et 1 instances parmi les 50 instances ont des différences respectives égales à 1, 2 et 3.

Pour ce qui est des distances parcourues, sur certaines instances le gap entre les valeurs des deux méthodes n'est pas très grand tel que le gap minimal entre les deux valeurs est de 2%. Toutefois, sur d'autres instances le gap peut aller jusqu'à 50%, ce qui nous conduit à dire que le *PLNE* donne une meilleure solution que la matheuristique. En effet, ce résultat s'explique par le fait que la matheuristique se base sur le calcul des deux bornes  $lb_1$  et  $lb_2$  qui sont des bornes inférieures sur le nombre de personnels actifs et non pas sur la distance parcourue. C'est pourquoi la matheuristique donne un nombre de personnels actifs inférieur à celui trouvé par le *PLNE*. Pour ce qui est du temps de calcul les deux méthodes sont aussi rapides l'une que l'autre.

Ins	id <sub>p</sub>	matheuristique								PLNE						
		lb <sub>1</sub>	lb <sub>2</sub>	#id <sub>p</sub>	dist	moy	min	max	temps	PL	#id <sub>p</sub>	dist	moy	min	max	temps
kA000	7	3	4	6	1028	5	2	9	25	3	5	1108	6	2	8	106
kA001	7	3	4	7	1119	4	1	9	212	3	6	988	5	1	9	108
kA002	8	4	5	7	1612	4	2	8	94	3	6	1466	5	2	7	103
kA003	7	4	5	7	1605	4	2	8	38	3	6	1456	5	3	7	103
kA004	6	3	4	6	1002	5	1	9	81	3	5	1099	6	5	8	105
kA005	7	3	3	6	1020	5	1	10	113	3	6	1203	5	1	9	104
kA006	9	3	6	6	1642	5	3	7	14	3	6	1844	5	4	6	104
kA007	7	3	5	7	1567	4	2	6	56	3	7	1795	4	2	6	105
kA008	8	3	5	7	1495	4	1	7	7	3	7	1569	4	2	6	106
kA009	7	4	4	6	1120	5	1	9	51	3	5	1130	6	2	9	102
kA010	7	3	4	7	1527	4	1	8	64	3	7	1767	4	1	7	120
kA012	7	3	4	5	749	6	3	9	92	3	5	999	6	4	7	105
kA013	8	3	4	6	1406	5	1	8	161	3	6	1506	5	2	9	104
kA014	6	3	4	6	987	5	1	9	40	3	6	1137	5	1	9	106
kA015	7	3	4	6	1151	5	2	8	32	3	6	1272	5	2	8	105
kA016	7	3	4	7	1255	4	1	11	35	3	6	1511	5	3	9	104
kA017	8	4	4	7	1626	4	1	8	119	3	7	1617	4	3	7	104
kA018	9	3	5	7	1446	4	1	8	189	3	7	1710	4	1	8	108
kA019	8	3	4	7	1169	4	1	8	69	3	6	1525	5	3	7	105
kA020	7	3	5	7	1601	4	1	9	71	3	6	1405	5	1	8	104
kA021	6	3	4	5	1051	6	2	9	44	3	5	1116	6	3	9	106
kA022	8	3	5	6	1476	5	2	9	54	3	6	1658	5	4	7	105
kA023	7	3	4	5	1315	6	1	8	61	3	5	1270	6	1	9	104
kA024	7	3	4	6	1086	5	2	9	111	3	6	1205	5	3	9	105
kA025	7	3	5	7	1538	4	2	7	93	3	6	1701	5	1	7	103
kA026	7	3	4	7	1423	4	2	9	61	3	6	1398	5	1	9	105
kA027	8	3	4	6	1528	5	2	8	70	3	6	1470	5	1	8	103
kA028	8	3	5	7	1326	4	1	8	102	3	6	1458	5	2	7	104
kA029	7	3	5	6	1196	5	2	9	48	3	6	1409	5	3	9	103
kA030	8	3	5	7	1650	4	1	9	24	3	6	1770	5	3	8	104
kA031	7	3	4	6	1127	5	2	8	74	3	6	1403	5	2	7	104
kA032	8	3	3	5	1017	6	4	8	10	3	5	858	6	4	8	105
kA033	8	3	4	5	1202	6	2	9	38	3	5	1203	6	3	9	103
kA034	8	3	4	6	1131	5	1	9	49	3	5	1129	6	3	9	107
kA035	7	3	5	5	952	6	3	9	19	3	5	1107	6	2	12	104
kA036	8	3	5	6	1639	5	2	8	84	3	5	1491	6	5	8	108
kA037	8	3	5	5	1430	6	3	8	34	3	5	1503	6	3	8	103
kA038	8	3	4	5	919	6	4	7	22	3	5	1057	6	2	9	119
kA039	9	4	5	7	1423	4	1	6	24	3	7	1459	4	3	6	106
kA040	7	3	4	5	1088	6	2	9	56	3	5	1248	6	3	8	105
kA041	8	3	3	6	1395	5	2	8	134	3	6	1346	5	1	10	115
kA042	8	3	4	6	1386	5	3	6	108	3	6	1804	5	3	7	105
kA043	8	3	5	6	1375	5	2	9	132	3	5	1332	6	2	9	105
kA044	8	3	5	6	1506	5	2	8	61	3	6	1351	5	1	8	104
kA045	7	3	5	5	991	6	3	9	90	3	5	1018	6	4	8	103
kA046	7	3	5	7	1238	4	1	8	63	3	6	1418	5	3	8	104
kA048	7	3	4	6	1367	5	1	9	50	3	6	1409	5	2	9	104
kA049	8	3	5	6	1481	5	3	8	33	3	6	1496	5	3	7	103

TABLE 4.2 – Comparaison matheuristique-PLNE sous *l'objectif1* : instances à 30 services

Ins	id <sub>p</sub>	matheuristique								PLNE						
		lb <sub>1</sub>	lb <sub>2</sub>	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps	PL	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps
kA000	7	3	4	6	979	5	2	9	24	188	6	571	5	3	11	65
kA001	7	3	4	7	1210	4	1	6	183	284	6	736	5	3	9	68
kA002	8	4	5	7	1577	4	2	8	81	478	8	1188	3	3	5	65
kA003	7	4	5	7	1414	4	1	8	43	447	7	1039	4	3	7	65
kA004	6	3	4	6	1002	5	1	9	83	257	5	693	6	2	9	67
kA005	7	3	3	6	1053	5	1	9	106	294	6	808	5	1	7	67
kA006	9	3	6	6	1469	5	3	7	18	468	9	1202	3	1	5	64
kA007	7	3	5	7	1502	4	2	6	56	485	7	1039	4	2	7	66
kA008	8	3	5	7	1436	4	1	7	8	376	8	1088	3	2	6	65
kA009	7	4	4	6	1125	5	2	9	51	370	7	820	4	1	8	66
kA010	7	3	4	7	1480	4	1	8	63	234	7	1003	4	2	7	76
kA012	7	3	4	5	749	6	3	9	63	148	6	593	5	3	7	66
kA013	8	3	4	6	1156	5	3	8	35	364	6	909	5	2	8	66
kA014	6	3	4	6	937	5	2	9	39	500	6	777	5	2	7	66
kA015	7	3	4	6	1151	5	2	8	30	303	7	675	4	2	9	65
kA016	7	3	4	7	1276	4	1	11	35	373	7	1093	4	1	9	66
kA017	8	4	4	7	1626	4	1	8	100	444	8	1202	3	2	7	66
kA018	9	3	5	7	1334	4	2	8	211	321	8	1032	3	1	9	68
kA019	8	3	4	7	1036	4	1	6	34	276	6	786	5	2	7	65
kA020	7	3	5	7	1570	4	1	7	53	374	7	1128	4	1	8	66
kA021	6	3	4	5	1025	6	2	9	36	154	6	656	5	2	7	66
kA022	8	3	5	6	1458	5	2	7	43	434	8	1046	3	1	9	64
kA023	7	3	4	5	1259	6	1	8	45	500	6	940	5	1	8	71
kA024	7	3	4	6	1081	5	2	9	91	406	7	898	4	1	9	66
kA025	7	3	5	7	1510	4	1	6	70	334	7	1053	4	3	5	65
kA026	7	3	4	7	1385	4	2	9	65	269	7	703	4	3	7	64
kA027	8	3	4	6	1321	5	3	8	75	460	7	1033	4	1	6	66
kA028	8	3	5	7	1221	4	1	8	81	451	8	960	3	1	7	65
kA029	7	3	5	6	1095	5	2	8	44	311	7	726	4	2	6	64
kA030	8	3	5	7	1530	4	3	6	19	544	8	1170	3	1	6	68
kA031	7	3	4	6	1035	5	2	8	52	287	7	745	4	1	7	66
kA032	8	3	3	5	981	6	4	8	21	182	7	680	4	1	8	67
kA033	8	3	4	5	1133	6	3	9	20	319	7	887	4	1	8	67
kA034	8	3	4	6	1007	5	1	9	39	278	6	633	5	3	9	67
kA035	7	3	5	5	952	6	3	9	20	266	6	777	5	1	7	66
kA036	8	3	5	6	1383	5	1	8	64	324	7	1039	4	1	8	65
kA037	8	3	5	6	1052	5	1	8	37	297	8	874	3	2	7	66
kA038	8	3	4	5	831	6	4	7	25	274	6	717	5	3	8	107
kA039	9	4	5	7	1461	4	1	6	103	282	8	950	3	1	7	68
kA040	7	3	4	5	1047	6	4	8	61	316	5	944	6	4	7	65
kA041	8	3	3	6	1280	5	4	6	120	462	8	1092	3	1	8	71
kA042	8	3	4	6	1204	5	3	8	101	367	7	1169	4	3	7	71
kA043	8	3	5	6	1267	5	2	8	101	286	7	893	4	3	7	65
kA044	8	3	5	6	1506	5	2	8	55	562	6	1064	5	2	7	64
kA045	7	3	5	5	917	6	5	7	85	334	6	696	5	3	7	65
kA046	7	3	5	7	1246	4	2	7	70	527	6	852	5	3	7	66
kA048	7	3	4	6	1321	5	1	7	50	409	7	1034	4	3	6	67
kA049	8	3	5	6	1461	5	3	8	32	315	8	914	3	2	5	65

TABLE 4.3 – Comparaison matheuristique-PLNE sous *l'objectif2* : instances à 30 services

## 4.7.2 Résultats obtenus avec les instances à 50 services

Dans les deux tableaux 4.4 et 4.5 nous comparons les résultats obtenus grâce à la matheuristique avec ceux obtenus avec le PLNE, et ce sur les 50 premières instances avec respectivement l'*objectif1* et l'*objectif2*. La comparaison concernant les 150 autres instances sera rapportée sur les tableaux A.5 et A.6 disponibles en annexe. En plus des valeurs rapportées pour les instances à 30 services, dans la dernière colonne de chaque tableau, nous rapportons un  $\star$  si le PLNE est résolu à l'optimum, car pour ces instances cplex n'arrive pas dans tous les cas à trouver la solution optimale au bout de 30 minutes de calcul.

### 4.7.2.1 Minimisation du nombre de personnels

Les résultats obtenus lors de la minimisation du nombre de personnels actifs sont rapportés dans le tableau 4.4. Comme pour les instances à 30 services nous allons commencer par comparer les valeurs des bornes inférieures : nous remarquons que la valeur de  $PL$  reste inchangée pour toutes les instances, elle est égale à 3.  $lb_1$  et  $lb_2$  prennent leurs valeurs respectives dans les intervalles  $[3, 5]$  et  $[4, 6]$ . Pour le PLNE,  $\#id_p$  prend ses valeurs dans l'intervalle  $[6, 9]$ , ainsi le gap entre la relaxation continue  $PL$  et la valeur optimale  $\#id_p$  varie entre 50% et 66%. Par ailleurs, pour la matheuristique,  $\#id_p$  prend ses valeurs dans l'intervalle  $[7, 10]$  et le gap entre la première borne inférieure  $lb_1$  et la valeur de  $\#id_p$  varie entre 28% et 70%. Le gap entre la deuxième borne inférieure  $lb_2$  et la valeur de  $\#id_p$  est entre 14% et 60%. Notons également que  $lb_2$  est proche de la valeur de  $\#id_p$  trouvée par le PLNE, elles sont même égales dans certains cas (par exemple kA049).

À partir de la valeur des gap, nous constatons que les bornes  $lb_1$  et  $lb_2$  sont plus proches de  $\#id_p$  que la borne  $PL$ .  $lb_2$  améliore de beaucoup la valeur de  $lb_1$  et permet de se rapprocher un peu plus de la solution finale.

Le PLNE met 30 minutes pour trouver ces solutions alors que la matheuristique met au plus 3 minutes sur ces 50 instances. Dans 19 cas, le PLNE et la matheuristique donnent la même valeur de la solution, 19 autres instances ont un  $\#id_p$  avec la matheuristique plus grand de 1 de celui trouvé par le PLNE. Parmi le reste des instances, nous avons 4 et 5 instances qui ont respectivement un  $\#id_p$  avec la matheuristique plus grand de 2 et plus grand de 3 avec celui trouvé par le PLNE, et enfin 2 instances pour lesquelles le PLNE ne trouve pas de solution au bout de 30 minutes (kA038, kA047) alors que la matheuristique trouve une solution au bout de 40 secondes maximum. Les distances parcourues trouvées dans les deux méthodes sont plus au moins égales et comme pour les premiers résultats, les instances soulignées ont le même nombre de personnels actifs mais la matheuristique donne une distance

plus petite. Par ailleurs, le temps de calcul reste raisonnable pour les deux méthodes, au maximum 3 minutes de calcul sont enregistrées.

Ins	id <sub>p</sub>	matheuristique							PLNE							st
		lb <sub>1</sub>	lb <sub>2</sub>	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps	PL	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	
kA000	14	4	4	9	679	5	2	9	27	3	6	854	8	5	12	1810
<u>kA001</u>	14	4	4	<u>8</u>	<u>914</u>	6	3	10	41	3	<u>8</u>	<u>936</u>	6	3	12	1801
kA002	16	4	6	9	1110	5	1	9	29	3	8	1443	6	5	10	1808
kA003	14	4	5	11	1504	4	1	9	52	3	8	1292	6	4	9	1809
kA004	12	4	4	8	1030	6	3	10	66	3	7	870	7	4	10	1800
kA005	14	4	5	9	691	5	1	10	42	3	8	993	6	2	9	1803
kA006	18	5	6	9	1678	5	1	9	94	3	6	1268	8	6	11	1800
kA007	14	4	6	8	1472	6	2	9	38	3	8	1328	6	3	11	1800
<u>kA008</u>	16	4	6	<u>9</u>	<u>1243</u>	5	1	8	90	3	<u>9</u>	<u>1483</u>	5	1	9	1804
kA009	14	4	5	10	1394	5	2	10	64	3	7	1166	7	2	11	1800
kA010	14	4	4	8	1423	6	3	10	70	3	8	1361	6	3	12	1802
kA011	16	3	5	7	1337	7	2	10	71	3	8	1237	6	2	12	1817
kA012	14	4	5	8	814	6	3	9	71	3	8	809	6	3	11	1802
kA013	16	4	16	9	898	5	2	9	74	3	8	997	6	1	12	1800
<u>kA014</u>	12	3	6	<u>7</u>	<u>596</u>	7	5	10	56	3	<u>7</u>	<u>978</u>	7	2	12	1814
<u>kA015</u>	14	4	4	<u>7</u>	<u>1060</u>	7	6	9	96	3	<u>7</u>	<u>1113</u>	7	4	10	1801
kA016	14	4	5	8	968	6	4	9	65	3	7	1301	7	5	13	1800
kA017	16	4	6	8	1381	6	2	9	98	3	8	1239	6	2	10	1800
<u>kA018</u>	18	4	5	<u>9</u>	<u>1697</u>	5	2	9	81	3	<u>9</u>	<u>1881</u>	5	3	9	1806
<u>kA019</u>	16	5	5	<u>8</u>	<u>948</u>	6	3	10	68	3	<u>8</u>	<u>1367</u>	6	3	11	1808
<u>kA020</u>	14	4	5	<u>8</u>	<u>1024</u>	6	2	9	98	3	<u>8</u>	<u>1452</u>	6	3	10	1825
kA021	12	4	5	8	1209	6	1	10	50	3	5	864	10	5	14	234 *
kA022	16	3	6	8	1086	6	2	10	52	3	7	1322	7	3	10	1805
kA023	14	4	5	8	1135	6	2	10	49	3	7	1086	7	4	10	1819
kA024	14	5	5	8	930	6	2	9	62	3	7	845	7	4	11	1807
kA025	14	4	6	8	1691	6	3	9	64	3	7	1593	7	5	11	1818
kA026	14	4	5	9	8119	5	2	9	178	3	8	1545	6	3	11	1814
kA027	16	4	6	9	1099	5	1	10	75	3	7	1087	7	2	12	1812
kA028	16	4	6	10	7396	4	1	8	43	3	7	1180	7	5	12	1800
kA029	14	5	5	9	1483	5	1	10	257	3	8	1164	6	2	7	1800
<u>kA050</u>	16	4	5	<u>8</u>	<u>1314</u>	6	2	8	50	3	<u>8</u>	<u>1534</u>	6	3	12	1837
kA031	14	4	6	8	1011	6	4	10	36	3	7	1177	7	6	12	1814
kA032	16	4	6	8	859	6	3	9	47	3	7	879	7	3	9	1801
<u>kA033</u>	16	3	5	<u>6</u>	<u>915</u>	8	7	10	62	3	<u>6</u>	<u>968</u>	8	5	11	75 *
kA034	16	5	5	9	799	5	1	9	43	3	7	1407	7	5	11	1810
kA035	14	4	4	8	941	6	2	10	83	3	6	1148	8	6	10	1808
kA036	16	5	5	9	1189	5	1	10	39	3	8	1667	6	3	9	1811
kA037	16	4	6	8	875	6	2	10	53	3	7	1117	7	5	11	1020 *
kA038	16	4	6	8	672	5	1	10	40	-	-	-	-	-	-	-
kA039	18	4	5	7	1292	7	5	9	59	3	7	1260	7	4	10	1800
kA040	14	4	4	9	1012	5	1	9	30	3	8	1108	6	3	9	1822
<u>kA041</u>	16	3	5	<u>8</u>	<u>947</u>	6	2	10	42	3	<u>8</u>	<u>1302</u>	6	3	10	1816
kA042	16	3	5	8	875	6	1	10	43	3	7	1291	7	4	13	1814
<u>kA043</u>	16	5	5	<u>8</u>	<u>1177</u>	6	3	10	65	3	<u>8</u>	<u>1580</u>	6	2	13	1803
<u>kA044</u>	16	4	6	<u>9</u>	<u>1262</u>	5	1	10	44	3	<u>9</u>	<u>1782</u>	5	3	9	1820
kA045	14	4	5	8	1035	6	2	9	36	3	8	1003	6	4	12	1840
kA046	14	4	5	8	931	6	4	9	35	3	7	1001	7	5	11	1800
kA047	16	4	5	9	1033	5	1	8	54	-	-	-	-	-	-	-
<u>kA048</u>	14	4	5	<u>7</u>	<u>909</u>	7	3	9	14	3	<u>7</u>	<u>991</u>	7	4	12	1830
kA049	16	4	6	7	1159	7	3	9	50	3	6	1116	8	5	9	1803

TABLE 4.4 – Comparaison matheuristique-PLNE sous *l'objectif1* : instances à 50 services

#### 4.7.2.2 Minimisation de la distance

Les résultats obtenus lors de la minimisation des distances parcourues par les personnels sont rapportés dans le tableau 4.5. Nous remarquons que le nombre de personnels actifs  $\#id_p$  pour la matheuristique et le *PLNE* varie respectivement dans les intervalles  $[11, 18]$  et  $[12, 18]$ . Sur les 50 instances, 19 fournissent le même nombre de personnels actifs avec les deux méthodes, 16 et 3 instances donnent un  $\#id_p$  avec la matheuristique qui est respectivement supérieur de 1 et de 2 de celui du *PLNE*. Sur le reste des instances, la matheuristique donne un nombre de personnels actifs qui est moindre que celui du *PLNE*, telles que 4, 5 et 3 instances parmi les 50 instances ont des différences respectives égales à 1, 2 et 3.

Pour ce qui est des distances parcourues, le *PLNE* qui est résolu à l'optimum donne des distances qui sont largement inférieures à celles trouvées par la matheuristique. Par ailleurs, le temps de calcul du *PLNE* est généralement 3 fois plus grand que celui de la matheuristique, mais il reste raisonnable, au maximum 3 minutes de calcul sont enregistrées.

Ins	id <sub>p</sub>	matheuristique							PLNE							
		lb <sub>1</sub>	lb <sub>2</sub>	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps	PL	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps
kA000	14	4	4	13	397	4	1	8	46	1	12	56	4	1	12	120
kA001	14	4	4	14	699	3	1	9	63	29	14	141	3	1	6	132
kA002	16	4	6	16	923	4	1	8	48	132	16	381	3	1	5	108
kA003	14	4	5	13	863	4	1	9	42	122	14	275	3	1	7	146
kA004	12	4	4	11	863	5	2	10	38	104	12	176	4	2	7	119
kA005	14	4	5	14	690	4	1	8	35	34	14	181	3	1	8	126
kA006	18	5	6	18	1066	4	1	8	63	154	17	411	2	1	5	109
kA007	14	4	6	14	1158	4	1	7	63	105	14	373	3	1	9	115
kA008	16	4	6	16	994	5	1	7	28	176	16	404	3	2	5	118
kA009	14	4	5	14	1369	3	1	9	56	46	12	194	4	1	7	108
kA010	14	4	4	14	1336	4	1	8	23	30	13	185	3	1	9	143
kA011	16	3	5	16	757	4	1	10	23	69	16	108	3	1	6	109
kA012	14	4	5	14	568	4	1	9	23	47	14	113	3	1	8	138
kA013	16	4	16	16	979	5	2	9	77	32	16	217	3	1	6	115
kA014	12	3	6	12	518	5	1	9	58	41	12	192	4	1	9	139
kA015	14	4	4	14	836	4	1	10	54	58	13	148	3	1	11	113
kA016	14	4	5	12	766	5	2	9	66	62	14	223	3	1	7	126
kA017	16	4	6	16	1283	4	1	8	118	76	15	327	3	1	7	133
kA018	18	4	5	18	1194	3	1	8	79	75	18	292	2	1	5	114
kA019	16	5	5	16	686	3	1	8	70	110	16	247	3	1	6	129
kA020	14	4	5	12	1110	5	2	9	106	163	14	275	3	1	8	119
kA021	12	4	5	11	775	4	1	9	25	61	11	231	4	2	9	115
kA022	16	3	6	16	1239	5	2	8	72	174	15	443	3	1	6	107
kA023	14	4	5	14	809	4	1	9	49	67	14	196	3	1	9	133
kA024	14	5	5	14	752	5	1	9	38	150	14	168	3	1	8	110
kA025	14	4	6	14	1481	5	1	9	32	103	14	447	3	1	7	123
kA026	14	4	5	14	960	4	1	8	98	65	13	319	3	2	9	165
kA027	16	4	6	13	884	4	1	9	38	82	15	149	3	1	7	112
kA028	16	4	6	13	1108	4	1	8	35	90	15	310	3	1	7	114
kA029	14	5	5	12	1111	4	1	7	244	124	13	228	3	1	6	113
kA050	16	4	5	12	1116	4	1	9	68	221	15	474	3	1	6	131
kA031	14	4	6	14	1628	4	1	8	29	97	14	279	3	1	9	115
kA032	16	4	6	16	785	3	1	6	46	32	15	172	3	1	6	122
kA033	16	3	5	16	926	5	1	10	61	53	14	279	3	1	9	130
kA034	16	5	5	13	730	4	1	8	44	39	16	185	3	1	5	130
kA035	14	4	4	12	867	4	1	10	87	51	14	108	3	1	9	116
kA036	16	5	5	16	1253	4	1	10	39	52	15	187	3	1	7	120
kA037	16	4	6	13	857	4	1	9	53	58	16	174	3	1	5	116
kA038	16	4	6	14	394	5	1	10	45	10	15	56	3	1	8	161
kA039	18	4	5	17	986	4	1	9	59	82	15	272	3	1	11	127
kA040	14	4	4	14	840	4	1	9	32	47	14	236	3	2	7	108
kA041	16	3	5	15	793	4	1	7	45	130	14	249	3	2	5	109
kA042	16	3	5	14	970	4	2	10	44	131	13	253	3	2	8	130
kA043	16	5	5	15	1017	4	1	8	70	137	15	205	3	1	8	132
kA044	16	4	6	16	1063	3	1	9	45	188	16	474	3	1	5	108
kA045	14	4	5	14	960	5	1	8	36	42	13	151	3	2	8	119
kA046	14	4	5	14	684	4	1	8	36	71	13	238	3	2	7	123
kA047	16	4	5	16	762	3	1	9	53	102	15	208	3	1	7	117
kA048	14	4	5	14	864	4	1	8	15	80	13	192	3	2	6	112
kA049	16	4	6	16	1209	3	1	9	45	43	15	203	3	1	6	114

TABLE 4.5 – Comparaison matheuristique-PLNE sous *l'objectif2* : instances à 50 services

## 4.8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une matheuristique définie pour résoudre le  $RP - HAD$  sur une journée de planification. Celle-ci est basée sur quatre grandes étapes. Elle commence par l'affectation des personnels aux tranches horaires, puis la clusterisation des services qui nous donne des groupes de services avec lesquels des tournées se forment grâce au PCTSPTW. Puis, nous planifions ces tournées pour les personnels de santé. Afin de valider notre méthode nous l'avons testé avec les mêmes instances utilisées pour tester le  $PLNE$  défini dans le chapitre 3 et ceci avec deux objectifs différents ; la minimisation du nombre de personnels actifs, puis la minimisation de la distance totale parcourue par les personnels.

En comparant les résultats obtenus avec le premier objectif, nous constatons que la matheuristique se comporte très bien. Cette dernière est basée sur le calcul de deux bornes inférieures pour le problème, la première borne est meilleure que la valeur de la relaxation continue donnée par cplex pour le  $PLNE$  et la deuxième borne améliore de beaucoup la première et se rapproche un peu plus de la solution finale (qui est optimale pour les instances à 30 services). Dans certains cas, ces bornes égalent même la valeur de la solution optimale. Pour ce qui est du nombre de personnels actifs, notre méthode dans le pire des cas fait travailler 3 personnels en plus par rapport au  $PLNE$ , mais dans la plupart des cas elles ont le même nombre. 50% des instances ont le même nombre de personnels actifs avec les deux méthodes, dans 38% des instances la matheuristique donne un personnel en plus par rapport au  $PLNE$ , tandis qu'avec 4% et 5% des instances, la matheuristique donne respectivement deux et trois personnels en plus par rapport au  $PLNE$ . Enfin avec les 3% autres instances, le  $PLNE$  ne trouve pas de solutions au bout de 30 minutes de calcul.

Le temps de calcul mis par le  $PLNE$  pour les instances ayant 50 services est très important comparé à celui passé par la matheuristique qui ne dépasse pas 3 minutes.

Lors de la minimisation des distances parcourues, la matheuristique fonctionne moins bien que le  $PLNE$ , en effet, le gap entre les distances trouvées par les deux méthodes est très important et ceci est dû à la structure de la matheuristique qui est basée sur les bornes inférieures liées au nombre de personnels actifs et non pas aux distances. Par conséquent la matheuristique a tendance à utiliser moins de personnels que le  $PLNE$ , avec 42% des instances la matheuristique trouve moins de personnels actifs que le  $PLNE$  lors de la minimisation des distances.

La matheuristique que nous venons de présenter dans ce chapitre est définie pour une journée de planification et nous avons observé que cette méthode



fonctionne bien, c'est pourquoi, dans le chapitre suivant nous avons décidé d'étendre cette méthode sur un horizon de planification plus grand.



# Variante sur un horizon étendu

---

## 5.1 Motivations

Lors de notre analyse de la littérature, nous avons constaté que dans les différents articles étudiés, les contraintes liées à la planification sur un horizon étendu ne sont souvent pas considérées. Ceci nous a motivés à aller dans ce sens et à considérer en plus des contraintes induites par la planification sur une journée, celles qui relèvent de la planification sur un horizon plus étendu. Ces dernières concernent la gestion des jours de travail et de repos des personnels, et la régularité des personnels chez les mêmes patients.

Afin de répondre à ce problème, nous allons utiliser une variante de la mathheuristique présentée dans le chapitre précédent. En effet, vue la structure de la méthode élaborée pour le cas de la planification d'une journée, il est possible de l'utiliser pour une planification sur un horizon plus étendu. Ceci se fait en trois grandes étapes, affectation des personnels aux tranches horaires, construction des tournées pour l'horizon considéré puis planification sur  $H$  en considérant toutes les contraintes supplémentaires.

### 5.1.1 Affectation des personnels aux tranches horaires

Comme pour le cas de la planification sur une journée, nous commençons par la préaffectation des personnels aux tranches horaires. Ceci se fait exactement de la même manière que celle définie dans la section 4.3. Pour chaque jour de l'horizon  $t \in H$ , l'ensemble des personnels  $P_t$  est représenté par un autre ensemble  $P'_t$  tel que, chaque personnel appartenant à ce dernier ait une fenêtre de temps qui s'accorde avec l'une des fenêtres de temps des tranches horaires.

### 5.1.2 Construction des tournées sur l'horizon $H$

Le but de cette partie étant de construire un ensemble de tournées réalisables, nous utilisons, pour chaque jour de l'horizon, la méthode élaborée pour le routage sur une journée. Ensuite, toutes les tournées sont regroupées dans

un même ensemble que nous ferons passer au problème de planification, L'algorithme 5.1.2, résume les étapes à suivre pour la construction des tournées.

---

**Algorithme 4** Construction des tournées sur l'horizon  $H$ 


---

**pour tout**  $t \in H$  **faire**

Faire appel à l'algorithme 3

On obtient un lot de tournées  $R_t$

**fin pour**

Regrouper dans  $R$  toutes les tournées obtenues,  $R = \cup_{t \in H} R_t$

---

### 5.1.3 Planification des personnels avec des contraintes de périodicité

Soit  $R = \cup_{t \in H} R_t$ , l'ensemble des tournées réalisables pour tout l'horizon  $H$ ,  $Rid_s^i$  est ensemble des tournées desservant le patient  $i \in id_s$  et  $Rid_p^k$  représente l'ensemble des tournées desservies par les personnels ayant le même identifiant  $k \in id_p$ . Le problème de planification est modélisé sous forme d'un programme mathématique, dans lequel les contraintes 4.24 et 4.25 du problème (P4) sont représentées pour chaque jour de l'horizon  $H$ . De plus nous rajoutons les contraintes listées ci-dessous.

#### 5.1.3.1 Jours de travail successifs

La contrainte ci-dessous exprime le fait qu'un personnel ne doit pas travailler plus de  $c$  jours successifs. Par ailleurs, sur un horizon de 14 jours qui est l'horizon que nous considérons, la constante  $c$  égale 6. Ainsi dans la contrainte 5.1, nous modélisons cette contrainte de manière à ce que sur 7 jours successifs le personnel doit avoir au moins un jour de repos.

$$\sum_{l \in R_t^{k'}} \sum_{t=t'}^{t'+c+1} \sum_{k' \in I_k} y_l \leq c \quad \forall k \in id_p, \forall t' \in \{1, 2, \dots, |H| - c\} \quad (5.1)$$

En plus des  $c$  jours successifs, nous considérons également qu'un personnel s'il est amené à intervenir en HAD, doit le faire pour au moins deux jours successifs.

$$\sum_{k' \in I_k} \sum_{l \in R_t^{k'}} y_l \leq \sum_{k' \in I_k} \left( \sum_{l \in R_{t-1}^{k'}} y_l + \sum_{l \in R_{t+1}^{k'}} y_l \right) \quad \forall k \in id_p, \forall t \in H \quad (5.2)$$

### 5.1.3.2 Jours de repos

Pour ce qui est des jours de repos, nous avons opté pour les deux jours de repos successifs sur l'horizon de 14 jours.

$$1 - \sum_{k' \in I_k} \sum_{l \in R_t^{k'}} y_l \leq - \sum_{k' \in I_k} \left( \sum_{l \in R_{t-1}^{k'}} y_l + \sum_{l \in R_{t+1}^{k'}} y_l \right) + 2 \quad \forall k \in id_p, \forall t \in H \quad (5.3)$$

### 5.1.3.3 Régularité des personnels chez les patients

Dans notre démarche nous voulons que les personnels soient fidèles aux patients dont ils s'occupent, mais garder le même personnel pour un même patient tout au long de ses soins n'est pas toujours possible. Par conséquent, au lieu d'essayer de garder un même personnel pour un même patient, nous allons minimiser le nombre de personnels différents intervenant chez un même patient. Pour pouvoir modéliser cette contrainte, nous avons besoin de définir les ensembles suivants. Soit  $ID_i, \forall i \in id_s$  l'ensemble des personnels ayant des tournées qui desservent le patient  $i$ . Ceci implique que  $ID_i = \{k \in id_p / Rid_s^i \cap Rid_p^k \neq \emptyset\}, \forall i \in id_s$ . Rappelons que  $Sid_s^i$  est l'ensemble des services liés au patient  $i$ . Considérons la contrainte ci-dessous.

$$|Sid_s^i| z_{ik} \geq \sum_{l \in Rid_s^i \cap Rid_p^k} y_l, \forall i \in id_s, \forall k \in ID_i,$$

Ainsi la variable  $z_{ik}$  égale 1 si le personnel  $k$  intervient au moins une fois chez le patient  $i$ . Elle vaut 0 sinon. Maintenant considérons la contrainte suivante :

$$N_i \geq \sum_{k \in ID_i} z_{ik}, \forall i \in id_s$$

Ainsi la variable  $N_i$  nous donne le nombre de personnels différents s'occupant du patient  $i$ .

### 5.1.3.4 Fonction objectif

Comme pour le problème de planification sur une journée, nous allons définir deux fonctions objectif. Cependant, contrairement à la planification sur une journée, ces dernières sont pondérées car nous rajoutons la régularité des personnels chez les patients aux objectifs. Ceci se fait comme suit :

**Minimisation du nombre de personnels actifs :**

$$\min \alpha_1 \sum_{l \in R} y_l + \alpha_2 \sum_{i \in id_s} N_i$$

Les deux termes de la fonction objectif sont du même ordre de grandeur, le premier représente le nombre de personnels actifs et le deuxième donne le nombre de personnels différents intervenant chez les patients. Ainsi pour avoir les valeurs des poids il suffit que  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ . Mais dans notre cas on privilégie la minimisation du nombre de personnels actifs c'est pourquoi nous rajoutons cette contrainte  $\alpha_1 = 2 * \alpha_2$ . Par conséquent, nous avons le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \alpha_1 + \alpha_2 = 1 \\ \alpha_1 = 2 \alpha_2 \end{cases} \quad (5.4)$$

De 5.4 on obtient  $\alpha_1 = \frac{2}{3}$  et  $\alpha_2 = \frac{1}{3}$ . Le problème de planification est donc comme suit :

$$\begin{aligned} \min & \frac{2}{3} \sum_{l \in R} y_l + \frac{1}{3} \sum_{i \in id_s} N_i \\ & \sum_{l \in R_t^i} y_l = 1 \quad \forall i \in S_t, \forall t \in H \end{aligned} \quad (5.5)$$

$$\sum_{l \in R_t^k} y_l \leq 1 \quad \forall k \in P_t, \forall t \in H \quad (5.6)$$

$$|Sid_s^i| z_{ik} \geq \sum_{l \in Rid_s^i \cap Rid_p^k} y_l \quad \forall i \in id_s^i, \forall k \in ID_i \quad (5.7)$$

$$N_i \geq \sum_{k \in ID_i} z_{ik} \quad \forall i \in id_s^i \quad (5.8)$$

$$\sum_{t=t'}^{t'+c+1} \sum_{k' \in I_k} \sum_{l \in R_t^{k'}} y_l \leq c \quad \forall k \in id_p, \forall t' \in \{1, 2, \dots, |H| - c\} \quad (5.9)$$

$$1 - \sum_{k' \in I_k} \sum_{l \in R_t^{k'}} y_l \leq - \sum_{k' \in I_k} \left( \sum_{l \in R_{t-1}^{k'}} y_l + \sum_{l \in R_{t+1}^{k'}} y_l \right) + 2 \quad \forall k \in id_p, \forall t \in H \quad (5.10)$$

$$\sum_{k' \in I_k} \sum_{l \in R_t^{k'}} y_l \leq \sum_{k' \in I_k} \left( \sum_{l \in R_{t-1}^{k'}} y_l + \sum_{l \in R_{t+1}^{k'}} y_l \right) \quad \forall k \in id_p, \forall t \in H \quad (5.11)$$

$$y_l \in \{0, 1\} \quad \forall l \in R$$

$$N_i \in \mathbb{N} \quad \forall i \in id_s$$

$$z_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in id_s, \forall k \in id_p$$

**Minimisation de la distance parcourue par les personnels :**

$$\min \alpha_3 \sum_{l \in R} dist_l y_l + \alpha_2 \sum_{i \in id_s} w_i$$

L'objectif 2 somme deux quantités qui ne sont pas du même ordre de grandeur, la première, qui est la somme des distances, est de l'ordre du millier, et la deuxième est de l'ordre des centaines. Par conséquent, une normalisation des poids est indispensable, cette dernière se fait comme suit :

$$\begin{cases} \alpha_3 + \alpha_2 = 1 \\ \alpha_2 = 10\alpha_3 \end{cases} \quad (5.12)$$

de l'équation 5.12 on déduit que  $\alpha_2 = \frac{10}{11}$  et  $\alpha_3 = \frac{1}{11}$ . Le problème de planification est donc comme suit :

$$\begin{aligned} \min & \frac{1}{11} \sum_{l \in R} dist_l y_l + \frac{10}{11} \sum_{i \in id_s} N_i \\ & \sum_{l \in R_t^i} y_l = 1 & \forall i \in S_t, \forall t \in H \\ & \sum_{l \in R_t^k} y_l \leq 1 & \forall k \in P_t, \forall t \in H \\ & |Sid_s^i| z_{ik} \geq \sum_{l \in Rid_s^i \cap Rid_p^k} y_l & \forall i \in id_s^i, \forall k \in ID_i \\ & N_i \geq \sum_{k \in ID_i} z_{ik} & \forall i \in id_s^i \\ & \sum_{t=t'}^{t'+c+1} \sum_{k' \in I_k} \sum_{l \in R_t^{k'}} y_l \leq c & \forall k \in id_p, \forall t' \in \{1, 2, \dots, |H| - c\} \\ & 1 - \sum_{k' \in I_k} \sum_{l \in R_t^{k'}} y_l \leq - \sum_{k' \in I_k} \left( \sum_{l \in R_{t-1}^{k'}} y_l + \sum_{l \in R_{t+1}^{k'}} y_l \right) + 2 & \forall k \in id_p, \forall t \in H \\ & \sum_{k' \in I_k} \sum_{l \in R_t^{k'}} y_l \leq \sum_{k' \in I_k} \left( \sum_{l \in R_{t-1}^{k'}} y_l + \sum_{l \in R_{t+1}^{k'}} y_l \right) & \forall k \in id_p, \forall t \in H \\ & y_l \in \{0, 1\} & \forall l \in R \\ & N_i \in \mathbb{N} & \forall i \in id_s \\ & z_{ik} \in \{0, 1\} & \forall i \in id_s, \forall k \in id_p \end{aligned}$$

La méthode est résumée dans la figure 5.1.

## 5.2 Résultats expérimentaux

Cette méthode est testée sur 111 instances définies sur un horizon de 14 jours dans lesquelles 50 patients sont considérés. Pour chaque instance, il y a

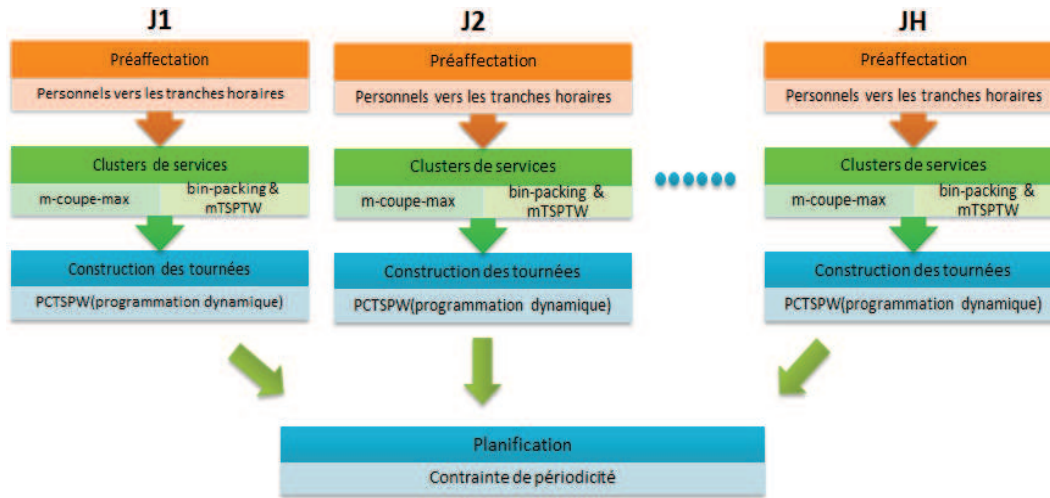


FIGURE 5.1 – Planification et routage sur un horizon plus étendu

au moins 25 services par jour et chaque patient demande en moyenne 7 services sur tout l'horizon. 14 à 18 personnels de trois qualifications différentes sont mis à disposition pour effectuer les services demandés. Une tranche horaire par qualification est considérée, ces dernières ont des fenêtres de temps données en minutes égales à  $[0, 700]$  qui est équivalente à une journée de travail de 8h à 19h30. La durée des soins varie dans l'intervalle  $[10, 60]$ , la taille des fenêtres de temps est entre 30 minutes et une heure et enfin les localisations géographiques sont générées aléatoirement sur un carré de  $100 \times 100$  et les distances  $d_{ij}$  sont les distances Euclidiennes entre deux localisations. La méthode est codée en C++, et le problème de planification est codé sous Cplex IBM solver version 12.6 et sur une machine avec les caractéristiques suivantes : Bi Xeon quad core 2,8 Ghz - 16 Go RAM - 8 cœurs.

Dans les deux tableaux 5.1 et 5.2 nous rapportons les résultats obtenus sur les 50 premières instances, les résultats obtenus pour les 111 instances sont rapportées dans les tableaux A.7, A.8 disponibles en annexe. Nous rapportons sur ces tableaux  $|id_p|$  et  $nb_s$  qui représentent respectivement le nombre de personnels et le nombre de services considérés, nous rapportons également pour chaque instance, la moyenne, le nombre minimal et le nombre maximal de services par patients. Par ailleurs, les critères que nous avons jugés bon à mettre en avant pour analyser notre méthode sont :  $\#id_p$  qui représente le nombre de personnels actifs sur tout l'horizon ;  $\#id_p/jour$  qui est le nombre de personnels actifs par jour ;  $\#id_p/patient$  qui donne le nombre de personnels différents intervenant chez un même patient ; le nombre de jours de travail et de repos par personnels ; la distance totale parcourue par les personnels et



enfin le temps de calcul.

### 5.2.1 Minimisation du nombre de personnels actifs

Après analyse des résultats donnés dans le tableau 5.1, on remarque qu'au maximum 11 personnels parmi 14 ou 16 (selon l'instance considérée) sont affectés à l'HAD sur les 14 jours de planification, ceci signifie qu'au moins 3 personnels travaillent exclusivement à l'hôpital durant cet horizon.

D'autre part, en moyenne 2 personnels différents interviennent chez un même patient sachant que la demande moyenne par patient est de 7 services. Cependant, la demande minimale et maximale sont respectivement de 4 et 14, et le nombre minimal et maximal de personnels différents intervenant chez un même patient sont respectivement de 1 et 5. Prenons par exemple la première instance de ce tableau, nous avons au maximum 4 personnels par patient, sachant que nous avons au moins un patient qui demande 13 services, ceci implique qu'au moins trois services parmi les 13 sont faits par la même personne, de plus, nous avons également un patient avec un seul intervenant, sachant qu'au minimum nous avons 4 services par patient, donc les quatre services sont faits par un même intervenant.

Rappelons que les contraintes relatives aux journées de travail et aux jours de repos sont les suivantes :

1. ne pas travailler plus de 6 jours successifs,
2. si un personnel intervient en HAD il doit le faire pour au moins 2 jours successifs,
3. enfin si un personnel est au repos, il doit l'être pour au moins deux jours successifs.

Dans le tableau 5.1 nous remarquons que le nombre maximal de jours de travail par personnel est de 12, ceci s'aligne à nos contraintes, en effet sur les 14 jours au maximum 6 jours successifs sur 7, donc chaque 6 jours le personnel doit prendre un repos et ce dernier est forcément de deux jours successifs d'où les 12 jours de travail maximum. En moyenne nous avons 7 à 9 jours de travail, et le nombre de jours de travail minimal est de 1. Sauf parmi les contraintes liées aux jours successifs de travail, une contrainte imposant au moins deux jours de travail successifs, ceci implique que l'unique jour de travail correspond au 14<sup>me</sup> jour de l'horizon. Pour palier à ce problème, les spécialistes de la planification considèrent que lors de la planification pour les 14 jours suivants, ce personnel doit travailler le premier jour de l'horizon. Pour les jours de repos, en moyenne les personnels disposent entre 4 et 6 jours de repos sur 14 ce qui leur permet d'intervenir à l'hôpital.

Un deuxième point à soulever concernant la planification pour les 14 prochains jours, est qu'on risque de se retrouver en pénurie de personnels pour les premiers jours de planification. En effet, vu que les personnels sont autorisés à travailler au maximum 6 jours successifs, si durant les 6 derniers jours de l'horizon considéré, un grand nombre de personnels sont actifs alors pour le premier jour de l'horizon suivant ces personnels doivent être au repos. Pour palier à ce problème nous suggérons de rajouter une contrainte pour le problème de planification. Cette dernière impose un nombre limité de personnels se retrouvant dans ce cas.

Les distances parcourues varient dans l'intervalle [9918, 23530]. Le temps de calcul varie entre 357 et 665 secondes ce qui fait que la méthode met au maximum 10 minutes, sachant que le temps limite pour le problème de planification est de 5 minutes. Dans toutes les instances, le problème de planification n'est pas résolu à l'optimum.

### 5.2.2 Minimisation de la distance parcourue

Après analyse des résultats donnés dans le tableau 5.2, on remarque que le nombre de personnels actifs varie de 10 à 15 personnels parmi 14 ou 16 personnels (selon l'instance considérée), ceci signifie qu'au moins 1 personnel travaille exclusivement à l'hôpital durant cet horizon de temps.

Pour ce qui est de la régularité des personnels chez les patients, en moyenne 3 personnels différents interviennent chez un même patient sachant que la demande moyenne par patient est de 7 services. Cependant, la demande minimale et maximale sont respectivement de 4 et 14, et le nombre minimal et maximal de personnels différents intervenant chez un même patient sont respectivement de 1 et 6. Prenons par exemple la première ligne de ce tableau, nous avons au maximum 5 personnels par patient, sachant que nous avons au moins un patient qui demande 13 services, ceci implique qu'au moins trois services parmi les 13 sont faits par la même personnel, de plus, nous avons également au moins un patient avec deux intervenants, sachant qu'au minimum nous avons 4 services par patient.

Concernant les jours de travail ; la moyenne du nombre de jours de travail est de 6 ou de 7 jours, au maximum les personnels travaillent durant 12 jours sur les 14 jours de planification. Pour les jours de repos, en moyennes les personnels disposent de 6 à 8 jours de repos sur 14 ce qui leur permet d'intervenir à l'hôpital. Les distances parcourues varient dans l'intervalle [6885, 26028]. Le temps de calcul varie entre 136 et 642 secondes ce qui fait que la méthode met au maximum 10 minutes. Le problème de planification est résolu à l'optimum.

### 5.2.3 Comparaison des résultats obtenus avec les deux objectifs

Nous comparons dans le tableau 5.3 les résultats obtenus en minimisant le nombre de personnels actifs avec ceux obtenus en minimisant la distance totale parcourue par les personnels. On constate que la différence entre le nombre de personnels actifs obtenus avec les deux méthodes varie entre 2 et 6. Par ailleurs, le nombre de personnels différents intervenant chez un même patient est également différent, en effet, avec le premier objectif, la moyenne du nombre de personnels différents par patient est de 2, et le maximum varie entre 3 et 5, tandis qu'avec le deuxième objectif, la moyenne varie entre 2 et 3 personnels, et le maximum varie entre 4 et 6 personnels différents. Sur ces deux points, on conclut que lors de la minimisation du nombre de personnels actifs, il y a moins de personnels différents qui interviennent chez un même patient que lors de la minimisation des distances. Ceci est dû au fait que la minimisation des personnels actifs va dans le même sens que la minimisation du nombre de personnels différents intervenants chez un même patient.

Cependant, la différence entre les distances totales trouvées avec les deux objectifs ne sont pas toujours positives, c'est-à-dire que pour certaines instances (voir les instances soulignées dans le tableau 5.3) la distance trouvée lors de la minimisation du nombre de personnels est plus petite que celle trouvée lors de la minimisation de la distance. Ceci est bien possible, en effet, lors de la clusterisation de l'ensemble des services, nous construisons des clusters de services non disjoints, par conséquent, dans le problème de planification, les tournées peuvent avoir des services en commun. Afin de garantir une solution finale, nous relaxons la contrainte (5.5) qui conduit à couvrir chaque service par une et une seule tournée. La relaxation de cette contrainte donne la possibilité de couvrir les services par plusieurs tournées (que nous appellerons les services *sur-couverts*) et la contrainte devient  $\sum_{l \in R_t^i} y_l \geq 1 \forall i \in S_t, \forall t \in H$ .

Après qu'une solution soit trouvée, nous supprimons les services qui sont sur-couverts dans les tournées qui les couvrent de sorte à garder ces services dans une seule tournée. Cette suppression se fait comme suit :

1. Supprimer le service *sur-couvert* dans les tournées dont le personnel qui l'effectue est le moins fidèle chez le patient lié à ce service
2. En cas d'égalité : si deux tournées ont des personnels ayant le même degré de fidélité chez ce patient, deux cas se présentent :
  - (a) Dans le cas de la minimisation du nombre de personnels actifs : supprimer le service dans la tournée la plus chargée
  - (b) Dans le cas de la minimisation de la distance : supprimer le service dans la tournée qui nous fait gagner le plus en terme de distance

Lors de la planification, un lot de tournées est sélectionné pour être dans la solution, avec le premier objectif. Ce lot est choisi de sorte à minimiser le nombre de personnels actifs, tandis qu'avec le deuxième objectif est choisi afin de minimiser la distance parcourue. Avant de passer à la phase de suppression des services sur-couverts, la distance parcourue obtenue avec le premier objectif est forcément plus grande que celle obtenue en minimisant la distance. Cependant, ces distances changent lors de la suppression des services, et nous n'avons aucune garantie que cette différence soit respectée.

Mis à part les quatre instances où la distance parcourue par les personnels est plus petite lors de la minimisation des personnels actifs, les autres instances ont toutes des distances beaucoup plus grandes que celles obtenues avec la minimisation de la distance.

### 5.3 Conclusion

Dans ce chapitre, une variante de la méthode décrite dans le chapitre précédent est présentée. Cette variante est définie pour un horizon de 14 jours. Nos motivations à vouloir travailler sur un horizon plus étendu, vient du fait que la plupart des articles trouvés dans la littérature traite le problème de routage et de planification des personnels en HAD sur une journée de planification. De plus, dans le peu de travaux traitant la planification sur plus d'une journée, les contraintes liés aux jours de travail ou aux jours de repos successifs ne sont pas considérées. C'est pourquoi nous avons rajouté au problème de planification des contraintes dites de périodicité, dans lesquelles les jours successifs de travail et de repos sont en accord avec les lois du travail.

Comme il s'agit de la planification des soins à domicile, la fidélité des personnels chez les patients est très importante, nous avons donc pris en compte ce point et nous avons minimisé le nombre de personnels différents intervenant chez un même patient.

Cette méthode est testée sur des instances définies sur 14 jours, 50 patients ayant chacun en moyenne 7 à 8 services étalés sur les 14 jours. Ces instances sont testées avec les deux objectifs séparément. Dans un premier temps, nous avons minimisé le nombre de personnels actifs, d'après les résultats obtenus, la méthode fonctionne bien, car sur 14 à 16 personnels, au maximum 11 sont actifs, et nous avons en moyenne deux intervenants chez un même patient. Concernant les jours de travail, en moyenne les personnels travaillent 6 à 7 jours sur les 14.

Nous avons également testé la méthode en minimisant la distance parcourue, en analysant les résultats obtenus et en les comparant avec ceux obtenus avec le premier objectif, nous constatons que la matheuristique utilise plus de

personnels et le nombre d'intervenants chez un même patient est plus grand. Pour ce qui est des distances parcourues, la différence est conséquente sauf pour quatre instances, où la distance est plus petite avec le premier objectif.

On conclut que cette méthode est prometteuse pour le cas où l'on minimise le nombre de personnels actifs. Par contre elle est moins adaptée à la minimisation des distances.

D'après les résultats obtenus dans le cas de la minimisation de la distance parcourue, nous avons pensé à étudier le problème multi-objectif qui consiste à minimiser à la fois le nombre de personnels actifs et la distance parcourue. Pour ce faire, notre méthode doit être adaptée afin de considérer ces deux objectifs. Les deux objectifs considérés séparément sont à minimiser, ces derniers peuvent être reformulés via une fonction objectif qui pondère les deux objectifs. Ainsi, la fonction objectif définie dans la partie planification des personnels peut être remplacée par

$$\min \alpha_1 \sum_{l \in R} y_l + \alpha_2 \sum_{l \in R} dist_l y_l = \sum_{l \in R} (\alpha_1 + \alpha_2 dist_l) y_l$$

Vue la forme de cette fonction, on déduit que minimiser celle-ci, en utilisant une pondération des fonctions objectifs, revient en quelque sorte à minimiser la distance totale, et compte tenu des résultats obtenus pour la minimisation de la distance, notre méthode n'est pas très adaptée.

D'autre part, en dehors de notre méthode, l'étude du problème multi-objectif reste une bonne perspective pour le problème. En effet, les deux objectifs sont intéressants pour les structures d'hospitalisation à domicile. Bien que les deux objectifs ne soient pas totalement orthogonaux, l'étude multi-objectif peut se faire de manière efficace. Vue la complexité de notre problème, la méthode que nous pensons être prometteuse est l'optimisation avec ordre lexicographique sur les critères. En effet, cette méthode consiste à trier les deux critères selon un ordre d'importance. Pour chaque critère pris par ordre d'importance décroissant, les solutions sous optimales sont éliminées. Ainsi, sont gardées successivement les solutions optimales pour le premier critère, puis celles pour le deuxième critère parmi celles qui sont optimales pour le premier. L'intérêt de cette méthode est que les fonctions objectifs sont linéaires puisqu'à chaque itération de l'algorithme, un seul critère est utilisé; on obtient ainsi des temps d'exécution raisonnables. De plus, les solutions obtenues sont nécessairement Pareto-optimales (il n'existe pas de solution strictement meilleure sur la partie de la courbe de Pareto considérée).

Ins	id <sub>p</sub>	nb <sub>s</sub>	nb <sub>s</sub> /patient			#id <sub>p</sub>	#id <sub>p</sub> /jour			#id <sub>p</sub> /patient			jours travail			jours repos			dist	temps
			moy	min	max		moy	min	max	moy	min	max	moy	min	max	moy	min	max		
kA000	14	398	7	4	13	9	5	3	6	2	1	4	7	2	12	6	2	12	11373	478
kA001	14	387	7	4	14	10	5	3	7	2	1	4	8	2	12	5	2	12	10848	454
kA002	16	399	7	4	14	10	5	3	7	2	1	4	8	1	11	6	3	13	16368	637
kA003	14	383	7	4	12	10	5	4	7	2	1	3	8	2	11	5	3	12	15130	541
kA004	12	407	8	4	14	10	6	5	7	2	1	5	8	2	12	5	2	12	13373	557
kA005	14	391	7	4	13	11	6	5	7	2	1	4	8	3	12	6	2	11	17731	543
kA006	14	402	8	4	13	10	5	4	7	2	1	4	7	3	12	6	2	11	14675	577
kA007	14	402	8	4	13	9	5	4	7	2	1	4	9	6	11	4	3	8	13157	513
kA008	16	425	8	4	14	10	5	5	7	2	1	4	7	3	12	6	2	11	14035	357
kA009	12	423	8	4	14	9	5	4	7	2	1	4	8	5	12	5	2	9	13638	539
kA010	14	404	8	4	13	10	5	4	7	2	1	4	7	2	12	6	2	12	13993	598
kA011	16	426	8	5	14	9	6	5	7	2	1	3	9	6	12	4	2	8	15164	371
kA012	12	430	8	4	14	9	5	5	7	2	2	3	8	3	11	5	3	11	16972	503
kA013	16	412	8	4	14	9	5	4	7	2	1	3	9	4	12	4	2	10	22318	658
kA014	14	406	8	4	12	8	4	3	6	2	1	4	8	2	12	6	2	12	11756	384
kA015	14	406	8	4	12	10	5	5	7	2	1	4	8	4	12	5	2	10	11349	499
kA016	14	408	8	3	14	10	6	4	8	2	1	4	8	6	11	5	3	8	15553	522
kA017	16	398	7	4	14	10	6	5	8	2	1	4	8	2	11	5	3	12	16026	521
kA018	14	389	7	4	12	11	6	4	8	2	1	4	8	2	12	5	2	12	15283	665
kA019	16	411	8	4	14	10	5	5	7	2	2	4	8	5	11	5	3	9	9955	417
kA020	16	411	8	4	14	9	5	5	7	2	1	3	8	5	10	5	4	9	14046	372
kA021	16	406	8	4	14	9	5	4	7	2	1	3	8	4	12	5	2	10	11980	638
kA022	14	397	7	4	13	8	4	4	6	2	1	3	8	2	12	5	2	12	11434	556
kA023	16	406	8	4	14	8	5	4	6	2	1	3	9	3	12	4	2	11	12907	600
kA024	16	411	8	4	14	10	5	4	9	2	1	4	7	2	11	6	3	12	13695	511
kA025	16	407	8	4	14	11	5	4	7	2	1	4	7	2	12	6	2	12	12885	370
kA026	14	403	8	5	14	9	5	5	6	2	2	4	8	3	12	5	2	11	12445	370
kA027	16	409	8	5	14	9	5	4	7	2	1	3	9	5	11	4	3	9	12902	615
kA028	16	406	8	5	14	10	5	5	8	2	2	4	8	1	11	5	3	13	18345	414
kA029	14	403	8	4	13	9	5	3	7	2	1	4	8	2	12	6	2	12	10758	548
kA030	14	403	8	4	13	11	6	5	8	2	1	4	7	2	12	6	2	12	14255	375
kA031	14	432	8	5	14	10	5	4	7	2	1	3	8	4	12	5	2	10	13114	502
kA032	14	385	7	5	11	9	5	4	6	2	1	3	8	2	12	5	2	12	10529	570
kA033	14	407	8	4	14	10	5	4	7	2	1	4	8	2	12	6	2	12	17900	509
kA034	14	407	8	4	14	9	5	4	6	2	2	3	8	6	11	5	3	8	12454	449
kA035	14	392	7	4	14	9	5	4	7	2	1	4	8	3	12	5	2	11	12139	387
kA036	12	423	8	4	14	10	5	4	7	2	1	4	7	2	12	6	2	12	9918	492
kA037	14	397	7	4	13	8	4	3	6	2	1	3	8	5	11	5	3	9	11871	533
kA038	16	399	7	4	14	9	5	5	7	2	1	3	8	3	12	5	2	11	16893	441
kA039	16	403	8	4	14	11	6	5	8	2	1	5	8	2	11	5	3	12	23530	370
kA040	16	418	8	4	14	10	6	6	8	2	2	4	8	2	12	5	2	12	15102	489
kA041	14	390	7	4	11	10	5	4	8	2	2	4	8	5	11	5	3	9	12882	458
kA042	16	417	8	4	14	10	5	5	7	2	1	4	8	2	12	6	2	12	13142	634
kA043	14	410	8	4	12	9	5	4	7	2	1	3	8	4	12	5	2	10	11735	562
kA044	14	403	8	4	14	11	6	5	8	2	1	4	8	5	10	5	4	9	16230	427
kA045	16	414	8	4	14	10	6	6	8	2	1	4	9	6	11	4	3	8	18726	601
kA046	14	399	7	5	13	10	5	4	7	2	2	3	8	2	12	5	2	12	13639	487
kA047	14	398	7	4	14	9	5	4	7	2	1	5	8	3	12	5	2	11	12395	609
kA048	14	405	8	4	12	9	6	5	8	2	1	3	9	6	12	4	2	8	16269	526
kA049	14	420	8	5	14	9	5	4	7	2	1	4	8	4	12	5	2	10	12193	376

TABLE 5.1 – Résultat de la minimisation du nombre de personnels sur un horizon étendu

Ins	id <sub>p</sub>	nb <sub>s</sub> /patient			#id <sub>p</sub> /jour			#id <sub>p</sub> /patient			jours travail			jours repos			dist	temps		
		nb <sub>s</sub>	moy	min	max	#id <sub>p</sub>	moy	min	max	moy	min	max	moy	min	max					
kA000	14	398	7	4	13	11	5	5	7	2	2	5	7	1	11	6	3	13	7133	287
kA001	14	387	7	4	14	13	5	3	8	3	2	6	6	3	10	7	4	11	8215	547
kA002	16	399	7	4	14	14	6	3	9	3	2	4	6	1	11	7	3	13	12560	409
kA003	14	383	7	4	12	12	6	4	7	3	2	5	7	2	10	6	4	12	26028	593
kA004	12	407	8	4	14	12	6	5	7	3	1	5	7	1	11	6	3	13	10650	626
kA005	14	391	7	4	13	13	6	5	8	3	2	5	7	1	10	6	4	13	14270	393
kA006	14	402	8	4	13	12	5	4	7	3	1	5	6	2	10	7	4	12	11882	440
kA007	14	402	8	4	13	13	6	5	8	3	2	5	6	2	10	7	4	12	8972	418
kA008	16	425	8	4	14	15	6	5	9	3	1	5	6	2	11	7	3	12	9512	573
kA009	12	423	8	4	14	11	6	4	8	3	1	4	7	2	12	6	2	12	10182	283
kA010	14	404	8	4	13	13	6	4	8	3	2	5	6	2	11	7	3	12	10442	537
kA011	16	426	8	5	14	15	7	6	9	3	1	6	6	2	12	7	2	12	16784	572
kA012	12	430	8	4	14	11	5	5	7	2	2	4	7	5	10	6	4	9	14298	136
kA013	16	412	8	4	14	12	6	4	8	3	2	5	7	3	10	6	4	11	13583	633
kA014	14	406	8	4	12	10	5	4	7	2	1	5	7	4	10	6	4	10	10448	324
kA015	14	406	8	4	12	11	5	5	7	2	2	4	7	3	10	6	4	11	8887	400
kA016	14	408	8	3	14	13	6	4	9	3	2	6	7	1	11	7	3	13	14667	430
kA017	16	398	7	4	14	13	6	6	8	3	1	5	6	3	11	7	3	11	13274	524
kA018	14	389	7	4	12	13	6	4	8	3	1	5	7	2	12	6	2	12	10367	425
kA019	16	411	8	4	14	15	6	5	8	3	1	5	6	2	11	7	3	12	6885	449
kA020	16	411	8	4	14	13	6	5	8	3	2	5	6	2	11	7	3	12	12745	590
kA021	16	406	8	4	14	14	6	4	8	3	1	5	6	1	12	7	2	13	9208	357
kA022	14	397	7	4	13	12	5	4	8	3	1	5	6	3	10	7	4	11	8313	199
kA023	16	406	8	4	14	11	5	4	7	3	1	5	7	4	12	6	2	10	9659	517
kA024	16	411	8	4	14	13	5	4	9	2	2	5	6	2	12	7	2	12	11485	497
kA025	16	407	8	4	14	13	6	5	7	3	2	5	6	2	11	7	3	12	7957	604
kA026	14	403	8	5	14	13	5	5	7	3	2	6	6	3	10	7	4	11	10496	292
kA027	16	409	8	5	14	13	6	4	9	3	1	5	6	2	12	7	2	12	10431	276
kA028	16	406	8	5	14	15	7	5	9	3	2	6	6	2	11	7	3	12	13765	404
kA029	14	403	8	4	13	12	5	3	8	3	2	5	6	1	10	7	4	13	8671	260
kA030	14	403	8	4	13	14	6	5	9	3	1	6	6	2	10	7	4	12	10624	504
kA031	14	432	8	5	14	10	6	4	8	2	1	4	8	5	12	5	2	9	8766	421
kA032	14	385	7	5	11	12	5	4	7	3	1	5	6	2	11	7	3	12	8865	320
kA033	14	407	8	4	14	14	5	4	7	3	2	5	5	2	11	8	3	12	8627	449
kA034	14	407	8	4	14	11	5	5	7	2	2	4	7	2	12	6	2	12	8397	371
kA035	14	392	7	4	14	13	6	5	9	2	2	4	6	1	12	7	2	13	9593	343
kA036	12	423	8	4	14	12	5	4	7	3	1	5	6	3	12	7	2	11	8639	433
kA037	14	397	7	4	13	12	4	3	7	3	2	5	5	1	11	8	3	13	9816	352
kA038	16	399	7	4	14	14	6	5	8	3	2	5	6	1	10	7	4	13	13872	351
kA039	16	403	8	4	14	13	6	5	9	3	1	5	7	2	11	6	3	12	19847	607
kA040	16	418	8	4	14	14	6	6	9	3	2	5	6	2	12	7	2	12	17529	359
kA041	14	390	7	4	11	13	6	5	8	3	1	5	6	2	10	7	4	12	11862	380
kA042	16	417	8	4	14	14	6	5	8	3	2	6	6	1	11	7	3	13	10061	350
kA043	14	410	8	4	12	11	5	4	7	2	2	4	7	1	12	6	2	13	9412	433
kA044	14	403	8	4	14	13	6	5	8	3	2	5	7	4	11	6	3	10	18198	187
kA045	16	414	8	4	14	14	6	6	9	3	2	5	6	1	10	7	4	13	18137	555
kA046	14	399	7	5	13	12	6	5	8	2	2	5	7	2	10	6	4	12	10171	237
kA047	14	398	7	4	14	12	5	4	8	3	2	6	6	2	9	7	5	12	9748	353
kA048	14	405	8	4	12	12	6	5	8	3	2	5	7	3	12	6	2	11	12915	287
kA049	14	420	8	5	14	11	5	4	7	3	1	5	7	3	11	6	3	11	10684	652

TABLE 5.2 – Résultat de la minimisation de la distance sur un horizon étendu

Ins	min nombre de personnels actifs							min distance							différences entre les deux			
	#id <sub>P</sub> <sup>1</sup>	#id <sub>P</sub> /jour			#id <sub>P</sub> /patient			dist <sup>1</sup>	#id <sub>P</sub> <sup>2</sup>	#id <sub>P</sub> /jour			#id <sub>P</sub> /patient			dist <sup>1</sup> - dist <sup>2</sup>	#id <sub>P</sub> <sup>2</sup> - #id <sub>P</sub> <sup>1</sup>	
		moy	min	max	moy	min	max			moy	min	max	moy	min	max			dist <sup>2</sup>
kA000	9	5	3	6	2	1	4	11373	11	5	5	7	2	2	5	7133	4240	2
kA001	10	5	3	7	2	1	4	10848	13	5	3	8	3	2	6	8215	2633	3
kA002	10	5	3	7	2	1	4	16368	14	6	3	9	3	2	4	12560	3808	4
<u>kA003</u>	10	5	4	7	2	1	3	15130	12	6	4	7	3	2	5	26028	-10898	2
kA004	10	6	5	7	2	1	5	13373	12	6	5	7	3	1	5	10650	2723	2
kA005	11	6	5	7	2	1	4	17731	13	6	5	8	3	2	5	14270	3461	2
kA006	10	5	4	7	2	1	4	14675	12	5	4	7	3	1	5	11882	2793	2
kA007	9	5	4	7	2	1	4	13157	13	6	5	8	3	2	5	8972	4185	4
kA008	10	5	5	7	2	1	4	14035	15	6	5	9	3	1	5	9512	4523	5
kA009	9	5	4	7	2	1	4	13638	11	6	4	8	3	1	4	10182	3456	2
kA010	10	5	4	7	2	1	4	13993	13	6	4	8	3	2	5	10442	3551	3
<u>kA011</u>	9	6	5	7	2	1	3	15164	15	7	6	9	3	1	6	16784	-1620	6
kA012	9	5	5	7	2	2	3	16972	11	5	5	7	2	2	4	14298	2674	2
kA013	9	5	4	7	2	1	3	22318	12	6	4	8	3	2	5	13583	8735	3
kA014	8	4	3	6	2	1	4	11756	10	5	4	7	2	1	5	10448	1308	2
kA015	10	5	5	7	2	1	4	11349	11	5	5	7	2	2	4	8887	2462	1
kA016	10	6	4	8	2	1	4	15553	13	6	4	9	3	2	6	14667	886	3
kA017	10	6	5	8	2	1	4	16026	13	6	6	8	3	1	5	13274	2752	3
kA018	11	6	4	8	2	1	4	15283	13	6	4	8	3	1	5	10367	4916	2
kA019	10	5	5	7	2	2	4	9955	15	6	5	8	3	1	5	6885	3070	5
kA020	9	5	5	7	2	1	3	14046	13	6	5	8	3	2	5	12745	1301	4
kA021	9	5	4	7	2	1	3	11980	14	6	4	8	3	1	5	9208	2772	5
kA022	8	4	4	6	2	1	3	11434	12	5	4	8	3	1	5	8313	3121	4
kA023	8	5	4	6	2	1	3	12907	11	5	4	7	3	1	5	9659	3248	3
kA024	10	5	4	9	2	1	4	13695	13	5	4	9	2	2	5	11485	2210	3
kA025	11	5	4	7	2	1	4	12885	13	6	5	7	3	2	5	7957	4928	2
kA026	9	5	5	6	2	2	4	12445	13	5	5	7	3	2	6	10496	1949	4
kA027	9	5	4	7	2	1	3	12902	13	6	4	9	3	1	5	10431	2471	4
kA028	10	5	5	8	2	2	4	18345	15	7	5	9	3	2	6	13765	4580	5
kA029	9	5	3	7	2	1	4	10758	12	5	3	8	3	2	5	8671	2087	3
kA030	11	6	5	8	2	1	4	14255	14	6	5	9	3	1	6	10624	3631	3
kA031	10	5	4	7	2	1	3	13114	10	6	4	8	2	1	4	8766	4348	0
kA032	9	5	4	6	2	1	3	10529	12	5	4	7	3	1	5	8865	1664	3
kA033	10	5	4	7	2	1	4	17900	14	5	4	7	3	2	5	8627	9273	4
kA034	9	5	4	6	2	2	3	12454	11	5	5	7	2	2	4	8397	4057	2
kA035	9	5	4	7	2	1	4	12139	13	6	5	9	2	2	4	9593	2546	4
kA036	10	5	4	7	2	1	4	9918	12	5	4	7	3	1	5	8639	1279	2
kA037	8	4	3	6	2	1	3	11871	12	4	3	7	3	2	5	9816	2055	4
kA038	9	5	5	7	2	1	3	16893	14	6	5	8	3	2	5	13872	3021	5
kA039	11	6	5	8	2	1	5	23530	13	6	5	9	3	1	5	19847	3683	2
<u>kA040</u>	10	6	6	8	2	2	4	15102	14	6	6	9	3	2	5	17529	-2427	4
kA041	10	5	4	8	2	2	4	12882	13	6	5	8	3	1	5	11862	1020	3
kA042	10	5	5	7	2	1	4	13142	14	6	5	8	3	2	6	10061	3081	4
kA043	9	5	4	7	2	1	3	11735	11	5	4	7	2	2	4	9412	2323	2
<u>kA044</u>	11	6	5	8	2	1	4	16230	13	6	5	8	3	2	5	18198	-1968	2
kA045	10	6	6	8	2	1	4	18726	14	6	6	9	3	2	5	18137	589	4
kA046	10	5	4	7	2	2	3	13639	12	6	5	8	2	2	5	10171	3468	2
kA047	9	5	4	7	2	1	5	12395	12	5	4	8	3	2	6	9748	2647	3
kA048	9	6	5	8	2	1	3	16269	12	6	5	8	3	2	5	12915	3354	3
kA049	9	5	4	7	2	1	4	12193	11	5	4	7	3	1	5	10684	1509	2

TABLE 5.3 – Comparaison des résultats obtenus avec les deux objectifs



# Réoptimisation du routage et de la planification des personnels

---

## 6.1 Introduction

Dans le problème de routage et de planification des personnels pour l'hospitalisation à domicile, certaines données peuvent évoluer (cf. absence des personnels, modification du nombre de services à visiter).

En effet, durant l'horizon de planification, parmi les personnels, nul n'est à l'abri d'une absence non programmée. Aussi, les patients peuvent durant la période de soins avoir besoin d'augmenter le nombre de visites (en cas d'aggravation de leur état) ou au contraire de diminuer le nombre de visites (en cas d'amélioration).

Ainsi, afin de considérer les différentes modifications, la réoptimisation de la solution courante est nécessaire et celle-ci doit se faire de manière à ne pas bousculer le quotidien des patients ni des personnels. C'est pourquoi dans toute étude de réoptimisation une notion de distance entre deux solutions est définie. Cette dernière sert à quantifier la différence entre la solution initiale et la nouvelle solution obtenue après réoptimisation (absence de personnels, diminution ou augmentation du nombre de services).

Pour la réoptimisation des problèmes NP-difficiles, l'utilisation des heuristiques simples et rapides est le mieux adaptée. En effet, une résolution exacte du problème d'origine avec des données modifiées peut nous donner une solution qui est optimale pour l'état courant mais qui ne garantit pas d'obtenir une bonne solution par rapport à la solution initiale. Ceci veut dire que cette nouvelle solution peut s'éloigner de beaucoup de la solution initiale. Or, lors de la réoptimisation de certains problèmes, il est nécessaire que la nouvelle solution soit le plus proche possible de la solution initiale.

La plupart des études de réoptimisation des problèmes NP-difficiles sont des études d'approximation (voir [Ausiello et al., 2006, Böckenhauer et al., 2007, Escoffier et al., 2009, Shachnai et al., 2012]), tandis que dans notre cas, nous allons résoudre le problème d'un point de vue algorithmique.

## 6.2 Contexte

Nous considérons un planning sur un horizon  $H$ . Pour chaque jour de l'horizon, des tournées sont programmées. Chacune de ces tournées est définie par une séquence de services à effectuer dans l'ordre par un même personnel. Ce planning vérifie différentes conditions d'affectation et de planification. Les conditions d'affectation traduisent le fait que chaque personnel doit effectuer les services pour lesquels il est qualifié tout en respectant les fenêtres de temps. Les conditions de planification sont liées à la gestion des jours de repos ou des jours successifs de travail. Aussi, nous considérons un minimum de personnels qui interviennent chez un même patient tout au long de l'horizon.

Dans le cadre de la réoptimisation, nous considérons que tous les patients sont connus à l'avance. Par ailleurs, les services demandés par les patients peuvent, soit être dupliqués, soit être supprimés. Dans le cas de l'augmentation, chaque demande nécessite une qualification d'un personnel et elle est caractérisée par un jour d'intervention et une fenêtre de temps. Le problème posé ici est de savoir si oui ou non il est possible d'intégrer ces nouvelles demandes dans le planning initial et si oui, de déterminer à quels moments et à qui nous pouvons les affecter.

---

Les données	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Un planning est disponible à l'instant <math>t_{ref}</math> noté <math>plan_{ref}</math></li> <li>– Un ensemble de tournées est disponible à l'instant <math>t_{ref}</math> noté <math>tour_{ref}</math></li> </ul>
Les arrivées	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Arrivée d'un ensemble de demandes à l'instant <math>t \geq t_{ref}</math>, noté <math>demande_t</math></li> <li>2. <math>demande_t</math> contient un ensemble de services pour un ou plusieurs patients de l'HAD noté <math>S^{nouw}</math> et(ou) un ensemble de services à supprimer noté <math>\bar{S}^{nouw}</math></li> </ol>
Questions	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pouvons nous insérer les nouveaux services ?</li> <li>2. Si oui, dans quelles tournées ces services peuvent ils être insérés ? et dans quelles tournées doit on les insérer ?</li> <li>3. En supprimant les services, quelles sont les transformations supplémentaires à propager dans le planning ?</li> </ol>

---

TABLE 6.1 – Récapitulatif

## 6.3 Distance entre deux solutions

Lors de l'insertion ou de la suppression de services, nous sommes amenés à apporter des modifications dans la solution de référence. Afin de bousculer le moins possible le quotidien des patients ainsi que celui des personnels, nous définissons une distance entre la solution de référence et la solution après réoptimisation. Cette dernière devra perturber le moins possible la solution de référence (stabilité). La distance peut comprendre des aspects liés à la qualité de service du point de vue du patient, ou les conditions de travail du point de vue des personnels ou encore les aspects économiques du point de vue de la structure hospitalière.

1. Qualité de service (du point de vue du patient)
  - Modification de l'heure prévue du passage d'un personnel
2. Conditions de travail (du point de vue des personnels)
  - Ouverture ou suppression d'une journée de travail
3. En général
  - Écart en temps de travail, en distance parcourue, en nombre de personnels actifs, en nombre de personnels s'occupant d'un même patient, dans la composition des tournées et dans l'ordre des visites

Dans notre cas, nous avons choisi de considérer comme fonction de distance entre deux solutions, les critères suivants :

- le nombre de personnels actifs,
- la modification de l'heure prévue pour les services,
- le nombre de personnels différents intervenant chez un même patient.

On considère une solution de référence obtenue avec le PLNE défini dans le chapitre 3. Ainsi, les variables du modèle deviennent des données pour le nouveau problème, ces dernières seront indexées d'un "ref" (voir le tableau 6.1)

## 6.4 PLNE & réoptimisation

### 6.4.1 Le nombre de personnels actifs

Soit  $P^{ref}$  l'ensemble de personnels actifs dans la solution de référence. On considère la variable  $\delta$  qui donne la différence entre le nombre de personnels actifs dans la solution de référence et celui de la nouvelle solution,  $\delta$  est défini par :

$$\delta = \sum_{k \in P^{ref}} (1 - y_k) + \sum_{k \in P \setminus P^{ref}} y_k \quad (6.1)$$

Ainsi, en minimisant  $\delta$  dans la fonction objectif, on incite le programme à prendre les mêmes personnels que ceux qui figurent dans la solution de référence et à minimiser également la différence entre le nombre de personnels actifs dans les deux solutions.

### 6.4.2 La modification de l'heure de passage prévue

Rappelons que  $\sum_{k \in P} p_{ki}^{ref}$  donne l'heure de passage prévue pour le service  $i \in S$  dans la solution de référence. Considérons la variable  $\lambda_i$  qui donne la différence entre le temps de passage d'un service  $i$  dans la solution de référence et celui de la nouvelle solution.

$$\lambda_i = \left| \sum_{k \in P} p_{ki}^{ref} - \sum_{k \in P} p_{ki} \right| \quad (6.2)$$

En minimisant cette valeur on fait en sorte que l'heure de passage pour chaque service se rapproche le plus possible de celle trouvée dans la solution de référence.

### 6.4.3 Le nombre de personnels par patient

Soit  $P_i^{ref}$  l'ensemble des personnels qui interviennent au moins une fois chez le patient  $i$  dans la solution de référence. Rappelons que  $z_{ik}$  vaut 1 si le personnel  $k$  intervient au moins une fois chez le patient  $i$ . Considérons la nouvelle variable  $\sigma_i$  qui calcule la différence entre le nombre de personnels différents intervenant chez le patient  $i$  dans la solution de référence et celui de la nouvelle solution.

$$\sigma_i = \sum_{k \in P_i^{ref}} (1 - z_{ik}) + \sum_{k \in P \setminus P_i^{ref}} z_{ik} \quad (6.3)$$

Ainsi, en minimisant la variable  $\sigma_i$  on minimise la différence entre le nombre de personnels différents qui interviennent chez le patient  $i$  dans les deux solutions, et on incite le programme à affecter au patient  $i$  les mêmes personnels que dans la solution de référence.

### 6.4.4 Argumentation

Dans le cas de la suppression de services, le nombre de personnels actifs peut diminuer. Cependant, en minimisant  $\delta$ , le programme est incité à faire travailler les mêmes personnels que dans la solution de référence. Afin d'éviter cette situation, nous minimisons en plus de  $\delta$ , le nombre de personnels actifs.

Par ailleurs, lors de la minimisation de  $\sigma_i$ , on se contraint à faire intervenir les mêmes personnels que dans la solution de référence chez le patient  $i$ . Or, lors de la suppression de services liés au patient  $i$ , il se peut qu'un personnel parmi ceux qui interviennent chez le patient  $i$  dans la solution de référence ne soit plus obligé d'intervenir chez ce dernier dans la nouvelle solution. C'est pourquoi, en plus de minimiser  $\sigma_i$ , on minimise également le nombre de personnels intervenant chez le patient  $i$ .

### 6.4.5 La fonction objectif

La fonction objectif *objectif1* sera définie par :

$$\text{Objectif1} : \min \alpha_1 \left( \sum_{k \in P} y_k + \sum_{i \in id_s} N_i \right) + \alpha_2 \left( \beta_1 \delta + \beta_2 \sum_{i \in S} \lambda_i + \beta_3 \sum_{i \in S} \sigma_i \right)$$

Comme  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ , on remarque que si  $\alpha_2 = 0$ , le PLNE donnera des solutions sans se soucier de la réoptimisation. Tandis que, si  $\alpha_1 = 0$ , le PLNE essaiera de reproduire la solution de référence ou du moins de se rapprocher le plus possible tant que cela reste réalisable. Ainsi, afin de trouver un compromis entre les deux il faut faire varier les poids. Par ailleurs, les quantités  $\delta$ ,  $\sum_{i \in S} \lambda_i$  et  $\sum_{i \in S} \sigma_i$  ne sont pas de même ordre de grandeur, en effet,  $\delta$  et  $\sum_{i \in S} \sigma_i$  représentent des nombres de personnels alors que  $\sum_{i \in S} \lambda_i$  correspond au temps de passage. C'est pourquoi, ces trois quantités sont multipliées par des poids  $\beta_i, i = 1, 2, 3$ ,  $tqbeta_1 + beta_2 + beta_3 = 1$  afin de normaliser ces dernières.

**Remarque 5** Les  $\lambda_i, i \in S$  sont des valeurs absolues, chose qui rend le modèle non linéaire, nous pouvons résoudre ce dernier soit en rendant les  $\lambda_i, i \in S$  linéaires soit en utilisant la programmation linéaire par morceaux.

## 6.5 Matheuristique & réoptimisation

Afin d'adapter notre matheuristique pour le cas de la réoptimisation, nous avons pensé dans un premier temps à introduire la distance calculée ci-dessus dans le modèle défini pour la planification des personnels. En effet, le nombre de personnels actifs ainsi que le nombre de personnels différents par patient sont gérés dans la partie planification. Cependant, l'heure de début des services est défini par le *Prize Collecting* TSPTW, aussi, les tournées sont définies par ce dernier. Or, dans notre cas, nous avons besoin d'introduire lors de la construction des tournées l'heure de début des services dans la solution

de référence. De plus, le lot de tournées obtenu par le PCTSPW, peut être complètement différent de celui trouvé pour construire la solution de référence, les patients peuvent alors ne pas faire partie d'une quelconque tournée liée aux personnels qui les ont servis dans la solution de référence. C'est pourquoi, nous avons jugé que notre matheuristique n'est pas adaptée en l'état au problème introduit par la réoptimisation.

### 6.5.1 Idées d'adaptation de la matheuristique

Pour adapter notre matheuristique pour le cas de la réoptimisation, une modification est nécessaire dans la manière de construire les tournées. En effet, la construction des tournées est précédée par la phase de partage de l'ensemble des services en clusters. Lors de la construction des clusters, les personnels ne sont pas considérés. Or, nous avons besoin d'introduire l'information sur les personnels ayant été affectés aux patients liés aux services afin de regrouper ceux qui partagent le même personnel dans la solution de référence. Ainsi nous maximisons la probabilité d'obtenir des tournées pour les personnels de telle manière que chaque personnel ait les mêmes patients que dans la solution de référence (ou chaque patient ait les mêmes personnels).

#### 6.5.1.1 Réoptimisation du routage

Dans le cas de la réoptimisation, nous allons construire directement les tournées sans passer par la phase de clusterisation. Pour ce faire, on fait appel au PCTSPTW pour chaque personnel, avec l'ensemble de services qu'il pourrait effectuer (même qualification, concordance des fenêtres de temps), en mettant comme pénalité, le nombre de fois que ce personnel a visité le patient dans la solution de référence.

---

#### Algorithme 5 Construction des tournées

---

**Données :**  $t \in H, S_t^l, P_t^l, pn_{ik}, \forall i \in S_t^l, \forall k \in P_t^l$   
**pour tout**  $k \in P_t^l$  **faire**  
    Définir  $\tilde{S}_k$   
    **tantque**  $\tilde{S}_k \neq \emptyset$  **faire**  
        Faire appel au  $PCTSPTW(k, \tilde{S}_k, pn_{ik} (\forall i \in \tilde{S}_k))$   
        On obtient une tournée qui comporte les services  $\tilde{S}_k^*$   
         $\tilde{S}_k = \tilde{S}_k \setminus \tilde{S}_k^*$   
    **fin tantque**  
**fin pour**  
On obtient un lot de tournées noté  $R_t$

---

L'algorithme 5 résume la nouvelle méthode pour construire les tournées. Rappelons que  $S_t^l$  et  $P_t^l$  sont respectivement l'ensemble des services à effectuer le jour  $t$  et l'ensemble des personnels disponibles le jour  $t$ , les services et personnels de ces deux ensembles ont la qualification  $l$ . On note par  $pn_{ik}$  la pénalité à payer dans le *PCTSPTW* dans le cas où le service  $i$  n'est pas pris dans la tournée du personnel  $k$ . Cette pénalité représente le nombre de fois que le personnel  $k$  a visité le patient lié au service  $i$  dans la solution de référence. Aussi,  $\tilde{S}_k$  représente l'ensemble des services que le personnel  $k$  peut effectuer (compatibilité de leur fenêtre de temps).

Grâce à cette nouvelle façon de construire les tournées, les patients ont de fortes chances de se retrouver dans les tournées des mêmes personnels que dans la solution de référence. Par ailleurs, cette méthode ne garantit pas la même heure de passage prévue pour les services que dans la solution de référence. Cependant, les services peuvent éventuellement faire partie de plusieurs tournées parmi celles définies par l'algorithme 5. Ainsi, dans le problème de planification, nous pouvons introduire le critère de distance sur l'heure de passage des services et choisir les tournées qui modifient le moins possible les heures de passage prévues.

### 6.5.1.2 Réoptimisation de la planification

Lors de la planification des personnels, on considère le lot de tournées  $R$  qui comporte toutes les tournées définies par l'algorithme 5, et ceci pour chaque jour de l'horizon  $t \in H$  et pour chaque qualification  $l \in Q$ . Chaque personnel est affecté à une tournée au maximum dans une même journée, tout en respectant les contraintes liées à la succession des jours de travail et de repos. Chaque service doit être effectué par une et une seule tournée. Par ailleurs, dans la fonction objectif, on minimise le nombre de tournées prises dans la solution, ainsi nous minimisons le nombre de personnels actifs par jour. Aussi, on minimise le nombre de personnels intervenant chez un même patient.

Dans la réoptimisation nous allons considérer d'autres termes dans la fonction objectif. En effet, afin de se rapprocher de la solution de référence, nous introduisons les distances suivantes dans la fonction objectif qui est à minimiser.

**Le nombre de personnels actifs :** Soit  $P^{ref} \in P$  les personnels actifs sur tout l'horizon  $H$  dans la solution de référence.  $\tilde{P}_t^{ref} \in P^{ref}$  est l'ensemble des personnels actifs le jour  $t$ . Rappelons que  $\sum_{l \in R_t^k} y_l$  vaut 1 si le personnel  $k$  est actif le jour  $t$ , ainsi en minimisant  $\sum_{t \in H} \delta_t$ , on incite le programme à ne pas

modifier les jours de travail affectés au personnels dans la solution de référence. Aussi, on minimise la différence du nombre de personnels actifs entre les deux solutions.

$$\delta_t = \sum_{k \in \tilde{P}_t^{ref}} (1 - \sum_{l \in R_t^k} y_l) + \sum_{k \in P \setminus \tilde{P}_t^{ref}} \sum_{l \in R_t^k} y_l \quad (6.4)$$

**La modification de l'heure de passage prévue** Soit  $h_i^{ref}$  l'heure de passage prévue pour le service  $i$  dans la solution de référence et  $h_{il}$  est l'heure de passage du service  $i$  dans la tournée  $l$ . Rappelons que  $R$  est l'ensemble des tournées définies par l'algorithme 5.

$$\lambda_i = \left| \sum_{l \in R} h_{il} \times y_l - h_i^{ref} \right| \quad (6.5)$$

En comparant la contrainte 6.5 avec la contrainte 6.2 définie pour le PLNE, on remarque que dans la première on somme sur les tournées tandis que dans la deuxième on somme sur les personnels. En effet, chaque service  $i$  ne doit appartenir qu'à une et une seule tournée, de la même manière il doit être affecté à un et un seul personnel, toutefois les deux quantités sont égales ( $\sum_{l \in R} h_{il} \times y_l = \sum_{k \in P} p_{ki}$ ).

Ainsi, en minimisant  $\lambda_i$  dans la fonction objectif, on minimise la différence entre l'heure de passage prévue dans la solution de référence et celle de la nouvelle solution.

**Le nombre de personnels par patient** Rappelons que  $P_i^{ref}$  est l'ensemble des personnels qui interviennent au moins une fois chez le patient  $i$  dans la solution de référence. Considérons la nouvelle variable  $\sigma_i$  qui calcule la différence entre le nombre de personnels différents intervenant chez le patient  $i$  dans la solution de référence et celui de la nouvelle solution.

$$\sigma_i = \sum_{k \in P_i^{ref}} (1 - z_{ik}) + \sum_{k \in P \setminus P_i^{ref}} z_{ik} \quad (6.6)$$

Ainsi, le problème de planification réoptimisé peut être formulé comme



suit :

$$\begin{aligned}
& \min \alpha \left( \sum_{l \in R} y_l + \sum_{i \in id_s} N_i \right) + (1 - \alpha) \left( \beta_1 \sum_{t \in H} \delta_t + \beta_2 \sum_{i \in id_s} (\lambda_i) + \beta_3 \sum_{i \in id_s} (\sigma_i) \right) \\
& \sum_{l \in R_t^i} y_l = 1 \quad \forall i \in S_t, \forall t \in H \\
& \sum_{l \in R_t^k} y_l \leq 1 \quad \forall k \in P_t, \forall t \in H \\
& |Sid_s^i| z_{ik} \geq \sum_{l \in Rid_s^i \cap Rid_p^k} y_l \quad \forall i \in id_s^i, \forall k \in ID_i \\
& N_i \geq \sum_{k \in ID_i} z_{ik} \quad \forall i \in id_s^i \\
& \sum_{t=t'}^{t'+c+1} \sum_{k' \in I_k} \sum_{l \in R_t^{k'}} y_l \leq c \quad \forall k \in id_p, \forall t' \in \{1, 2, \dots, |H| - c\} \\
& 1 - \sum_{k' \in I_k} \sum_{l \in R_t^{k'}} y_l \leq - \sum_{k' \in I_k} \left( \sum_{l \in R_{t-1}^{k'}} y_l + \sum_{l \in R_{t+1}^{k'}} y_l \right) + 2 \quad \forall k \in id_p, \forall t \in H \\
& \sum_{k' \in I_k} \sum_{l \in R_t^{k'}} y_l \leq \sum_{k' \in I_k} \left( \sum_{l \in R_{t-1}^{k'}} y_l + \sum_{l \in R_{t+1}^{k'}} y_l \right) \quad \forall k \in id_p, \forall t \in H \\
& \delta_t = \sum_{k \in \bar{P}_t^{ref}} (1 - \sum_{l \in R_t^k} y_l) + \sum_{k \in P \setminus \bar{P}_t^{ref}} \sum_{l \in R_t^k} y_l \quad \forall t \in H \quad (6.7) \\
& \lambda_i = \left| \sum_{l \in R} h_{il} \times y_l - h_i^{ref} \right| \quad \forall i \in id_s \quad (6.8) \\
& \sigma_i = \sum_{k \in P_i^{ref}} (1 - z_{ik}) + \sum_{k \in P \setminus P_i^{ref}} z_{ik} \quad \forall i \in id_s \quad (6.9) \\
& y_l \in \{0, 1\} \quad \forall l \in R \\
& N_i, \lambda_i, \sigma_i \in \mathbb{N} \quad \forall i \in id_s \\
& \delta_t \in \mathbb{N} \quad \forall t \in H \\
& z_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in id_s, \forall k \in id_p
\end{aligned}$$

La fonction objectif considérée est une somme pondérée de deux termes ; le premier minimise à la fois le nombre de personnels actifs et le nombre de personnels différents intervenant chez un même patient ; tandis que le deuxième terme minimise la distance entre la solution de référence et la nouvelle solution. Par ailleurs, la quantité  $\lambda_i, i \in S$  correspond à une valeur absolue, ce qui signifie qu'elle n'est pas linéaire. Par conséquent, pour résoudre ce problème soit on passe par la linéarisation des  $\lambda_i, i \in S$ , soit on résout avec la programmation linéaire par morceaux.

Cependant, dans le cas où les modifications dans les données ne sont pas importantes, nous n'obtiendrons a priori pas (ou avec une très faible probabilité) la solution de référence, ou une solution très proche de la solution de référence, avec cette méthode. C'est pourquoi, nous avons pensé à une mé-

thode qui part de la solution de référence et la modifie a minima pour obtenir une solution réalisable.

## 6.6 Recherche locale

Le problème de réoptimisation est considéré dès lors qu'une modification dans les données se présente. Ces modifications peuvent être des suppressions de services ou de nouvelles demandes de services. L'objectif principal d'une étude de réoptimisation est de définir une solution réalisable pour les nouvelles données et celle-ci doit être également le plus proche possible de la solution de référence tout en minimisant le nombre de personnels actifs et le nombre de personnels par patient. Afin de répondre au mieux à cela, on définit une méthode qui à partir de la solution de référence trouve une solution qui à la fois améliore la solution de référence et reste voisine de celle-ci. Donc l'une des étapes de cette méthode est de définir un voisinage dans lequel on peut trouver cette nouvelle solution. Pour cela, deux voisinages sont à définir. En effet, un voisinage défini lors d'une suppression de services est différent de celui défini pour le cas de nouvelles demandes.

Lors d'une demande de suppression d'un ou de plusieurs services, la solution de référence reste réalisable après la suppression. Mais, elle peut ne pas être considérée comme une bonne solution. En effet, une bonne solution après réoptimisation, doit minimiser la distance entre elle et la solution de référence mais aussi optimiser le nombre de personnels actifs et le nombre de personnels par patients. Or, quand on est amené à supprimer des services dans les tournées, ces dernières deviennent moins chargées voir vides, dans ce cas il est nécessaire de déplacer les services qui apparaissent dans les tournées vidées après la suppression dans d'autres tournées. Ceci va permettre d'économiser sur le nombre de personnels actifs. D'où l'idée de définir un voisinage qui inter-change les services entre les différentes tournées, ce dernier est défini dans la section 6.6.3.

Si une augmentation du nombre de services est demandée, la solution de référence ne peut plus être réalisable. En effet, cette dernière ne couvre pas les nouvelles demandes, ceci signifie qu'il nous faut définir un nouveau voisinage qui contiendra des solutions réalisables et voisines de la solution de référence. Pour que ces solutions soient réalisables, une étude d'insertion des nouvelles demandes est nécessaire, cette dernière est définie dans la partie 6.6.1 et qui est suivi d'une méthode qui construit ces nouvelles solutions voisines à la solution de référence (voir la partie 6.6.2).

Notre objectif devient donc d'améliorer la solution de référence en cas de suppression ou de la rendre réalisable en cas d'augmentation et ceci en la

modifiant le moins possible. Autrement dit, la construction de la nouvelle solution doit être voisine de la solution de référence. C'est pourquoi nous avons défini ci-dessous une méthode basée sur une recherche locale autour de la solution de référence.

### 6.6.1 Insertion des services

Nous considérons  $S^{nouw}$  un ensemble de nouveaux services à insérer dans la solution de référence pour obtenir une solution réalisable. L'insertion se fait de manière à garder les mêmes intervenants chez les patients et de manière à changer le moins possible l'heure de passage prévue chez les patients. Ainsi, à chaque insertion, une solution voisine de la solution de référence est définie.

Pour chaque service  $i \in S^{nouw}$ , on détermine parmi les tournées planifiées dans la solution de référence, celles où l'on peut insérer le service  $i$ . Pour ce faire, on fait appel à la méthode définie dans la section 4.6.

---

**Algorithme 6** Identification des tournées dans lesquelles l'insertion de  $i$  est possible

---

**Données :**  $tour_{ref}, i \in S^{nouw}$

**pour tout**  $l \in tour_{ref}$  **faire**

**si** le service  $i$  a la même qualification que la tournée  $l$  **alors**

vérifier avec la méthode **post-optimisation** si  $i$  peut être inséré dans  $l$

**si oui alors**

mettre dans  $tour_i$  la tournée  $l$

stocker dans  $position_l^i$  les positions de  $l$  dans lesquelles  $i$  peut être inséré

**pour tout**  $b \in position_l^i$  **faire**

donner le changement d'heure de passage maximal  $change_l^b$  des services de la tournée  $l$

**fin pour**

**fin si**

**fin si**

**fin pour**

---

L'algorithme 6 nous fournit, pour chaque service  $i$  dans  $S^{nouw}$ , l'ensemble des tournées dans lesquelles  $i$  peut être inséré, noté  $tour_i$ . Aussi, il nous fournit pour chaque tournée  $l$  appartenant à  $tour_i$ , l'ensemble des positions ainsi que le changement d'heures de passage maximal lié à chaque position d'insertion dans la tournée  $l$ , ces derniers sont notés par  $position_l^i$  et  $change_l^b, \forall b \in position_l^i$ .

Le problème posé maintenant est de savoir pour chaque service  $i$  quelle est la tournée  $l$  parmi les tournées de  $tour_i$  où l'on doit l'insérer. À quelle position de  $b \in position_i^i$  on doit l'insérer pour répondre au mieux à l'objectif fixé qui est de minimiser la distance entre la solution de référence et la nouvelle solution obtenue après insertion. Pour cela, nous allons définir les problèmes d'affectation suivant, pour chaque service  $i$ .

Soit la variable  $y_l$  qui vaut 1 si la tournée  $l, \forall l \in tour_i$  est prise dans la solution et vaut 0 sinon.  $Pos_l^{ib}$  vaut 1 si la position  $b \in position_i^i$  de la tournée  $l$  est choisie pour y insérer le service  $i$  et vaut 0 sinon.  $nb_l^i$  est le nombre de fois que le personnel affecté à la tournée  $l$  est intervenu chez le patient lié au service  $i$  dans la solution de référence. Considérons le modèle suivant :

$$P(i) \min \alpha \left( \sum_{l \in tour_i} \sum_{b \in position_i^i} change_l^b \times Pos_l^{ib} \right) + (1 - \alpha) \left( \sum_{l \in tour_i} nb_l^i y_l \right)$$

$$\sum_{l \in tour_i} y_l = 1 \quad (6.10)$$

$$\sum_{b \in position_i^i} Pos_l^{ib} \leq y_l \quad \forall l \in tour_i \quad (6.11)$$

$$y_l \in \{0, 1\} \quad \forall l \in tour_i \quad (6.12)$$

$$Pos_l^{ib} \in \{0, 1\} \quad \forall l \in tour_i, \forall b \in position_i^i \quad (6.13)$$

Le modèle  $P(i)$  nous donne la tournée ainsi que la position dans laquelle il faut insérer le service  $i$  afin de minimiser la différence entre le nombre de personnels différents intervenant chez le patient lié au service  $i$  ainsi que la différence entre les heures de passage prévues des solutions de référence et la nouvelle solution après insertion.

### 6.6.2 Premier niveau d'exploration du voisinage

Étant donné que l'un de nos objectifs de départ est de minimiser le nombre d'intervenants chez un même patient, dans notre politique d'insertion des services, nous commençons par les services qui ont un plus grand nombre de personnels différents qui interviennent chez le patient pour lequel ils sont affiliés. Ceci maximise la probabilité d'insérer ces services dans des tournées liées à ces mêmes intervenants, ce qui revient à minimiser en moyenne le nombre de personnels intervenants chez un même patient.

Ainsi, on considère que les services de  $S^{mouv}$  sont ordonnés selon leur priorité. L'algorithme 7 défini ci-dessous, donne une manière d'insérer les services dans la solution de référence.

**Algorithme 7** Insertion des services

---

**Donnée :**  $S^{now}$ ,  $tour_{ref}$

**pour tout**  $i \in S^{now}$  **faire**

Faire appel à l'algorithme 6 avec les données suivantes :  $(i, tour_{ref})$

Résoudre  $P(i)$

**si**  $tour_i \neq \emptyset$  **alors**

Insérer  $i$  à la position  $b$  de la tournée  $l$  trouvée par  $P(i)$

Remplacer dans  $tour_{ref}$  la tournée  $l$  par la nouvelle tournée obtenue après insertion

**sinon**

Faire intervenir un nouveau personnel et créer une nouvelle tournée  $l'$  contenant le service  $i$

Rajouter dans  $tour_{ref}$  la tournée  $l'$

**fin si**

$S^{now} = S^{now} \setminus \{i\}$

**fin pour**

---

À la fin de l'algorithme 7 nous obtenons une solution qui couvre tous les services. Par ailleurs, cette solution peut ne pas être réalisable, en effet, dans le cas où l'algorithme 6 ne trouve pas de tournée dans laquelle le service  $i$  considéré peut être inséré, on fait intervenir un nouveau personnel, pour que la solution soit réalisable, ce personnel doit vérifier les conditions sur le nombre de jours de travail et de repos successifs.

### 6.6.3 Deuxième niveau d'exploration du voisinage

Lors de la construction de la nouvelle solution, nous n'avons considéré que deux distances parmi les trois définies auparavant. En effet, nous insérons tout en minimisant la somme suivante pour chaque service  $\alpha\lambda_i + (1 - \alpha)\sigma_i$ . C'est pourquoi, afin d'améliorer cette solution et de considérer la troisième distance qui concerne le nombre de personnels actifs, une recherche locale autour de cette nouvelle solution est nécessaire.

La recherche locale est basée sur la construction d'un voisinage autour de cette nouvelle solution, ce dernier est de deux types : un voisinage modifiant l'ordre des nœuds dans une même solution (k-opt [Lin and Kernighan, 1973] Or-opt [Or, 1976], GENIUS [Gendreau et al., 1992]) ou un voisinage défini en déplaçant des nœuds entre des tournées différentes (String-exchange [Fahrion and Wrede, 1990], string-cross [Savelsbergh, 1988]) (pour une étude comparative de ces différentes méthodes voir [Breedam, 2001]). Ainsi, le premier type de voisinage sert à réordonner les tournées après insertion des nou-

veaux services ce qui va permettre de libérer de la place dans la tournée considérée. Le deuxième voisinage va quant à lui permettre de déplacer les services qui appartiennent à des tournées vidées après la suppression des services ce qui va permettre d'économiser en nombre de personnels actifs.

Dans le cas où les modifications des données concernent uniquement des suppressions de services, alors l'étape d'insertion n'est pas considérée. Seule la recherche locale est nécessaire pour améliorer la solution (suppression de tournées ce qui implique une économie sur le nombre de personnels actifs).

## **6.7 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons introduit le problème de réoptimisation du routage et de la planification des personnels pour l'hospitalisation à domicile. Puis, pour résoudre ce dernier, nous avons adapté le PLNE défini dans le chapitre 3 de manière à ce que la distance entre les deux solutions avant et après la réoptimisation soit la plus petite possible. Enfin, de la même manière que pour le PLNE, nous avons adapté notre matheuristique pour le cas de la réoptimisation.

Par ailleurs, comme nous considérons de légères modifications dans les données, nous avons pensé qu'une méthode qui part de la solution de référence pour trouver une nouvelle solution pourrait être mieux adaptée. C'est pourquoi dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons donné une méthode qui part de la solution de référence, puis insère les nouvelles demandes une par une et finit par une recherche locale pour améliorer la solution et pour considérer les suppressions de services.

# Conclusion générale

---

## Bilan

Dans cette thèse nous avons développé un travail de recherche qui porte sur une problématique combinant un problème de tournées de véhicules et un problème de planification des personnels dans le domaine de la santé, plus précisément, dans celui de l'hospitalisation à domicile. La raison principale pour laquelle nous nous sommes intéressés à l'hospitalisation à domicile est l'augmentation de cette pratique durant ces dernières années. En effet, la crise économique et le manque de lits dans les hôpitaux ont poussé à la création de nombreuses structures d'hospitalisation à domicile dans beaucoup de pays.

Nos contributions scientifiques ont été d'élaborer pour cette problématique, des méthodes de résolution issues de la Recherche Opérationnelle afin de déterminer des tournées des personnels pour effectuer les visites aux domiciles des patients, et de planifier des personnels sur un horizon de temps donné.

Le problème de routage et de planification des personnels dans l'hospitalisation à domicile a été abordé par plusieurs chercheurs de manières différentes. Les différences principales sont liées aux nombreuses contraintes considérées dans chacune de ces études ; la prise en compte des synchronisations ou des précédences, la considération ou non des qualifications des personnels, ou encore des préférences exprimées soit par les personnels ou par les patients.

Dans la plupart des articles qui considèrent la notion de préférence, celle-ci se présente sous forme de listes de personnels, exprimées par chaque patient. Les personnels listés par les patients correspondent à ceux qu'ils veulent avoir pour les différents soins demandés. Ceci est une manière de considérer la régularité des personnels chez les patients. Dans notre problématique, on retrouve la notion de régularité induite par le fait que l'on s'intéresse aux soins continus sur un horizon de planification de plus d'une journée. Or, dans notre cas, ce ne sont pas des préférences qui sont exprimées mais nous minimisons le nombre de personnels différents intervenant chez un même patient.

D'après notre analyse de la littérature, la plupart des études sont consacrées à la planification quotidienne des personnels, peu de travaux traitent le problème sur un horizon plus étendu, l'horizon considéré ne dépassant généralement pas une semaine. C'est pourquoi, les contraintes spécifiques à la

planification sur un horizon étendu n'ont pas été considérées, ces dernières correspondent par exemple à la gestion des jours de repos des personnels ou les journées successives de travail. Ceci nous a motivé à aller dans ce sens et à considérer en plus les contraintes induites par la planification, telle que la gestion des jours de repos ou des journées successives de travail ou encore l'introduction des tranches horaires de travail auxquelles les personnels doivent être affectés.

Dans notre analyse nous avons classifié les différents travaux par rapport aux différentes problématiques étudiées.

Comme première approche au problème, nous avons développé un modèle de programmation linéaire en nombre entiers (PLNE) qui a permis de formuler clairement les contraintes du problème. Cependant, les tests effectués sur ce PLNE ont montré qu'il arrive à résoudre des instances de petite taille et ne peut pas résoudre des instances réelles (sur un horizon de 14 jours), ceci est dû à la complexité importante du problème. Deux autres méthodes ont alors été proposées : une méthode définie pour une journée de planification et une variante de cette méthode développée pour résoudre le problème sur un horizon de 14 jours (voir [Allaoua et al., 2012]).

Notre première méthode est une matheuristique, qui induit trois phases de traitement : affectation horaire, construction des tournées et enfin détermination du planning. Cette méthode s'appuie sur des modèles mathématiques qui nous permettent de nous rapprocher un peu plus de la solution optimale. En effet, lors de la construction des tournées, nous commençons par calculer des bornes inférieures au problème et ceci en utilisant le problème de bin-packing et le problème du voyageur de commerce et dépôts multiples avec fenêtres de temps. Par la suite, des tournées sont construites via le *Prize Collecting Travelling Salesman Problem with Time Windows : PCTSPTW*. Enfin, le problème de planification est un programme mathématique que l'on résout de manière exacte (voir [Allaoua et al., 2013b, Allaoua et al., 2013a]).

La variante de notre matheuristique sur un horizon de 14 jours prend en considération plusieurs contraintes en plus de celles considérées pour la planification sur une journée. Ces contraintes sont rajoutées dans la partie planification, ce qui complique encore plus le problème de planification. En plus de considérer les journées successives de travail et de repos, nous avons également pris en compte la fidélité des personnels chez les patients (voir [Allaoua et al., 2014]).

Nous avons testé la première méthode avec les mêmes instances avec lesquelles le PLNE est testé, et ceci en considérant deux objectifs séparément : la minimisation du nombre de personnels actifs, puis la minimisation de la distance totale parcourue par les personnels. D'après les résultats expérimentaux, la matheuristique fonctionne bien et ces solutions se rapprochent de beaucoup



---

de celles du PLNE dans le cas de la minimisation du nombre de personnels actifs. Par ailleurs, lors de la minimisation des distances parcourues, la matheuristique est moins performante que le *PLNE*. En effet, le gap entre les distances trouvées par les deux méthodes est très important et ceci est dû à la structure de la matheuristique qui est basée sur les bornes inférieures liées au nombre de personnels actifs et non pas aux distances.

Aussi, la méthode définie sur 14 jours est testée sur des instances à 50 patients ayant chacun en moyenne 7 à 8 services étalés sur les 14 jours. Ces instances sont testées avec les deux objectifs séparément. Dans un premier temps, nous avons minimisé le nombre de personnels actifs. Les résultats obtenus sont satisfaisants, en effet, sur 14 à 16 personnels, au maximum 11 sont actifs, et nous avons en moyenne deux intervenants chez un même patient. Concernant les jours de travail, en moyenne les personnels travaillent 6 à 7 jours sur les 14. Puis, Nous avons également testé la méthode en minimisant la distance parcourue, en analysant les résultats obtenus et en les comparant avec ceux obtenus avec le premier objectif, nous constatons que la matheuristique utilise plus de personnels et le nombre d'intervenants chez un même patient est plus grand. Pour ce qui est des distances parcourues, la différence est tout de même conséquente.

On conclut que cette méthode est prometteuse pour le cas où l'on minimise le nombre de personnels actifs. Par contre elle est moins adaptée à la minimisation des distances.

## Perspectives

Comme perspectives à ces travaux de recherche, dans un premier temps, nous citons celles qui vont servir à améliorer les méthodes que nous avons développées pour résoudre le RP-HAD. Puis, nous parlerons des perspectives relatives à l'étude d'autres variantes du problème.

Comme nous l'avons soulevé dans le bilan ci-dessus, dans la méthode définie sur un horizon de 14 jours, le problème de planification n'est pas résolu à l'optimum, un temps limite est imposé au solveur afin d'obtenir une solution dans des temps acceptables. Une manière de remédier à cela est de déterminer des coupes au problème de planification, ceci va permettre d'accélérer la résolution du problème de planification et d'aboutir peut être à de meilleures solutions.

Un autre moyen d'accélérer le temps de calcul, est de faire de la génération de colonnes, en effet, notre méthode est facilement adaptable pour faire de la génération de colonnes. Il suffit dans un premier temps de considérer un sous ensemble de tournées réalisables dans le problème de planification, puis d'en

rajouter au fur et à mesure pour améliorer la solution courante, jusqu'à ce que l'amélioration ne soit plus possible.

Par ailleurs, nous remarquons que les deux méthodes ne sont pas très performantes quand il s'agit de la minimisation de la distance parcourue. En effet, lors de la détermination des clusters de services, nous nous basons sur des bornes inférieures liées au nombre de personnels et non pas à la distance. Un moyen pour mieux adapter cette méthode pour le cas de la minimisation des distances est de trouver un autre moyen de calculer des bornes inférieures par rapport à la distance parcourue.

Lors de la mise en pratique d'une solution, les utilisateurs s'intéressent davantage aux solutions pouvant être approchées mais dites robustes plutôt qu'à la recherche d'une solution optimale, qui parfois met beaucoup de temps à être obtenue et qui serait moins robuste. En effet, une solution optimale est généralement très sensible aux variations et perturbations du système étudié. Parfois une solution optimale peut se transformer en une pire solution quand le système est soumis à des perturbations. Dans cette perspective, nous pensons qu'il serait intéressant de mesurer la robustesse de notre méthode en cas de changement au niveau des services ou des personnels (augmentation ou diminution des services, absence d'un ou de plusieurs personnels).

Parmi les variantes du problème, nous nous attardons sur le problème dynamique pour lequel les patients ne sont pas tous connus à l'avance, des arrivées des patients sont considérées tout au long de l'horizon de planification. Ce problème a été étudié par [Bennett and Erera, 2011] qui s'est restreint à l'étude du planning périodique d'un seul personnel. Or, dans notre cas l'idée est d'étudier le problème dans sa globalité et de supposer que l'ensemble des patients n'est pas connu à l'avance.

Une autre perspective qui nous intéresse beaucoup est d'étudier la réoptimisation du routage et de la planification des personnels. Dans le *Chapitre 6* de ce document, nous avons introduit ce problème et donné quelques idées d'adaptation de notre méthode pour le cas de la réoptimisation. Nous avons également introduit une nouvelle méthode basée sur de la recherche locale, celle-ci n'étant pas encore testée sur des instances, mais s'avère prometteuse.

## Tableaux de résultats

## PLNE sous les instances à 30 services

TABLE A.1: Résultats des instances à 30 services pour le PLNE

Ins	id <sub>p</sub>	objectif 1					objectif 2				
		PL	#id <sub>p</sub>	dist	taille	temps	PL	#id <sub>p</sub>	dist	taille	temps
kA000	7	3	5	1108	6	104	188	6	571	5	65
kA001	7	3	6	988	5	106	284	6	736	5	68
kA002	8	3	6	1466	5	101	478	8	1188	3	65
kA003	7	3	6	1456	5	101	447	7	1039	4	65
kA004	6	3	5	1099	6	103	257	5	693	6	67
kA005	7	3	6	1203	5	102	294	6	808	5	67
kA006	9	3	6	1844	5	102	468	9	1202	3	64
kA007	7	3	7	1795	4	103	485	7	1039	4	66
kA008	8	3	7	1569	4	104	376	8	1088	3	65
kA009	7	3	5	1130	6	100	370	7	820	4	66
kA010	7	3	7	1767	4	118	234	7	1003	4	76
kA012	7	3	5	999	6	103	148	6	593	5	66
kA013	8	3	6	1506	5	102	364	6	909	5	66
kA014	6	3	6	1137	5	104	500	6	777	5	66
kA015	7	3	6	1272	5	103	303	7	675	4	65
kA016	7	3	6	1511	5	102	373	7	1093	4	66
kA017	8	3	7	1617	4	102	444	8	1202	3	66
kA018	9	3	7	1710	4	106	321	8	1032	3	68
kA019	8	3	6	1525	5	103	276	6	786	5	65
kA020	7	3	6	1405	5	102	374	7	1128	4	66
kA021	6	3	5	1116	6	104	154	6	656	5	66
kA022	8	3	6	1658	5	103	434	8	1046	3	64
kA023	7	3	5	1270	6	102	500	6	940	5	71
kA024	7	3	6	1205	5	103	406	7	898	4	66
kA025	7	3	6	1701	5	101	334	7	1053	4	65
kA026	7	3	6	1398	5	103	269	7	703	4	64
kA027	8	3	6	1470	5	101	460	7	1033	4	66
kA028	8	3	6	1458	5	102	451	8	960	3	65
kA029	7	3	6	1409	5	101	311	7	726	4	64
kA030	8	3	6	1770	5	102	544	8	1170	3	68
kA031	7	3	6	1403	5	102	287	7	745	4	66
kA032	8	3	5	858	6	103	182	7	680	4	67
kA033	8	3	5	1203	6	101	319	7	887	4	67
kA034	8	3	5	1129	6	105	278	6	633	5	67
kA035	7	3	5	1107	6	102	266	6	777	5	66
kA036	8	3	5	1491	6	106	324	7	1039	4	65
kA037	8	3	5	1503	6	101	297	8	874	3	66
kA038	8	3	5	1057	6	117	274	6	717	5	107
kA039	9	3	7	1459	4	104	282	8	950	3	68
kA040	7	3	5	1248	6	103	316	5	944	6	65
kA041	8	3	6	1346	5	113	462	8	1092	3	71
kA042	8	3	6	1804	5	103	367	7	1169	4	73
kA043	8	3	5	1332	6	103	286	7	893	4	67
kA044	8	3	6	1351	5	102	562	6	1064	5	64

Ins	id <sub>p</sub>	objectif 1					objectif 2				
		PL	#id <sub>p</sub>	dist	taille	temps	PL	#id <sub>p</sub>	dist	taille	temps
kA045	7	3	5	1018	6	101	334	6	696	5	65
kA046	7	3	6	1418	5	102	527	6	852	5	66
kA048	7	3	6	1409	5	102	409	7	1034	4	67
kA049	8	3	6	1496	5	101	315	8	914	3	65
kA050	8	3	6	1751	5	101	560	7	1323	4	68
kA051	7	3	6	1040	5	101	360	6	886	5	65
kA052	8	3	7	1640	4	105	319	7	1076	4	68
kA053	7	3	6	1071	5	102	302	7	755	4	67
kA054	7	3	6	1288	5	104	348	6	853	5	66
kA055	7	3	6	1122	5	103	280	6	860	5	67
kA056	8	3	5	1493	6	104	610	6	1173	5	67
kA057	8	3	6	1465	5	102	408	7	1092	4	71
kA058	9	3	6	1512	5	101	517	8	1069	3	67
kA059	7	3	6	1080	5	104	232	7	644	4	66
kA060	8	3	7	1679	4	104	583	8	1130	3	69
kA061	7	3	5	1258	6	103	306	6	808	5	66
kA062	8	3	6	1583	5	101	256	7	968	4	64
kA063	6	3	4	992	7	101	258	6	652	5	65
kA064	7	3	6	1184	5	103	348	6	795	5	66
kA065	7	3	6	1350	5	101	396	6	1063	5	67
kA066	8	3	6	1792	5	102	150	8	1099	3	68
kA067	8	3	7	1576	4	103	242	8	872	3	64
kA068	8	3	6	1486	5	103	290	6	907	5	67
kA069	8	3	6	1317	5	102	286	6	761	5	66
kA070	8	3	7	1396	4	113	254	8	789	3	69
kA071	7	3	6	1399	5	107	404	6	902	5	65
kA072	7	3	6	1352	5	102	318	6	881	5	73
kA073	8	3	7	1722	4	105	156	7	1105	4	68
kA074	7	3	6	1409	5	102	218	6	859	5	66
kA075	8	3	6	1588	5	102	242	7	921	4	65
kA076	7	3	7	1963	4	103	358	7	1131	4	66
kA077	8	3	7	1445	4	103	517	8	1233	3	67
kA078	9	3	7	1901	4	107	504	8	1067	3	65
kA079	8	3	5	1162	6	102	262	7	767	4	67
kA080	7	3	7	1402	4	103	456	7	841	4	65
kA081	8	3	5	1477	6	103	300	6	1026	5	67
kA082	7	3	5	1272	6	102	394	6	876	5	66
kA083	7	3	6	1573	5	103	406	7	1098	4	66
kA084	8	3	5	1279	6	101	358	8	942	3	71
kA085	7	3	6	1327	5	102	325	7	1049	4	66
kA086	8	3	7	1730	4	104	479	8	1081	3	64
kA087	7	3	6	1514	5	101	188	7	855	4	65
kA088	8	3	6	1454	5	102	416	8	985	3	65
kA089	7	3	6	1558	5	101	421	7	828	4	64
kA090	7	3	6	1413	5	101	454	7	956	4	64
kA091	8	3	5	1219	6	103	168	8	764	3	69
kA092	6	3	6	1022	5	103	178	6	602	5	65
kA093	8	3	6	1615	5	102	582	7	1103	4	67
kA094	7	3	5	1366	6	101	346	6	1034	5	67
kA095	8	3	6	1775	5	103	468	8	1049	3	65
kA096	8	3	6	1375	5	102	254	8	898	3	68
kA097	8	3	5	1209	6	106	393	8	896	3	68
kA098	9	3	5	1430	6	103	316	8	834	3	64
kA099	6	3	5	839	6	100	195	6	544	5	65
kA100	7	3	6	1479	5	103	444	6	993	5	65
kA101	8	3	5	1349	6	104	333	7	915	4	69
kA102	7	3	5	1110	6	104	230	7	659	4	66
kA103	9	3	7	2065	4	101	460	7	1461	4	66
kA104	8	3	6	1408	5	101	385	7	994	4	67
kA105	7	3	7	1686	4	100	415	7	1072	4	66

Ins	id <sub>p</sub>	objectif 1					objectif 2				
		PL	#id <sub>p</sub>	dist	taille	temps	PL	#id <sub>p</sub>	dist	taille	temps
kA106	9	3	6	1083	5	147	264	8	743	3	73
kA107	8	3	6	1497	5	102	458	7	1127	4	66
kA108	7	3	4	1125	7	101	306	7	810	4	67
kA109	7	3	5	1204	6	101	271	7	739	4	69
kA110	7	3	6	1512	5	101	326	6	951	5	66
kA111	8	3	6	1546	5	101	316	8	1157	3	65
kA112	7	3	5	1210	6	102	280	6	802	5	67
kA113	7	3	6	1405	5	101	356	6	851	5	64
kA115	8	3	5	1156	6	101	312	6	841	5	69
kA116	8	3	6	1262	5	102	324	6	776	5	65
kA117	8	3	6	1589	5	102	426	7	1065	4	66
kA118	8	3	6	1584	5	102	298	7	929	4	65
kA119	8	3	6	1767	5	101	552	7	1215	4	66
kA120	9	3	6	1472	5	102	445	9	1035	3	66
kA121	7	3	5	1247	6	104	306	7	792	4	67
kA122	7	3	6	1227	5	103	470	7	916	4	66
kA123	8	3	6	1592	5	101	162	7	831	4	65
kA124	7	3	6	1417	5	102	538	7	978	4	66
kA125	7	3	6	1695	5	102	355	6	1076	5	66
kA126	8	3	6	1589	5	101	488	7	1217	4	65
kA127	7	3	5	1182	6	101	254	5	944	6	66
kA128	8	3	6	1511	5	109	341	8	1039	3	65
kA129	7	3	6	1551	5	101	336	6	1044	5	65
kA130	7	3	5	1551	6	103	387	6	984	5	67
kA131	8	3	5	1626	6	101	152	7	1025	4	64
kA132	7	3	6	1727	5	107	355	7	1167	4	70
kA133	7	3	6	1467	5	102	347	7	974	4	67
kA134	8	3	5	1084	6	103	358	4	452	6	67
kA135	9	3	7	1861	4	101	435	9	1158	3	65
kA136	7	3	6	1307	5	102	324	6	799	5	64
kA137	7	3	6	1300	5	101	310	7	777	4	65
kA138	8	3	5	1312	6	102	384	7	869	4	69
kA139	7	3	6	1594	5	101	487	7	1107	4	67
kA140	7	3	5	1389	6	101	382	6	942	5	65
kA141	8	3	5	1150	6	102	506	8	941	3	66
kA142	8	3	7	1744	4	102	251	8	1052	3	66
kA143	9	3	6	1716	5	103	448	7	1134	4	68
kA144	7	3	6	1530	5	101	462	7	900	4	64
kA145	8	3	7	1628	4	102	470	8	1175	3	67
kA146	6	3	5	932	6	103	197	6	660	5	65
kA147	8	3	5	1222	6	103	196	7	742	4	64
kA148	7	3	6	1154	5	104	400	6	865	5	66
kA149	6	3	5	892	6	101	154	5	571	6	66
kA150	9	3	7	1868	4	102	464	8	1233	3	66
kA151	7	3	6	1455	5	101	426	7	857	4	66
kA152	8	3	6	1150	5	171	150	8	685	3	67
kA153	8	3	6	1403	5	110	224	7	820	4	69
kA154	8	3	6	1541	5	103	339	6	850	5	67
kA155	8	3	6	1339	5	105	353	7	924	4	68
kA156	7	3	5	1333	6	104	350	6	872	5	65
kA157	7	3	6	1589	5	101	426	7	1052	4	65
kA158	8	3	7	1618	4	104	314	8	987	3	66
kA159	9	3	6	1926	5	102	311	9	1043	3	70
kA160	9	3	6	1431	5	103	356	7	933	4	67
kA161	7	3	5	1361	6	103	350	6	1075	5	66
kA162	7	3	5	1045	6	102	236	6	522	5	66
kA163	9	3	6	1537	5	103	484	7	948	4	66
kA164	8	3	6	1803	5	101	412	8	1002	3	67
kA165	7	3	4	1015	7	104	232	6	698	5	68
kA166	8	3	6	1388	5	102	484	6	874	5	65

Ins	id <sub>p</sub>	objectif 1					objectif 2				
		PL	#id <sub>p</sub>	dist	taille	temps	PL	#id <sub>p</sub>	dist	taille	temps
kA167	7	3	5	1273	6	103	384	6	961	5	68
kA168	8	3	6	1620	5	105	282	8	1159	3	69
kA169	7	3	6	1344	5	101	608	7	1155	4	67
kA170	8	3	5	1120	6	101	248	7	653	4	65
kA171	7	3	6	1186	5	129	350	6	744	5	68
kA172	8	3	6	1506	5	107	376	7	1124	4	67
kA173	8	3	5	1073	6	103	310	6	775	5	70
kA174	8	3	6	1347	5	101	496	8	902	3	65
kA175	8	3	6	1279	5	102	195	6	818	5	70
kA176	7	3	6	1206	5	102	449	6	824	5	67
kA177	7	3	5	1292	6	101	224	7	909	4	67
kA178	8	3	5	1320	6	104	292	5	769	6	65
kA179	7	3	6	1000	5	104	175	6	456	5	70
kA180	6	3	6	1477	5	104	284	6	1037	5	68
kA181	8	3	6	1788	5	101	429	8	1216	3	66
kA182	8	3	5	1343	6	103	432	7	883	4	65
kA183	8	3	5	1264	6	104	499	6	1093	5	66
kA184	8	3	6	1506	5	106	685	8	1039	3	71
kA185	8	3	5	1317	6	105	370	7	859	4	67
kA186	7	3	5	1262	6	102	178	5	995	6	65
kA187	8	3	6	1685	5	105	496	7	930	4	65
kA188	7	3	5	1392	6	103	354	7	842	4	64
kA189	8	3	6	1489	5	105	296	8	933	3	66
kA190	9	3	6	1480	5	105	356	8	1073	3	71
kA191	7	3	7	1519	4	105	433	7	1057	4	67
kA192	7	3	6	1326	5	102	421	7	851	4	64
kA193	7	3	5	1219	6	102	384	7	901	4	64
kA194	8	3	5	1362	6	102	423	7	945	4	77
kA195	8	3	6	1336	5	104	324	8	842	3	68
kA196	7	3	5	1226	6	104	218	6	752	5	65
kA197	7	3	6	1405	5	103	510	6	1109	5	69
kA198	8	3	6	1834	5	102	436	6	1141	5	66
kA199	7	3	5	1428	6	102	392	7	935	4	64

## PLNE sous les instances à 50 services

TABLE A.2: Résultats des instances à 50 services pour le PLNE

Ins	id <sub>p</sub>	objectif 1						objectif 2					
		PL	#id <sub>p</sub>	dist	taille	temps	st	PL	#id <sub>p</sub>	dist	taille	temps	st
kA000	14	3	6	854	8	1810		1	12	56	4	120	*
kA001	14	3	8	936	6	1801		29	14	141	3	132	*
kA002	16	3	8	1443	6	1808		132	16	381	3	108	*
kA003	14	3	8	1292	6	1809		122	14	275	3	146	*
kA004	12	3	7	870	7	1800		104	12	176	4	119	*
kA005	14	3	8	993	6	1803		34	14	181	3	126	*
kA006	18	3	6	1268	8	1800		154	17	411	2	109	*
kA007	14	3	8	1328	6	1800		105	14	373	3	115	*
kA008	16	3	9	1483	5	1804		176	16	404	3	118	*
kA009	14	3	7	1166	7	1800		46	12	194	4	108	*
kA010	14	3	8	1361	6	1802		30	13	185	3	143	*
kA011	16	3	8	1237	6	1817		69	16	108	3	109	*
kA012	14	3	8	809	6	1802		47	14	113	3	138	*
kA013	16	3	8	997	6	1800		32	16	217	3	115	*
kA014	12	3	7	978	7	1814		41	12	192	4	139	*
kA015	14	3	7	1113	7	1801		58	13	148	3	113	*
kA016	14	3	7	1301	7	1800		62	14	223	3	126	*
kA017	16	3	8	1239	6	1800		76	15	327	3	133	*
kA018	18	3	9	1881	5	1806		75	18	292	2	114	*
kA019	16	3	8	1367	6	1808		110	16	247	3	129	*
kA020	14	3	8	1452	6	1825		163	14	275	3	119	*
kA021	12	3	5	864	10	234	*	61	11	231	4	115	*
kA022	16	3	7	1322	7	1805		174	15	443	3	107	*
kA023	14	3	7	1086	7	1819		67	14	196	3	133	*
kA024	14	3	7	845	7	1807		150	14	168	3	110	*
kA025	14	3	7	1593	7	1818		103	14	447	3	123	*
kA026	14	3	8	1545	6	1814		65	13	319	3	165	*
kA027	16	3	7	1087	7	1812		82	15	149	3	112	*
kA028	16	3	7	1180	7	1800		90	15	310	3	114	*
kA029	14	3	8	1164	6	1800		124	13	228	3	113	*
kA050	16	3	8	1534	6	1837		221	15	474	3	131	*
kA031	14	3	7	1177	7	1814		97	14	279	3	115	*
kA032	16	3	7	879	7	1801		32	15	172	3	122	*
kA033	16	3	6	968	8	75	*	53	14	279	3	130	*
kA034	16	3	7	1407	7	1810		39	16	185	3	130	*
kA035	14	3	6	1148	8	1808		51	14	108	3	116	*
kA036	16	3	8	1667	6	1811		52	15	187	3	120	*
kA037	16	3	7	1117	7	1020	*	58	16	174	3	116	*
kA038	16	-	-	-	-	-	-	10	15	56	3	161	*
kA039	18	3	7	1260	7	1800		82	15	272	3	127	*
kA040	14	3	8	1108	6	1822		47	14	236	3	108	*
kA041	16	3	8	1302	6	1816		130	14	249	3	109	*
kA042	16	3	7	1291	7	1814		131	13	253	3	130	*
kA043	16	3	8	1580	6	1803		137	15	205	3	132	*
kA044	16	3	9	1782	5	1820		188	16	474	3	108	*
kA045	14	3	8	1003	6	1840		42	13	151	3	119	*
kA046	14	3	7	1001	7	1800		71	13	238	3	123	*
kA047	14	-	-	-	-	-	-	102	15	208	3	117	*
kA048	14	3	7	991	7	1830		80	13	192	3	112	*
kA049	16	3	6	1116	8	1803		43	15	203	3	114	*
kA050	16	3	8	1534	6	1837		221	15	474	3	131	*
kA051	14	3	7	1304	7	1802		31	13	219	3	131	*
kA052	16	3	7	1302	7	1817		42	14	276	3	133	*
kA053	14	3	7	1013	7	1801		36	14	100	3	132	*
kA054	14	3	7	1155	7	1810		70	13	231	3	153	*

Ins	id <sub>p</sub>	objectif 1						objectif 2					
		PL	#id <sub>p</sub>	dist	taille	temps	st	PL	#id <sub>p</sub>	dist	taille	temps	st
kA055	14	3	7	1200	7	1813		66	14	184	3	112	*
kA056	16	3	7	1567	7	1800		255	14	452	3	132	*
kA057	16	3	8	1509	6	1821		113	16	332	3	113	*
kA058	18	3	8	1382	6	1805		100	18	412	2	123	*
kA059	14	3	8	1070	6	1800		59	14	163	3	119	*
kA060	16	3	10	1391	5	1803		188	16	427	3	139	*
kA061	14	3	8	1420	6	1803		49	13	125	3	124	*
kA062	16	3	6	1033	8	49	*	83	15	343	3	127	*
kA063	12	3	7	785	7	1807		32	11	56	4	116	*
kA064	14	3	6	1059	8	260	*	138	14	329	3	115	*
kA065	14	3	7	1096	7	211	*	92	14	338	3	108	*
kA066	16	3	6	1197	8	1595	*	27	16	222	3	120	*
kA067	16	3	9	1592	5	1802		47	16	246	3	137	*
kA068	16	3	8	1201	6	1813		75	14	146	3	128	*
kA069	16	3	8	1304	6	1804		120	12	252	4	122	*
kA070	16	3	8	1224	6	1814		48	14	173	3	124	*
kA071	14	3	8	1266	6	1804		149	13	350	3	113	*
kA072	14	3	7	1240	7	1807		39	14	206	3	143	*
kA073	16	3	7	1199	7	1800		36	16	197	3	143	*
kA074	14	3	6	704	8	1800		47	14	165	3	111	*
kA075	16	3	7	1369	7	1800		17	15	269	3	108	*
kA076	14	3	8	1121	6	1811		42	14	282	3	111	*
kA077	16	3	9	1485	5	1811		145	15	388	3	123	*
kA078	18	3	7	1551	7	1369	*	233	17	491	2	126	*
kA079	14	-	-	-	-	-	-	32	16	90	3	129	*
kA080	14	3	7	918	7	1806		50	14	153	3	119	*
kA081	16	3	6	1015	8	1806		122	14	244	3	116	*
kA082	14	3	6	996	8	1800		74	13	198	3	149	*
kA083	14	3	7	1366	7	1813		125	14	275	3	112	*
kA084	16	3	9	1028	5	1803		46	15	116	3	250	*
kA085	14	3	7	1344	7	1800		85	14	303	3	114	*
kA086	16	3	8	1463	6	1816		229	15	431	3	111	*
kA087	14	3	8	1099	6	1811		38	14	166	3	106	*
kA088	16	3	7	1096	7	105	*	81	13	236	3	105	*
kA089	14	3	6	1048	8	802	*	169	14	307	3	130	*
kA090	14	3	7	1160	7	1800		132	14	226	3	113	*
kA091	16	3	6	1116	8	1800		115	14	214	3	117	*
kA092	12	3	6	780	8	143	*	58	12	175	4	110	*
kA093	16	3	9	1535	5	1808		295	15	457	3	136	*
kA094	14	3	6	1180	8	863	*	73	13	289	3	121	*
kA095	16	3	8	1721	6	1818		164	16	363	3	124	*
kA096	16	3	6	1069	8	1800		92	15	277	3	117	*
kA097	16	3	7	1209	7	1806		119	16	204	3	116	*
kA098	18	3	7	1337	7	1811		55	15	220	3	122	*
kA099	12	3	6	702	8	207	*	15	12	72	4	107	*
kA100	14	3	7	1136	7	1803		80	13	168	3	111	*
kA101	16	3	7	1313	7	1825		79	15	181	3	116	*
kA102	14	3	6	844	8	1821		61	14	200	3	118	*
kA103	18	3	7	1497	7	1800		52	16	211	3	126	*
kA104	16	3	7	1190	7	1801		147	15	228	3	118	*
kA105	14	3	9	1272	5	1800		104	14	232	3	123	*
kA106	18	3	10	1419	5	1800		84	17	236	2	112	*
kA107	16	3	9	1771	5	1803		198	15	310	3	117	*
kA108	14	3	7	731	7	1818		39	14	126	3	113	*
kA109	14	3	8	1103	6	1821		44	14	172	3	126	*
kA110	14	3	6	1048	8	1801		136	12	243	4	116	*
kA111	16	3	7	1152	7	1317	*	76	16	288	3	110	*
kA112	14	3	6	1166	8	93	*	50	14	166	3	109	*
kA113	14	3	7	1166	7	1800		113	14	241	3	120	*
kA114	14	3	8	1249	6	1808		48	14	146	3	114	*



Ins	id <sub>p</sub>	objectif 1						objectif 2					
		PL	#id <sub>p</sub>	dist	taille	temps	st	PL	#id <sub>p</sub>	dist	taille	temps	st
kA115	16	3	7	1201	7	1811		45	14	179	3	121	*
kA116	16	3	6	1108	8	1800		32	14	177	3	119	*
kA117	16	3	7	1327	7	1808		178	15	288	3	125	*
kA118	16	3	6	1079	8	1805		93	16	227	3	127	*
kA119	16	3	7	1328	7	1815		199	16	374	3	122	*
kA120	18	3	7	1369	7	1803		171	17	290	2	107	*
kA121	14	3	7	1188	7	1803		148	13	324	3	133	*
kA122	14	3	6	1116	8	1801		177	13	278	3	126	*
kA123	16	3	7	1046	7	843	*	29	14	63	3	116	*
kA124	14	3	7	1018	7	1803		132	14	280	3	134	*
kA125	14	3	6	1255	8	85	*	121	14	292	3	120	*
kA126	16	3	7	1550	7	1801		217	15	372	3	119	*
kA127	14	3	7	903	7	1810		19	14	117	3	113	*
kA126	16	-	-	-	-	-	-	152	14	182	3	116	*
kA129	14	3	7	1258	7	1800		67	14	188	3	117	*
kA130	18	3	7	1247	7	1771		101	18	180	2	116	*
kA131	16	3	7	1632	7	1805		53	16	207	3	134	*
kA132	14	3	10	1536	5	1818		79	14	268	3	109	*
kA133	14	3	8	1340	6	1807		61	14	219	3	120	*
kA132	16	-	-	-	-	-	-	121	15	195	3	119	*
kA135	18	3	7	1440	7	1810		236	17	392	2	107	*
kA136	14	3	7	1156	7	1800		61	14	341	3	116	*
kA137	14	3	7	1170	7	1807		30	13	155	3	127	*
kA138	16	3	7	1165	7	1801		142	16	288	3	124	*
kA139	14	3	7	1255	7	1817		90	14	261	3	135	*
kA140	14	3	6	910	8	85	*	48	14	102	3	113	*
kA141	16	3	7	1253	7	1802		76	15	316	3	110	*
kA142	16	3	8	1314	6	1819		108	15	331	3	124	*
kA143	18	3	7	1216	7	1816		145	16	284	3	133	*
kA144	14	3	7	1114	7	1800		107	14	226	3	108	*
kA145	16	3	9	1756	5	1800		229	14	457	3	127	*
kA146	12	3	8	889	6	1811		53	12	148	4	132	*
kA147	16	3	8	1036	6	1807		41	16	170	3	130	*
kA148	14	3	7	1050	7	1806		37	12	237	4	111	*
kA149	12	3	7	951	7	1800		22	12	71	4	114	*
kA150	18	3	7	1247	7	1771		101	18	180	2	116	*
kA151	14	3	8	1148	6	1831		85	14	281	3	123	*
kA152	16	3	9	1194	5	1803		86	15	205	3	203	*
kA153	16	3	8	1040	6	1804		49	15	156	3	120	*
kA154	16	3	6	1196	8	338	*	43	15	243	3	107	*
kA155	16	3	9	1395	5	1805		71	16	211	3	108	*
kA156	14	3	7	1200	7	1803		78	14	398	3	119	*
kA157	14	3	6	1038	8	996	*	88	14	162	3	108	*
kA158	16	3	8	1478	6	1809		94	15	256	3	120	*
kA159	18	3	8	1408	6	1813		127	17	360	2	114	*
kA160	18	3	7	1376	7	1800		44	17	139	2	122	*
kA161	14	-	-	-	-	-	-	62	14	268	3	112	*
kA162	14	3	6	922	8	334	*	45	13	169	3	112	*
kA163	18	3	7	1336	7	1803		171	17	296	2	133	*
kA164	16	3	6	1263	8	1321	*	100	14	329	3	125	*
kA165	14	3	6	993	8	1805		84	14	122	3	107	*
kA166	16	3	6	980	8	1804		83	15	238	3	128	*
kA167	14	3	7	1039	7	1802		138	14	170	3	124	*
kA168	16	3	6	928	8	1816		118	15	187	3	118	*
kA169	14	3	9	1606	5	1804		44	14	251	3	121	*
kA170	16	3	8	1036	6	1818		19	15	118	3	120	*
kA171	14	3	8	1321	6	1803		4	14	125	3	136	*
kA170	16	-	-	-	-	-	-	62	15	218	3	184	*
kA173	16	3	6	1236	8	1800		79	15	222	3	119	*
kA174	16	3	7	800	7	1808		41	15	163	3	132	*

Ins	id <sub>p</sub>	objectif 1						objectif 2					
		PL	#id <sub>p</sub>	dist	taille	temps	st	PL	#id <sub>p</sub>	dist	taille	temps	st
kA175	16	3	7	869	7	1804		35	14	140	3	127	*
kA176	14	3	7	964	7	1803		52	14	255	3	124	*
kA177	14	3	8	1393	6	1800		44	13	253	3	142	*
kA178	16	3	6	1185	8	173	*	167	13	319	3	109	*
kA179	14	3	5	768	10	538	*	44	13	114	3	121	*
kA180	12	3	8	1266	6	1804		26	12	242	4	124	*
kA181	16	3	7	1450	7	1803		77	15	400	3	117	*
kA182	16	3	7	1566	7	1803		164	13	422	3	115	*
kA183	16	3	8	1205	6	1805		185	15	273	3	119	*
kA184	16	3	8	1573	6	1813		267	15	426	3	116	*
kA185	16	3	6	879	8	178	*	72	14	137	3	112	*
kA186	14	3	7	1216	7	1813		77	12	251	4	115	*
kA187	16	3	9	1405	5	1819		162	13	259	3	133	*
kA188	14	3	6	1244	8	1800		96	14	219	3	122	*
kA189	16	3	8	1238	6	1803		0	16	154	3	124	*
kA190	18	3	9	1545	5	1803		58	17	158	2	119	*
kA191	14	-	-	-	-	-	-	82	14	243	3	140	*
kA192	14	3	6	1177	8	129	*	110	14	255	3	114	*
kA193	14	3	8	914	6	1816		117	13	224	3	116	*
kA194	16	3	9	1113	5	1800		125	15	339	3	134	*
kA195	16	3	9	1548	5	1816		119	16	194	3	132	*
kA196	14	3	6	982	8	1800		18	14	103	3	121	*
kA197	14	3	7	1112	7	1813		85	13	247	3	120	*
kA198	16	3	6	1182	8	9662	*	105	16	234	3	115	*
kA199	14	3	7	1328	7	1800		87	14	307	3	118	*

Comparaison matheuristique-PLNE : instances à 30 services

TABLE A.3: Comparaison matheuristique-PLNE sous  $l'$ objectif1 : instances à 30 services

Ins	id <sub>p</sub>	matheuristique							PLNE							
		lb <sub>1</sub>	lb <sub>2</sub>	#id <sub>p</sub>	dist	moy	min	max	temps	PL	#id <sub>p</sub>	dist	moy	min	max	temps
kA000	7	3	4	6	1028	5	2	9	25	3	5	1108	6	2	8	106
kA001	7	3	4	7	1119	4	1	9	212	3	6	988	5	1	9	108
kA002	8	4	5	7	1612	4	2	8	94	3	6	1466	5	2	7	103
kA003	7	4	5	7	1605	4	2	8	38	3	6	1456	5	3	7	103
kA004	6	3	4	6	1002	5	1	9	81	3	5	1099	6	5	8	105
<u>kA005</u>	7	3	3	6	<u>1020</u>	5	1	10	113	3	6	<u>1203</u>	5	1	9	104
<u>kA006</u>	9	3	6	6	<u>1642</u>	5	3	7	14	3	6	<u>1844</u>	5	4	6	104
<u>kA007</u>	7	3	5	7	<u>1567</u>	4	2	6	56	3	7	<u>1795</u>	4	2	6	105
<u>kA008</u>	8	3	5	7	<u>1495</u>	4	1	7	7	3	7	<u>1569</u>	4	2	6	106
kA009	7	4	4	6	1120	5	1	9	51	3	5	1130	6	2	9	102
<u>kA010</u>	7	3	4	7	<u>1527</u>	4	1	8	64	3	7	<u>1767</u>	4	1	7	120
<u>kA012</u>	7	3	4	5	<u>749</u>	6	3	9	92	3	5	<u>999</u>	6	4	7	105
<u>kA013</u>	8	3	4	6	<u>1406</u>	5	1	8	161	3	6	<u>1506</u>	5	2	9	104
<u>kA014</u>	6	3	4	6	<u>987</u>	5	1	9	40	3	6	<u>1137</u>	5	1	9	106
<u>kA015</u>	7	3	4	6	<u>1151</u>	5	2	8	32	3	6	<u>1272</u>	5	2	8	105
kA016	7	3	4	7	1255	4	1	11	35	3	6	1511	5	3	9	104
kA017	8	4	4	7	1626	4	1	8	119	3	7	1617	4	3	7	104
<u>kA018</u>	9	3	5	7	<u>1446</u>	4	1	8	189	3	7	<u>1710</u>	4	1	8	108
kA019	8	3	4	7	1169	4	1	8	69	3	6	1525	5	3	7	105
kA020	7	3	5	7	1601	4	1	9	71	3	6	1405	5	1	8	104
<u>kA021</u>	6	3	4	5	<u>1051</u>	6	2	9	44	3	5	<u>1116</u>	6	3	9	106
<u>kA022</u>	8	3	5	6	<u>1476</u>	5	2	9	54	3	6	<u>1658</u>	5	4	7	105
<u>kA023</u>	7	3	4	5	<u>1315</u>	6	1	8	61	3	5	<u>1270</u>	6	1	9	104
<u>kA024</u>	7	3	4	6	<u>1086</u>	5	2	9	111	3	6	<u>1205</u>	5	3	9	105
kA025	7	3	5	7	1538	4	2	7	93	3	6	1701	5	1	7	103
kA026	7	3	4	7	1423	4	2	9	61	3	6	1398	5	1	9	105
kA027	8	3	4	6	1528	5	2	8	70	3	6	1470	5	1	8	103
kA028	8	3	5	7	1326	4	1	8	102	3	6	1458	5	2	7	104
<u>kA029</u>	7	3	5	6	<u>1196</u>	5	2	9	48	3	6	<u>1409</u>	5	3	9	103
kA030	8	3	5	7	1650	4	1	9	24	3	6	1770	5	3	8	104
<u>kA031</u>	7	3	4	6	<u>1127</u>	5	2	8	74	3	6	<u>1403</u>	5	2	7	104
kA032	8	3	3	5	1017	6	4	8	10	3	5	858	6	4	8	105
<u>kA033</u>	8	3	4	5	<u>1202</u>	6	2	9	38	3	5	<u>1203</u>	6	3	9	103
kA034	8	3	4	6	1131	5	1	9	49	3	5	1129	6	3	9	107
<u>kA035</u>	7	3	5	5	<u>952</u>	6	3	9	19	3	5	<u>1107</u>	6	2	12	104
kA036	8	3	5	6	1639	5	2	8	84	3	5	1491	6	5	8	108
<u>kA037</u>	8	3	5	5	<u>1430</u>	6	3	8	34	3	5	<u>1503</u>	6	3	8	103
<u>kA038</u>	8	3	4	5	<u>919</u>	6	4	7	22	3	5	<u>1057</u>	6	2	9	119
<u>kA039</u>	9	4	5	7	<u>1423</u>	4	1	6	24	3	7	<u>1459</u>	4	3	6	106
<u>kA040</u>	7	3	4	5	<u>1088</u>	6	2	9	56	3	5	<u>1248</u>	6	3	8	105
kA041	8	3	3	6	1395	5	2	8	134	3	6	1346	5	1	10	115
<u>kA042</u>	8	3	4	6	<u>1386</u>	5	3	6	108	3	6	<u>1804</u>	5	3	7	105
kA043	8	3	5	6	1375	5	2	9	132	3	5	1332	6	2	9	105
kA044	8	3	5	6	1506	5	2	8	61	3	6	1351	5	1	8	104
<u>kA045</u>	7	3	5	5	<u>991</u>	6	3	9	90	3	5	<u>1018</u>	6	4	8	103
kA046	7	3	5	7	1238	4	1	8	63	3	6	1418	5	3	8	104
<u>kA048</u>	7	3	4	6	<u>1367</u>	5	1	9	50	3	6	<u>1409</u>	5	2	9	104
<u>kA049</u>	8	3	5	6	<u>1481</u>	5	3	8	33	3	6	<u>1496</u>	5	3	7	103
kA050	8	3	4	7	1689	4	1	9	41	3	6	1751	5	2	8	103

Ins	id <sub>p</sub>	matheuristique							PLNE							
		lb <sub>1</sub>	lb <sub>2</sub>	#id <sub>p</sub>	dist	moy	min	max	temps	PL	#id <sub>p</sub>	dist	moy	min	max	temps
kA051	7	3	4	6	1075	5	2	8	36	3	6	1040	5	2	7	103
kA052	8	3	6	7	1397	4	1	8	44	3	7	1640	4	2	6	107
kA053	7	3	4	6	1060	5	2	7	62	3	6	1071	5	1	7	104
kA054	7	3	4	6	1075	5	1	8	26	3	6	1288	5	1	8	106
kA055	7	3	5	6	1240	5	2	8	24	3	6	1122	5	2	8	105
kA056	8	4	5	7	1986	4	1	8	19	3	5	1493	6	3	9	106
kA057	8	3	5	6	1363	5	1	8	44	3	6	1465	5	2	7	104
kA058	9	3	5	7	1767	4	1	8	33	3	6	1512	5	2	9	103
kA059	7	3	3	6	1061	5	1	8	57	3	6	1080	5	1	10	106
kA060	8	3	4	7	1372	4	1	6	90	3	7	1679	4	2	7	106
kA061	7	3	5	5	1033	6	4	9	34	3	5	1258	6	5	9	105
kA062	8	3	6	6	1493	5	2	9	59	3	6	1583	5	2	7	103
kA063	6	3	4	6	1156	5	2	9	34	3	4	992	7	4	11	103
kA064	7	3	4	6	1021	5	1	10	29	3	6	1184	5	2	8	105
kA065	7	3	5	6	1593	5	3	7	34	3	6	1350	5	2	7	103
kA066	8	3	4	6	1413	5	1	8	80	3	6	1792	5	2	8	104
kA067	8	3	5	7	1522	4	2	7	51	3	7	1576	4	3	6	105
kA068	8	3	4	6	1301	5	1	8	125	3	6	1486	5	2	8	105
kA069	8	3	4	6	1273	5	2	8	128	3	6	1317	5	1	8	104
kA070	8	3	3	8	1361	3	1	8	22	3	7	1396	4	2	6	115
kA071	7	3	4	6	1308	5	3	7	35	3	6	1399	5	3	6	109
kA072	7	3	5	6	1339	5	2	8	41	3	6	1352	5	1	9	104
kA073	8	3	6	7	1466	4	1	8	37	3	7	1722	4	1	8	107
kA074	7	3	5	6	1086	5	1	8	39	3	6	1409	5	2	8	104
kA075	8	3	4	6	1437	5	1	8	68	3	6	1588	5	2	7	104
kA076	7	3	4	7	1770	4	1	8	11	3	7	1963	4	1	7	105
kA077	8	3	5	8	1628	3	1	8	38	3	7	1445	4	3	7	105
kA078	9	3	6	8	1759	3	1	7	35	3	7	1901	4	2	6	109
kA079	8	4	4	6	1087	5	1	9	39	3	5	1162	6	1	10	104
kA080	7	3	4	7	1231	4	1	8	22	3	7	1402	4	3	6	105
kA081	8	3	4	5	1437	6	4	7	69	3	5	1477	6	4	7	105
kA082	7	3	4	6	1193	5	3	9	67	3	5	1272	6	1	11	104
kA083	7	3	5	6	1419	5	2	8	33	3	6	1573	5	4	6	105
kA084	8	4	5	5	1242	6	1	9	79	3	5	1279	6	3	8	103
kA085	7	3	5	6	1415	5	1	8	36	3	6	1327	5	2	9	104
kA086	8	4	5	7	1669	4	1	6	70	3	7	1730	4	2	6	106
kA087	7	3	5	6	1414	5	1	9	58	3	6	1514	5	1	9	103
kA088	8	3	6	7	1449	4	1	8	66	3	6	1454	5	2	6	104
kA089	7	3	4	6	1121	5	1	10	7	3	6	1558	5	1	9	103
kA090	7	3	4	6	1188	5	2	8	58	3	6	1413	5	2	9	103
kA091	8	3	5	5	1169	6	2	8	51	3	5	1219	6	4	11	105
kA092	6	3	4	5	882	6	2	9	24	3	6	1022	5	3	8	105
kA093	8	4	5	6	1421	5	1	9	80	3	6	1615	5	3	7	104
kA094	7	3	5	6	1533	5	2	7	37	3	5	1366	6	4	8	103
kA095	8	3	5	7	1644	4	1	6	43	3	6	1775	5	2	6	105
kA096	8	3	5	7	1350	4	1	8	15	3	6	1375	5	1	8	104
kA097	8	4	5	5	1059	6	4	8	38	3	5	1209	6	5	7	108
kA098	9	3	4	6	1300	5	3	8	122	3	5	1430	6	4	8	105
kA099	6	3	4	5	858	6	2	10	28	3	5	839	6	2	9	102
kA100	7	3	4	6	1302	5	3	8	6	3	6	1479	5	1	8	105
kA101	8	3	5	6	1455	5	1	10	98	3	5	1349	6	3	9	106
kA102	7	3	4	5	979	6	2	9	74	3	5	1110	6	4	8	106

Ins	id <sub>P</sub>	mathéuristique								PLNE						
		lb <sub>1</sub>	lb <sub>2</sub>	#id <sub>P</sub>	dist	moy	min	max	temps	PL	#id <sub>P</sub>	dist	moy	min	max	temps
kA103	9	3	5	7	1958	4	2	6	56	3	7	2065	4	2	7	103
kA104	8	3	5	7	1711	4	1	9	196	3	6	1408	5	1	9	103
kA105	7	3	5	7	1661	4	1	7	69	3	7	1686	4	3	6	102
kA106	9	3	5	6	1152	5	3	10	181	3	6	1083	5	4	9	149
kA107	8	4	6	6	1739	5	3	8	45	3	6	1497	5	2	9	104
kA108	7	3	4	5	1167	6	1	9	32	3	4	1125	7	5	9	103
kA109	7	3	4	5	1057	6	2	9	290	3	5	1204	6	4	9	103
kA110	7	3	5	6	1235	5	1	9	55	3	6	1512	5	3	8	103
kA111	8	4	5	6	1458	5	1	8	141	3	6	1546	5	3	7	103
kA112	7	3	4	5	1161	6	2	10	26	3	5	1210	6	3	10	104
kA113	7	3	6	6	1377	5	2	8	425	3	6	1405	5	2	8	103
kA115	8	3	5	6	1359	5	2	7	26	3	5	1156	6	2	10	103
kA116	8	3	4	6	1166	5	2	9	6	3	6	1262	5	3	7	104
kA117	8	3	5	6	1630	5	2	8	65	3	6	1589	5	1	8	104
kA118	8	3	5	6	1413	4	1	9	171	3	6	1584	5	1	9	104
kA119	8	3	6	7	1548	4	1	8	46	3	6	1767	5	4	6	103
kA120	9	3	6	7	1430	4	1	8	31	3	6	1472	5	3	6	104
kA121	7	3	5	6	1252	5	2	9	76	3	5	1247	6	3	9	106
kA122	7	3	4	6	1293	5	2	9	59	3	6	1227	5	1	9	105
kA123	8	3	5	6	1393	5	2	9	65	3	6	1592	5	4	8	103
kA124	7	3	4	7	1257	4	1	8	14	3	6	1417	5	1	8	104
kA125	7	3	6	7	1468	4	1	9	47	3	6	1695	5	3	7	104
kA126	8	3	4	7	1554	4	1	8	35	3	6	1589	5	3	8	103
kA127	7	3	4	6	1209	5	1	8	64	3	5	1182	6	3	8	103
kA128	8	3	5	6	1561	5	2	9	82	3	6	1511	5	1	7	111
kA129	7	3	5	6	1294	5	1	8	51	3	6	1551	5	2	8	103
kA130	7	3	4	5	1218	6	2	9	25	3	5	1551	6	5	7	105
kA131	8	3	5	7	1663	4	1	8	82	3	5	1626	6	5	8	103
kA132	7	3	5	5	1549	6	4	7	99	3	6	1727	5	3	8	109
kA133	7	3	4	6	1170	5	2	8	15	3	6	1467	5	4	7	104
kA134	8	3	4	6	1012	5	3	9	95	3	5	1084	6	3	9	105
kA135	9	3	6	7	1670	4	2	9	41	3	7	1861	4	2	6	103
kA136	7	3	4	6	1252	5	2	8	51	3	6	1307	5	2	8	104
kA137	7	3	5	6	1354	5	1	8	52	3	6	1300	5	1	7	103
kA138	8	4	5	6	1221	5	2	9	90	3	5	1312	6	4	7	104
kA139	7	3	4	7	1714	4	2	7	34	3	6	1594	5	2	7	103
kA140	7	3	4	5	1365	6	2	9	61	3	5	1389	6	2	8	103
kA141	8	3	5	6	1233	5	2	9	109	3	5	1150	6	3	9	104
kA142	8	3	6	8	1578	3	1	7	24	3	7	1744	4	1	6	104
kA143	9	3	6	6	1598	5	1	9	66	3	6	1716	5	3	9	105
kA144	7	3	6	6	1390	5	2	8	10	3	6	1530	5	2	7	103
kA145	8	3	5	7	1637	4	2	8	150	3	7	1628	4	1	7	104
kA146	6	3	4	5	831	6	3	8	71	3	5	932	6	5	8	105
kA147	8	3	5	6	1278	5	2	8	58	3	5	1222	6	4	8	105
kA148	7	3	4	6	1178	5	2	9	47	3	6	1154	5	2	8	106
kA149	6	3	4	5	720	6	1	10	38	3	5	892	6	4	11	103
kA150	9	4	4	7	1643	4	1	7	173	3	7	1868	4	3	6	104
kA151	7	3	5	6	1201	5	1	9	46	3	6	1455	5	3	9	103
kA152	8	3	4	6	1376	5	2	9	198	3	6	1150	5	1	11	173
kA153	8	3	5	7	1423	4	2	8	75	3	6	1403	5	2	8	112
kA154	8	3	4	6	1189	5	3	8	147	3	6	1541	5	2	7	105
kA155	8	3	5	7	1333	4	2	8	57	3	6	1339	5	2	8	107

Ins	id <sub>p</sub>	lb <sub>1</sub>	lb <sub>2</sub>	#id <sub>p</sub>	matheuristique					temps	PL	#id <sub>p</sub>	PLNE				
					dist	moy	min	max	dist				moy	min	max	temps	
kA156	7	3	5	5	1175	6	2	8	57	3	5	1333	6	5	7	106	
kA157	7	3	5	7	1635	4	1	8	49	3	6	1589	5	2	7	103	
kA158	8	3	5	7	1513	4	1	9	5	3	7	1618	4	1	9	106	
kA159	9	3	6	7	1607	4	3	6	50	3	6	1926	5	4	6	104	
kA160	9	3	4	6	1319	5	1	8	145	3	6	1431	5	1	9	105	
kA161	7	4	5	5	1310	6	5	7	39	3	5	1361	6	3	8	105	
kA162	7	3	4	5	1095	6	1	9	49	3	5	1045	6	2	8	104	
kA163	9	4	4	7	1499	4	2	9	128	3	6	1537	5	2	8	105	
kA164	8	4	6	7	1530	4	1	8	50	3	6	1803	5	2	7	103	
kA165	7	3	4	5	1082	6	2	9	34	3	4	1015	7	6	9	106	
kA166	8	3	5	6	1135	5	2	9	17	3	6	1388	5	3	7	104	
kA167	7	3	3	6	1136	4	1	8	61	3	5	1273	6	4	10	105	
kA168	8	3	5	6	1583	5	1	7	15	3	6	1620	5	2	8	107	
kA169	7	3	4	7	1655	4	1	8	78	3	6	1344	5	2	7	103	
kA170	8	3	5	5	1069	6	5	8	58	3	5	1120	6	5	7	103	
kA171	7	4	5	7	1235	4	2	6	184	3	6	1186	5	3	9	131	
kA172	8	3	3	7	1324	4	1	7	16	3	6	1506	5	3	6	109	
kA173	8	4	4	6	1071	5	1	10	46	3	5	1073	6	2	10	105	
kA174	8	3	5	6	1309	5	2	8	24	3	6	1347	5	2	6	103	
kA175	8	3	5	6	1234	5	1	9	54	3	6	1279	5	2	7	104	
kA176	7	3	4	7	1127	4	1	8	59	3	6	1206	5	3	9	104	
kA177	7	3	4	5	1034	6	2	9	69	3	5	1292	6	2	10	103	
kA178	8	3	5	6	1267	5	1	9	25	3	5	1320	6	3	8	106	
kA179	7	3	4	6	1060	5	1	8	67	3	6	1000	5	1	10	106	
kA180	6	3	4	6	1396	5	3	8	17	3	6	1477	5	3	6	106	
kA181	8	3	5	6	1736	5	1	8	81	3	6	1788	5	3	8	103	
kA182	8	3	4	5	1177	6	2	9	32	3	5	1343	6	4	8	105	
kA183	8	4	4	6	1277	5	1	9	99	3	5	1264	6	5	8	106	
kA184	8	3	5	6	1225	5	2	7	80	3	6	1506	5	3	7	108	
kA185	8	3	4	5	1181	6	3	9	112	3	5	1317	6	3	9	107	
kA186	7	3	4	6	1304	5	1	9	26	3	5	1262	6	3	10	104	
kA187	8	5	5	7	1530	4	2	7	26	3	6	1685	5	4	6	107	
kA188	7	3	4	5	1292	6	2	8	71	3	5	1392	6	3	8	105	
kA189	8	3	5	7	1370	4	1	6	53	3	6	1489	5	3	7	107	
kA190	9	3	4	6	1517	5	2	8	76	3	6	1480	5	3	9	107	
kA191	7	3	4	7	1468	4	2	7	23	3	7	1519	4	3	7	107	
kA192	7	3	4	7	1471	4	1	8	53	3	6	1326	5	1	7	104	
kA193	7	3	4	6	1257	5	2	8	113	3	5	1219	6	5	7	104	
kA194	8	3	4	6	1412	5	3	8	104	3	5	1362	6	1	9	104	
kA195	8	3	5	7	1355	4	1	9	27	3	6	1336	5	1	10	106	
kA196	7	3	4	5	1146	6	3	9	32	3	5	1226	6	4	8	106	
kA197	7	3	5	6	1355	5	3	8	51	3	6	1405	5	1	7	105	
kA198	8	3	6	6	1457	5	3	9	70	3	6	1834	5	2	7	104	
kA199	7	3	5	6	1471	5	2	8	16	3	5	1428	6	2	8	104	

TABLE A.4: Comparaison matheuristique-PLNE sous  $l'$ objectif2 : instances à 30 services

Ins	id <sub>p</sub>	matheuristique							PLNE							
		lb <sub>1</sub>	lb <sub>2</sub>	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps	PL	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps
kA000	7	3	4	6	979	5	2	9	24	188	6	571	5	3	11	65
kA001	7	3	4	7	1210	4	1	6	183	284	6	736	5	3	9	68
kA002	8	4	5	7	1577	4	2	8	81	478	8	1188	3	3	5	65
kA003	7	4	5	7	1414	4	1	8	43	447	7	1039	4	3	7	65
kA004	6	3	4	6	1002	5	1	9	83	257	5	693	6	2	9	67
kA005	7	3	3	6	1053	5	1	9	106	294	6	808	5	1	7	67
kA006	9	3	6	6	1469	5	3	7	18	468	9	1202	3	1	5	64
kA007	7	3	5	7	1502	4	2	6	56	485	7	1039	4	2	7	66
kA008	8	3	5	7	1436	4	1	7	8	376	8	1088	3	2	6	65
kA009	7	4	4	6	1125	5	2	9	51	370	7	820	4	1	8	66
kA010	7	3	4	7	1480	4	1	8	63	234	7	1003	4	2	7	76
kA012	7	3	4	5	749	6	3	9	63	148	6	593	5	3	7	66
kA013	8	3	4	6	1156	5	3	8	35	364	6	909	5	2	8	66
kA014	6	3	4	6	937	5	2	9	39	500	6	777	5	2	7	66
kA015	7	3	4	6	1151	5	2	8	30	303	7	675	4	2	9	65
kA016	7	3	4	7	1276	4	1	11	35	373	7	1093	4	1	9	66
kA017	8	4	4	7	1626	4	1	8	100	444	8	1202	3	2	7	66
kA018	9	3	5	7	1334	4	2	8	211	321	8	1032	3	1	9	68
kA019	8	3	4	7	1036	4	1	6	34	276	6	786	5	2	7	65
kA020	7	3	5	7	1570	4	1	7	53	374	7	1128	4	1	8	66
kA021	6	3	4	5	1025	6	2	9	36	154	6	656	5	2	7	66
kA022	8	3	5	6	1458	5	2	7	43	434	8	1046	3	1	9	64
kA023	7	3	4	5	1259	6	1	8	45	500	6	940	5	1	8	71
kA024	7	3	4	6	1081	5	2	9	91	406	7	898	4	1	9	66
kA025	7	3	5	7	1510	4	1	6	70	334	7	1053	4	3	5	65
kA026	7	3	4	7	1385	4	2	9	65	269	7	703	4	3	7	64
kA027	8	3	4	6	1321	5	3	8	75	460	7	1033	4	1	6	66
kA028	8	3	5	7	1221	4	1	8	81	451	8	960	3	1	7	65
kA029	7	3	5	6	1095	5	2	8	44	311	7	726	4	2	6	64
kA030	8	3	5	7	1530	4	3	6	19	544	8	1170	3	1	6	68
kA031	7	3	4	6	1035	5	2	8	52	287	7	745	4	1	7	66
kA032	8	3	3	5	981	6	4	8	21	182	7	680	4	1	8	67
kA033	8	3	4	5	1133	6	3	9	20	319	7	887	4	1	8	67
kA034	8	3	4	6	1007	5	1	9	39	278	6	633	5	3	9	67
kA035	7	3	5	5	952	6	3	9	20	266	6	777	5	1	7	66
kA036	8	3	5	6	1383	5	1	8	64	324	7	1039	4	1	8	65
kA037	8	3	5	6	1052	5	1	8	37	297	8	874	3	2	7	66
kA038	8	3	4	5	831	6	4	7	25	274	6	717	5	3	8	107
kA039	9	4	5	7	1461	4	1	6	103	282	8	950	3	1	7	68
kA040	7	3	4	5	1047	6	4	8	61	316	5	944	6	4	7	65
kA041	8	3	3	6	1280	5	4	6	120	462	8	1092	3	1	8	71
kA042	8	3	4	6	1204	5	3	8	101	367	7	1169	4	3	7	71
kA043	8	3	5	6	1267	5	2	8	101	286	7	893	4	3	7	65
kA044	8	3	5	6	1506	5	2	8	55	562	6	1064	5	2	7	64
kA045	7	3	5	5	917	6	5	7	85	334	6	696	5	3	7	65
kA046	7	3	5	7	1246	4	2	7	70	527	6	852	5	3	7	66
kA048	7	3	4	6	1321	5	1	7	50	409	7	1034	4	3	6	67
kA049	8	3	5	6	1461	5	3	8	32	315	8	914	3	2	5	65
kA050	8	3	4	7	1582	4	2	9	129	560	7	1323	4	2	7	68



Ins	id <sub>p</sub>	matheuristique							PLNE							
		lb <sub>1</sub>	lb <sub>2</sub>	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps	PL	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps
kA051	7	3	4	6	1132	5	2	8	26	360	6	886	5	3	6	65
kA052	8	3	6	7	1282	4	2	8	14	319	7	1076	4	3	7	68
kA053	7	3	4	6	933	5	3	8	44	302	7	755	4	3	6	67
kA054	7	3	4	6	990	5	1	8	29	348	6	853	5	3	8	66
kA055	7	3	5	6	1287	5	4	7	20	280	6	860	5	2	8	67
kA056	8	4	5	7	1793	4	2	7	87	610	6	1173	5	3	8	67
kA057	8	3	5	6	1352	5	3	6	48	408	7	1092	4	1	6	71
kA058	9	3	5	7	1564	4	2	9	135	517	8	1069	3	1	9	67
kA059	7	3	3	6	933	5	3	8	52	232	7	644	4	1	8	66
kA060	8	3	4	7	1498	4	1	6	78	583	8	1130	3	1	6	69
kA061	7	3	5	5	940	6	4	9	24	306	6	808	5	1	9	66
kA062	8	3	6	6	1160	5	2	8	39	256	7	968	4	2	8	64
kA063	6	3	4	6	1065	5	2	9	27	258	6	652	5	3	8	65
kA064	7	3	4	6	991	5	1	10	22	348	6	795	5	1	9	66
kA065	7	3	5	7	1393	4	1	6	12	396	6	1063	5	4	9	67
kA066	8	3	4	6	1527	5	3	9	39	150	8	1099	3	1	8	68
kA067	8	3	5	7	1314	4	1	7	54	242	8	872	3	2	6	64
kA068	8	3	4	6	1249	5	1	8	128	290	6	907	5	3	8	67
kA069	8	3	4	6	920	5	3	7	91	286	6	761	5	3	6	66
kA070	8	3	3	8	1159	3	1	7	23	254	8	789	3	1	6	69
kA071	7	3	4	6	1166	5	3	7	41	404	6	902	5	2	8	65
kA072	7	3	5	7	1189	4	3	7	39	318	6	881	5	2	10	73
kA073	8	3	6	7	1466	4	1	8	41	156	7	1105	4	3	6	68
kA074	7	3	5	6	1086	5	1	8	39	218	6	859	5	1	7	66
kA075	8	3	4	6	1480	5	2	7	83	242	7	921	4	3	6	65
kA076	7	3	4	7	1622	4	1	8	11	358	7	1131	4	3	7	66
kA077	8	3	5	8	1548	3	1	8	37	517	8	1233	3	1	7	67
kA078	9	3	6	8	1513	3	1	6	23	504	8	1067	3	1	6	65
kA079	8	4	4	6	1166	5	2	8	124	262	7	767	4	2	10	67
kA080	7	3	4	7	1353	4	1	8	22	456	7	841	4	1	7	65
kA081	8	3	4	5	1175	6	3	7	44	300	6	1026	5	2	7	67
kA082	7	3	4	6	1289	5	3	7	15	394	6	876	5	1	10	66
kA083	7	3	5	6	1273	5	2	8	38	406	7	1098	4	3	7	66
kA084	8	4	5	5	1146	5	1	9	92	358	8	942	3	1	7	71
kA085	7	3	5	6	1415	5	2	7	33	325	7	1049	4	3	7	66
kA086	8	4	5	7	1582	4	1	6	67	479	8	1081	3	2	5	64
kA087	7	3	5	6	1306	5	2	8	79	188	7	855	4	2	6	65
kA088	8	3	6	7	1394	4	3	6	75	416	8	985	3	1	6	65
kA089	7	3	4	6	1110	5	1	10	30	421	7	828	4	1	8	64
kA090	7	3	4	6	1120	5	2	8	60	454	7	956	4	3	6	64
kA091	8	3	5	5	1094	6	2	8	47	168	8	764	3	2	8	69
kA092	6	3	4	5	881	6	3	9	21	178	6	602	5	2	7	65
kA093	8	4	5	6	1480	5	2	9	20	582	7	1103	4	1	7	67
kA094	7	3	5	6	1429	5	2	7	28	346	6	1034	5	2	7	67
kA095	8	3	5	7	1342	4	1	7	54	468	8	1049	3	2	7	65
kA096	8	3	5	7	1249	4	1	8	19	254	8	898	3	2	7	68
kA097	8	4	5	5	1110	6	5	7	39	393	8	896	3	2	7	68
kA098	9	3	4	6	1203	5	4	6	121	316	8	834	3	1	6	64
kA099	6	3	4	5	704	6	1	9	26	195	6	544	5	1	8	65
kA100	7	3	4	6	1284	5	3	8	15	444	6	993	5	4	7	65
kA101	8	3	5	7	1413	4	1	7	82	333	7	915	4	3	6	69

Ins	id <sub>p</sub>	matheuristique							PLNE							
		lb <sub>1</sub>	lb <sub>2</sub>	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps	PL	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps
kA102	7	3	4	5	962	6	4	8	77	230	7	659	4	3	6	66
kA103	9	3	5	7	1994	4	2	6	61	460	7	1461	4	3	6	66
kA104	8	3	5	8	1579	3	1	9	155	385	7	994	4	2	8	67
kA105	7	3	5	7	1610	4	3	6	47	415	7	1072	4	2	7	66
kA106	9	3	5	6	1040	5	4	9	127	264	8	743	3	1	7	73
kA107	8	4	6	7	1599	4	3	6	29	458	7	1127	4	2	7	66
kA108	7	3	4	5	1173	6	2	9	23	306	7	810	4	2	6	67
kA109	7	3	4	5	1131	6	4	9	182	271	7	739	4	3	6	69
kA110	7	3	5	6	1210	5	1	9	66	326	6	951	5	2	9	66
kA111	8	4	5	7	1490	4	1	8	140	316	8	1157	3	2	7	65
kA112	7	3	4	5	1125	6	2	10	25	280	6	802	5	3	8	67
kA113	7	3	6	6	1274	5	2	7	322	356	6	851	5	2	8	64
kA115	8	3	5	7	1102	4	1	7	24	312	6	841	5	3	7	69
kA116	8	3	4	6	1220	5	4	7	18	324	6	776	5	4	6	65
kA117	8	3	5	6	1591	5	2	8	51	426	7	1065	4	1	6	66
kA118	8	3	5	6	1510	5	1	9	39	298	7	929	4	1	8	65
kA119	8	3	6	7	1538	4	1	6	49	552	7	1215	4	2	7	66
kA120	9	3	6	7	1522	4	1	7	44	445	9	1035	3	1	7	66
kA121	7	3	5	6	1130	5	2	9	85	306	7	792	4	1	7	67
kA122	7	3	4	6	1293	5	2	9	50	470	7	916	4	1	7	66
kA123	8	3	5	6	1353	5	2	7	54	162	7	831	4	2	9	65
kA124	7	3	4	7	1270	4	1	7	53	538	7	978	4	2	6	66
kA125	7	3	6	7	1436	4	1	7	48	355	6	1076	5	3	8	66
kA126	8	3	4	7	1535	4	1	8	28	488	7	1217	4	2	8	65
kA127	7	3	4	6	1304	5	3	8	65	254	5	944	6	2	9	66
kA128	8	3	5	6	1406	5	4	7	61	341	8	1039	3	2	7	65
kA129	7	3	5	6	1315	4	1	8	45	336	6	1044	5	4	7	65
kA130	7	3	4	5	1201	6	2	9	23	387	6	984	5	2	7	67
kA131	8	3	5	7	1585	4	2	8	90	152	7	1025	4	2	7	64
kA132	7	3	5	5	1446	6	4	8	111	355	7	1167	4	2	6	70
kA133	7	3	4	6	1368	5	3	7	55	347	7	974	4	2	8	67
kA134	8	3	4	6	888	5	3	7	78	358	4	452	6	6	6	67
kA135	9	3	6	7	1599	4	2	9	39	435	9	1158	3	2	5	65
kA136	7	3	4	6	1101	5	2	8	50	324	6	799	5	2	8	64
kA137	7	3	5	6	1110	5	3	8	46	310	7	777	4	3	5	65
kA138	8	4	5	6	1117	5	1	9	75	384	7	869	4	2	6	69
kA139	7	3	4	7	1468	4	1	8	12	487	7	1107	4	3	6	67
kA140	7	3	4	5	1300	6	5	8	48	382	6	942	5	1	8	65
kA141	8	3	5	6	1309	5	2	8	96	506	8	941	3	3	6	66
kA142	8	3	6	8	1399	3	1	8	20	251	8	1052	3	2	6	66
kA143	9	3	6	6	1587	5	3	9	68	448	7	1134	4	1	9	68
kA144	7	3	6	6	1242	5	3	8	41	462	7	900	4	1	9	64
kA145	8	3	5	7	1634	4	2	6	147	470	8	1175	3	1	6	67
kA146	6	3	4	5	814	6	4	8	93	197	6	660	5	3	7	65
kA147	8	3	5	6	1058	5	4	6	56	196	7	742	4	2	7	64
kA148	7	3	4	6	1134	5	3	9	46	400	6	865	5	3	7	66
kA149	6	3	4	5	720	6	1	10	30	154	5	571	6	2	13	66
kA150	9	4	4	7	1576	4	2	6	139	464	8	1233	3	1	5	66
kA151	7	3	5	6	1184	5	1	8	52	426	7	857	4	1	8	66
kA152	8	3	4	6	1151	5	1	9	149	150	8	685	3	1	10	67
kA153	8	3	5	7	1323	4	1	7	67	224	7	820	4	3	7	69

Ins	id <sub>p</sub>	matheuristique								PLNE						
		lb <sub>1</sub>	lb <sub>2</sub>	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps	PL	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps
kA154	8	3	4	6	1193	5	4	7	112	339	6	850	5	2	9	67
kA155	8	3	5	7	1235	4	2	7	13	353	7	924	4	2	7	68
kA156	7	3	5	6	1180	5	1	8	57	350	6	872	5	3	7	65
kA157	7	3	5	7	1469	4	2	7	37	426	7	1052	4	1	7	65
kA158	8	3	5	7	1142	4	1	9	14	314	8	987	3	1	7	66
kA159	9	3	6	7	1483	4	3	5	50	311	9	1043	3	1	6	70
kA160	9	3	4	6	1326	5	1	8	138	356	7	933	4	1	8	67
kA161	7	4	5	5	1306	6	5	7	30	350	6	1075	5	2	8	66
kA162	7	3	4	5	1095	6	1	9	36	236	6	522	5	2	11	66
kA163	9	4	4	7	1334	4	3	9	90	484	7	948	4	1	8	66
kA164	8	4	6	7	1709	4	1	8	42	412	8	1002	3	1	6	67
kA165	7	3	4	5	1017	6	3	8	32	232	6	698	5	4	8	66
kA166	8	3	5	6	1178	5	2	9	11	484	6	874	5	2	7	65
kA167	7	3	3	6	1119	4	1	8	48	384	6	961	5	2	10	68
kA168	8	3	5	6	1548	5	3	7	16	282	8	1159	3	2	5	69
kA169	7	3	4	7	1598	4	3	7	63	608	7	1155	4	2	6	67
kA170	8	3	5	5	924	6	5	8	16	248	7	653	4	2	7	65
kA171	7	4	5	7	1150	4	2	6	111	350	6	744	5	3	9	68
kA172	8	3	3	7	1436	4	1	7	14	376	7	1124	4	2	7	67
kA173	8	4	4	6	1035	5	1	10	46	310	6	775	5	1	11	70
kA174	8	3	5	7	1281	4	1	7	75	496	8	902	3	2	6	65
kA175	8	3	5	7	1185	4	1	6	37	195	6	818	5	2	10	70
kA176	7	3	4	7	1022	4	3	7	46	449	6	824	5	3	7	67
kA177	7	3	4	5	1034	6	2	9	57	224	7	909	4	3	7	67
kA178	8	3	5	6	1272	5	3	8	21	292	5	769	6	2	9	65
kA179	7	3	4	7	951	4	1	8	63	175	6	456	5	1	9	70
kA180	6	3	4	6	1347	5	3	7	13	284	6	1037	5	3	7	68
kA181	8	3	5	7	1606	4	1	8	74	429	8	1216	3	2	6	66
kA182	8	3	4	5	1081	6	5	7	27	432	7	883	4	3	8	65
kA183	8	4	4	6	1294	5	4	6	89	499	6	1093	5	1	8	66
kA184	8	3	5	6	1156	5	2	7	59	685	8	1039	3	3	5	71
kA185	8	3	4	5	1050	6	3	9	99	370	7	859	4	1	7	67
kA186	7	3	4	6	1295	5	1	9	30	178	5	995	6	3	8	65
kA187	8	5	5	7	1472	4	2	7	81	496	7	930	4	3	7	65
kA188	7	3	4	5	1218	6	3	7	49	354	7	842	4	3	6	64
kA189	8	3	5	7	1470	4	1	6	45	296	8	933	3	2	7	66
kA190	9	3	4	6	1281	5	3	7	57	356	8	1073	3	1	8	71
kA191	7	3	4	7	1353	4	1	7	22	433	7	1057	4	1	6	67
kA192	7	3	4	7	1545	4	2	6	14	421	7	851	4	2	6	64
kA193	7	3	4	6	1195	5	2	7	91	384	7	901	4	3	6	64
kA194	8	3	4	7	1183	4	2	9	87	423	7	945	4	1	7	77
kA195	8	3	5	7	1091	4	1	9	30	324	8	842	3	1	8	68
kA196	7	3	4	5	1060	6	4	9	24	218	6	752	5	3	7	65
kA197	7	3	5	6	1298	5	3	8	53	510	6	1109	5	1	7	69
kA198	8	3	6	6	1387	5	3	9	107	436	6	1141	5	3	7	66
kA199	7	3	5	7	1291	4	4	6	53	392	7	935	4	3	6	64

Présentation des résultats obtenus avec les instances à  
50 services

TABLE A.5: Comparaison mathheuristique-PLNE sous l'objectif1 : instances à 50 services

Ins	id <sub>p</sub>	mathheuristique								PLNE							st
		lb <sub>1</sub>	lb <sub>2</sub>	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps	PL	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps	
kA000	14	4	4	9	679	5	2	9	27	3	6	854	8	5	12	1810	
kA001	14	4	4	8	914	6	3	10	41	3	8	936	6	3	12	1801	
kA002	16	4	6	9	1110	5	1	9	29	3	8	1443	6	5	10	1808	
kA003	14	4	5	11	1504	4	1	9	52	3	8	1292	6	4	9	1809	
kA004	12	4	4	8	1030	6	3	10	66	3	7	870	7	4	10	1800	
kA005	14	4	5	9	691	5	1	10	42	3	8	993	6	2	9	1803	
kA006	18	5	6	9	1678	5	1	9	94	3	6	1268	8	6	11	1800	
kA007	14	4	6	8	1472	6	2	9	38	3	8	1328	6	3	11	1800	
kA008	16	4	6	9	1243	5	1	8	90	3	9	1483	5	1	9	1804	
kA009	14	4	5	10	1394	5	2	10	64	3	7	1166	7	2	11	1800	
kA010	14	4	4	8	1423	6	3	10	70	3	8	1361	6	3	12	1802	
kA011	16	3	5	7	1337	7	2	10	71	3	8	1237	6	2	12	1817	
kA012	14	4	5	8	814	6	3	9	71	3	8	809	6	3	11	1802	
kA013	16	4	16	9	898	5	2	9	74	3	8	997	6	1	12	1800	
kA014	12	3	6	7	596	7	5	10	56	3	7	978	7	2	12	1814	
kA015	14	4	4	7	1060	7	6	9	96	3	7	1113	7	4	10	1801	
kA016	14	4	5	8	968	6	4	9	65	3	7	1301	7	5	13	1800	
kA017	16	4	6	8	1381	6	2	9	98	3	8	1239	6	2	10	1800	
kA018	18	4	5	9	1697	5	2	9	81	3	9	1881	5	3	9	1806	
kA019	16	5	5	8	948	6	3	10	68	3	8	1367	6	3	11	1808	
kA020	14	4	5	8	1024	6	2	9	98	3	8	1452	6	3	10	1825	
kA021	12	4	5	8	1209	6	1	10	50	3	5	864	10	5	14	234	*
kA022	16	3	6	8	1086	6	2	10	52	3	7	1322	7	3	10	1805	
kA023	14	4	5	8	1135	6	2	10	49	3	7	1086	7	4	10	1819	
kA024	14	5	5	8	930	6	2	9	62	3	7	845	7	4	11	1807	
kA025	14	4	6	8	1691	6	3	9	64	3	7	1593	7	5	11	1818	
kA026	14	4	5	9	8119	5	2	9	178	3	8	1545	6	3	11	1814	
kA027	16	4	6	9	1099	5	1	10	75	3	7	1087	7	2	12	1812	
kA028	16	4	6	10	7396	4	1	8	43	3	7	1180	7	5	12	1800	
kA029	14	5	5	9	1483	5	1	10	257	3	8	1164	6	2	7	1800	
kA050	16	4	5	8	1314	6	2	8	50	3	8	1534	6	3	12	1837	
kA031	14	4	6	8	1011	6	4	10	36	3	7	1177	7	6	12	1814	
kA032	16	4	6	8	859	6	3	9	47	3	7	879	7	3	9	1801	
kA033	16	3	5	6	915	8	7	10	62	3	6	968	8	5	11	75	*
kA034	16	5	5	9	799	5	1	9	43	3	7	1407	7	5	11	1810	
kA035	14	4	4	8	941	6	2	10	83	3	6	1148	8	6	10	1808	
kA036	16	5	5	9	1189	5	1	10	39	3	8	1667	6	3	9	1811	
kA037	16	4	6	8	875	6	2	10	53	3	7	1117	7	5	11	1020	*
kA038	16	4	6	8	672	5	1	10	40	-	-	-	-	-	-	-	
kA039	18	4	5	7	1292	7	5	9	59	3	7	1260	7	4	10	1800	
kA040	14	4	4	9	1012	5	1	9	30	3	8	1108	6	3	9	1822	
kA041	16	3	5	8	947	6	2	10	42	3	8	1302	6	3	10	1816	
kA042	16	3	5	8	875	6	1	10	43	3	7	1291	7	4	13	1814	
kA043	16	5	5	8	1177	6	3	10	65	3	8	1580	6	2	13	1803	
kA044	16	4	6	9	1262	5	1	10	44	3	9	1782	5	3	9	1820	
kA045	14	4	5	8	1035	6	2	9	36	3	8	1003	6	4	12	1840	
kA046	14	4	5	8	931	6	4	9	35	3	7	1001	7	5	11	1800	
kA047	16	4	5	9	1033	5	1	8	54	-	-	-	-	-	-	-	
kA048	14	4	5	7	909	7	3	9	14	3	7	991	7	4	12	1830	

Ins	id <sub>p</sub>	matheuristique								PLNE							st
		lb <sub>1</sub>	lb <sub>2</sub>	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps	PL	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps	
kA049	16	4	6	7	1159	7	3	9	50	3	6	1116	8	5	9	1803	
<u>kA050</u>	16	4	5	8	<u>1314</u>	6	2	8	50	3	8	<u>1534</u>	6	3	12	1837	
<u>kA051</u>	14	4	5	7	<u>1156</u>	7	5	9	44	3	7	<u>1304</u>	7	5	10	1802	
kA052	16	4	6	8	1346	5	1	9	45	3	7	1302	7	3	12	1817	
kA053	14	4	5	9	7816	5	2	9	41	3	7	1013	7	2	14	1801	
<u>kA054</u>	14	4	5	7	<u>827</u>	7	5	9	17	3	7	<u>1155</u>	7	5	11	1810	
kA055	14	3	6	8	888	6	2	9	24	3	7	1200	7	3	10	1813	
kA056	16	4	5	10	1739	5	1	9	49	3	7	1567	7	4	13	1800	
kA057	16	5	5	9	1452	5	1	10	70	3	8	1509	6	4	8	1821	
kA058	18	4	5	9	1174	5	2	10	44	3	8	1382	6	4	13	1805	
kA059	14	3	5	10	1655	5	1	9	34	3	8	1070	6	3	12	1800	
kA060	16	3	5	9	971	5	2	9	51	3	10	1391	5	1	10	1803	
kA061	14	4	5	10	1929	5	1	8	39	3	8	1420	6	4	9	1803	
kA062	16	4	6	9	1179	5	1	10	50	3	6	1033	8	5	10	49	
kA063	12	4	4	9	790	5	1	10	52	3	7	785	7	2	13	1807	
kA064	14	4	5	7	958	7	4	9	60	3	6	1059	8	3	14	260	
kA065	14	4	5	10	1393	5	1	10	65	3	7	1096	7	3	13	211	
kA066	16	3	5	7	1352	7	3	10	58	3	6	1197	8	5	11	1595	
kA067	16	5	6	9	8348	5	2	9	81	3	9	1592	5	3	9	1802	
kA068	16	4	5	9	3486	5	2	10	81	3	8	1201	6	3	9	1813	
<u>kA069</u>	16	5	6	8	<u>780</u>	6	3	10	40	3	8	<u>1304</u>	6	4	10	1804	
kA070	16	5	5	9	1243	5	3	9	56	3	8	1224	6	3	8	1814	
kA071	14	4	6	9	958	5	1	9	20	3	8	1266	6	5	9	1804	
kA072	14	4	5	9	980	5	1	10	48	3	7	1240	7	3	11	1807	
kA073	16	5	6	9	1120	5	1	10	44	3	7	1199	7	5	10	1800	
kA074	14	4	5	9	2846	5	1	10	38	3	6	704	8	6	12	1800	
kA075	16	5	6	8	1575	6	2	9	44	3	7	1369	7	5	11	1800	
kA076	14	4	6	9	1076	5	2	8	37	3	8	1121	6	3	13	1811	
kA077	16	4	6	10	1344	5	1	10	33	3	9	1485	5	2	9	1811	
kA078	18	4	11	8	1383	6	2	10	57	3	7	1551	7	4	10	1369	
kA079	16	4	4	8	886	6	5	9	44	-	-	-	-	-	-	-	
kA080	14	4	5	10	814	5	2	9	38	3	7	918	7	4	10	1806	
kA081	16	3	5	8	1046	6	2	10	12	3	6	1015	8	4	13	1806	
kA082	14	4	4	8	1195	6	3	10	30	3	6	996	8	5	14	1800	
kA083	14	4	5	8	1004	6	2	8	37	3	7	1366	7	5	11	1813	
kA084	16	5	5	8	845	6	4	9	50	3	9	1028	5	3	8	1803	
kA085	14	5	5	8	1009	6	1	10	47	3	7	1344	7	3	12	1800	
kA086	16	5	5	11	1629	4	1	8	39	3	8	1463	6	3	12	1816	
kA087	14	3	6	9	1218	5	1	9	39	3	8	1099	6	2	11	1811	
kA088	16	5	6	9	1120	5	1	9	45	3	7	1096	7	3	12	105	
kA089	14	4	6	8	1379	6	3	10	40	3	6	1048	8	3	13	802	
kA090	14	5	6	8	1243	6	3	9	39	3	7	1160	7	1	12	1800	
kA091	16	4	5	8	1299	6	1	9	41	3	6	1116	8	6	11	1800	
kA092	12	3	15	7	4750	7	2	9	30	3	6	780	8	4	12	143	
<u>kA093</u>	16	5	6	9	<u>1473</u>	5	1	9	51	3	9	<u>1535</u>	5	2	7	1808	
kA094	14	4	5	8	1166	6	3	8	36	3	6	1180	8	2	14	863	
kA095	16	5	6	8	5744	6	2	9	36	3	8	1721	6	3	10	1818	
kA096	16	4	5	8	1092	6	1	9	45	3	6	1069	8	7	10	1800	
kA097	16	5	5	7	9161	7	4	10	37	3	7	1209	7	3	10	1806	
kA098	18	4	5	8	1164	6	1	10	61	3	7	1337	7	3	11	1811	
kA099	12	3	5	7	635	7	2	9	22	3	6	702	8	5	12	207	

Ins	id <sub>p</sub>	matheuristique								PLNE							st
		lb <sub>1</sub>	lb <sub>2</sub>	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps	PL	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps	
kA100	14	4	6	7	1033	7	3	10	157	3	7	1136	7	3	12	1803	
kA101	16	4	5	7	922	7	3	11	31	3	7	1313	7	4	11	1825	
kA102	14	4	5	8	808	6	4	9	27	3	6	844	8	5	13	1821	
kA103	18	5	5	8	1290	6	1	10	38	3	7	1497	7	4	10	1800	
kA104	16	4	5	9	1079	5	1	9	32	3	7	1190	7	4	12	1801	
kA105	14	4	4	7	1043	7	4	9	36	3	9	1272	5	2	8	1800	
kA106	18	3	5	10	1383	5	2	9	120	3	10	1419	5	1	12	1800	
kA107	16	4	5	9	1485	5	1	9	104	3	9	1771	5	2	12	1803	
kA108	14	4	4	8	914	6	3	9	64	3	7	731	7	3	12	1818	
kA109	14	4	4	8	5458	6	2	10	25	3	8	1103	6	4	9	1821	
kA110	14	4	6	9	1455	5	2	9	25	3	6	1048	8	5	13	1801	
kA111	16	5	6	9	1381	5	3	10	112	3	7	1152	7	2	12	1317	*
kA112	14	4	4	7	4486	7	4	10	81	3	6	1166	8	5	11	93	*
kA113	14	4	6	9	1312	5	1	9	69	3	7	1166	7	4	11	1800	
kA114	14	4	4	10	1030	5	1	9	21	3	8	1249	6	2	9	1808	
kA115	16	4	5	9	1257	5	3	9	87	3	7	1201	7	5	12	1811	
kA116	16	4	6	8	1125	6	2	9	49	3	6	1108	8	5	12	1800	
kA117	16	4	5	8	1166	6	2	10	27	3	7	1327	7	4	9	1808	
kA118	16	4	8	8	1457	6	4	9	89	3	6	1079	8	5	13	1805	
kA119	16	4	5	8	1128	6	2	10	70	3	7	1328	7	5	11	1815	
kA120	18	4	6	7	1340	7	4	9	94	3	7	1369	7	5	9	1803	
kA121	14	4	5	8	993	6	2	10	60	3	7	1188	7	3	15	1803	
kA122	14	4	5	7	1147	7	3	10	23	3	6	1116	8	4	11	1801	
kA123	16	3	6	8	1432	6	1	9	61	3	7	1046	7	2	12	843	*
kA124	14	4	5	8	1260	6	4	9	61	3	7	1018	7	3	9	1803	
kA125	14	4	6	8	1302	6	2	10	54	3	6	1255	8	4	14	85	*
kA126	16	4	6	9	1294	5	1	10	86	3	7	1550	7	3	11	1801	
kA127	14	4	5	8	1016	6	1	8	64	3	7	903	7	5	12	1810	
kA128	16	4	6	9	8208	5	1	9	69	-	-	-	-	-	-	-	
kA129	14	4	4	8	1017	6	2	9	34	3	7	1258	7	4	9	1800	
kA150	18	4	5	9	1140	5	1	9	58	3	7	1247	7	2	11	1771	*
kA131	16	5	16	7	8838	7	4	9	44	3	7	1632	7	5	10	1805	
kA132	14	5	5	11	8640	4	1	9	42	3	10	1536	5	3	6	1818	
kA133	14	4	5	9	1114	5	2	9	44	3	8	1340	6	3	11	1807	
kA134	16	4	5	8	840	6	1	10	45	-	-	-	-	-	-	-	
kA135	18	4	6	10	1630	5	1	9	46	3	7	1440	7	3	10	1810	
kA136	14	4	6	8	1217	6	4	9	47	3	7	1156	7	4	11	1800	
kA137	14	5	5	7	824	7	5	9	32	3	7	1170	7	5	10	1807	
kA138	16	4	5	9	1339	5	1	8	14	3	7	1165	7	4	11	1801	
kA139	14	4	6	7	1017	7	5	9	38	3	7	1255	7	3	12	1817	
kA140	14	3	5	9	1355	5	2	8	32	3	6	910	8	3	11	85	*
kA141	16	4	5	9	1407	5	1	9	39	3	7	1253	7	4	12	1802	
kA142	16	4	6	10	1237	5	2	9	13	3	8	1314	6	6	8	1819	
kA143	18	4	6	8	1371	6	2	10	47	3	7	1216	7	4	10	1816	
kA144	14	5	5	7	6475	7	5	9	34	3	7	1114	7	3	9	1800	
kA145	16	4	5	10	1708	5	2	10	223	3	9	1756	5	3	13	1800	
kA146	12	5	5	10	6814	5	1	9	30	3	8	889	6	4	10	1811	
kA147	16	4	5	8	843	6	3	9	33	3	8	1036	6	3	10	1807	
kA148	14	4	5	7	923	7	4	9	28	3	7	1050	7	4	11	1806	
kA149	12	4	5	9	1198	5	1	10	46	3	7	951	7	2	10	1800	
kA150	18	4	5	9	1140	5	1	9	58	3	7	1247	7	2	11	1771	*

Ins	id <sub>p</sub>	matheuristique								PLNE							st
		lb <sub>1</sub>	lb <sub>2</sub>	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps	PL	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps	
kA151	14	5	5	9	5401	5	1	10	69	3	8	1148	6	4	10	1831	
kA152	16	5	5	10	1059	5	1	10	70	3	9	1194	5	2	8	1803	
kA153	16	4	5	9	1284	5	1	9	37	3	8	1040	6	3	10	1804	
kA154	16	4	5	8	1099	6	3	10	47	3	6	1196	8	5	10	338	*
kA155	16	5	5	9	12305	5	1	9	43	3	9	1395	5	1	10	1805	
kA156	14	4	5	8	1084	6	2	10	54	3	7	1200	7	6	9	1803	
kA157	14	4	5	8	1431	6	1	10	43	3	6	1038	8	6	10	996	*
<u>kA158</u>	16	4	5	8	<u>1207</u>	6	1	10	46	3	8	<u>1478</u>	6	3	12	1809	
<u>kA159</u>	18	4	6	8	<u>1118</u>	6	1	10	51	3	8	<u>1408</u>	6	4	8	1813	
kA160	18	4	5	9	1322	5	1	9	64	3	7	1376	7	3	11	1800	
kA161	14	5	5	9	1050	5	2	9	15	-	-	-	-	-	-	-	
kA162	14	4	5	8	821	6	3	9	42	3	6	922	8	4	12	334	*
kA163	18	4	4	8	1468	6	4	9	34	3	7	1336	7	4	11	1803	
kA164	16	4	13	9	8545	5	2	8	44	3	6	1263	8	5	12	1321	*
kA165	14	4	5	7	1268	7	4	10	54	3	6	993	8	4	11	1805	
kA166	16	4	6	10	933	5	2	11	75	3	6	980	8	5	12	1804	
kA167	14	3	4	9	679	5	3	9	14	3	7	1039	7	5	10	1802	
kA168	16	4	5	8	1321	6	1	10	103	3	6	928	8	6	11	1816	
<u>kA169</u>	14	4	5	9	<u>1191</u>	5	1	10	21	3	9	<u>1606</u>	5	3	9	1804	
kA170	16	5	5	10	937	5	1	9	485	3	8	1036	6	4	10	1818	
kA171	14	4	13	9	1580	5	3	8	35	3	8	1321	6	3	10	1803	
kA172	16	4	5	9	1150	5	1	10	35	-	-	-	-	-	-	-	
kA173	16	4	4	8	1586	6	2	9	98	3	6	1236	8	6	11	1800	
kA174	16	5	5	8	800	6	1	10	73	3	7	800	7	3	12	1808	
kA175	16	5	5	9	4327	5	1	10	43	3	7	869	7	3	12	1804	
kA176	14	4	5	8	944	6	2	9	42	3	7	964	7	4	10	1803	
kA177	14	4	4	9	864	5	2	10	47	3	8	1393	6	3	11	1800	
kA178	16	5	6	8	1146	6	1	9	44	3	6	1185	8	7	11	173	*
kA179	14	4	4	12	1004	4	1	9	54	3	5	768	10	5	15	538	*
kA180	12	4	6	10	1020	5	2	9	26	3	8	1266	6	4	10	1804	
kA181	16	4	5	9	1414	5	3	9	44	3	7	1450	7	2	10	1803	
kA182	16	5	5	8	1348	6	1	10	44	3	7	1566	7	4	11	1803	
kA183	16	4	5	9	1254	5	1	10	51	3	8	1205	6	2	9	1805	
<u>kA184</u>	16	5	6	8	<u>1062</u>	6	2	9	28	3	8	<u>1573</u>	6	4	9	1813	
kA185	16	3	5	8	768	6	1	9	53	3	6	879	8	4	13	178	*
kA186	14	4	5	8	991	6	3	9	42	3	7	1216	7	3	11	1813	
kA187	16	5	5	10	1470	5	1	9	57	3	9	1405	5	1	10	1819	
kA188	14	3	5	7	761	7	4	10	37	3	6	1244	8	5	12	1800	
kA189	16	5	5	9	1035	5	1	10	71	3	8	1238	6	2	10	1803	
kA190	18	4	6	8	1083	6	2	9	37	3	9	1545	5	3	11	1803	
kA191	14	4	14	9	1378	5	2	8	40	-	-	-	-	-	-	-	
kA192	14	4	5	8	1118	6	1	10	10	3	6	1177	8	5	13	129	*
<u>kA193</u>	14	5	5	8	<u>861</u>	6	2	9	32	3	8	<u>914</u>	6	2	10	1816	
kA194	16	4	5	10	1065	5	3	8	42	3	9	1113	5	3	10	1800	
kA195	16	4	8	10	1409	5	2	9	45	3	9	1548	5	3	8	1816	
kA196	14	4	4	9	721	5	2	10	47	3	6	982	8	5	13	1800	
kA197	14	4	13	8	1519	6	4	8	53	3	7	1112	7	5	11	1813	
kA198	16	5	5	8	1513	6	4	9	42	3	6	1182	8	3	10	9662	*
kA199	14	4	5	9	1170	5	1	10	62	3	7	1328	7	4	10	1800	



TABLE A.6: Comparaison matheuristique-PLNE sous l'objectif2 : instances à 50 services

Ins	id <sub>p</sub>	matheuristique							PLNE							
		lb <sub>1</sub>	lb <sub>2</sub>	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps	PL	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps
kA000	14	4	4	13	397	4	1	8	46	1	12	56	4	1	12	120
kA001	14	4	4	14	699	3	1	9	63	29	14	141	3	1	6	132
kA002	16	4	6	16	923	4	1	8	48	132	16	381	3	1	5	108
kA003	14	4	5	13	863	4	1	9	42	122	14	275	3	1	7	146
kA004	12	4	4	11	863	5	2	10	38	104	12	176	4	2	7	119
kA005	14	4	5	14	690	4	1	8	35	34	14	181	3	1	8	126
kA006	18	5	6	18	1066	4	1	8	63	154	17	411	2	1	5	109
kA007	14	4	6	14	1158	4	1	7	63	105	14	373	3	1	9	115
kA008	16	4	6	16	994	5	1	7	28	176	16	404	3	2	5	118
kA009	14	4	5	14	1369	3	1	9	56	46	12	194	4	1	7	108
kA010	14	4	4	14	1336	4	1	8	23	30	13	185	3	1	9	143
kA011	16	3	5	16	757	4	1	10	23	69	16	108	3	1	6	109
kA012	14	4	5	14	568	4	1	9	23	47	14	113	3	1	8	138
kA013	16	4	16	16	979	5	2	9	77	32	16	217	3	1	6	115
kA014	12	3	6	12	518	5	1	9	58	41	12	192	4	1	9	139
kA015	14	4	4	14	836	4	1	10	54	58	13	148	3	1	11	113
kA016	14	4	5	12	766	5	2	9	66	62	14	223	3	1	7	126
kA017	16	4	6	16	1283	4	1	8	118	76	15	327	3	1	7	133
kA018	18	4	5	18	1194	3	1	8	79	75	18	292	2	1	5	114
kA019	16	5	5	16	686	3	1	8	70	110	16	247	3	1	6	129
kA020	14	4	5	12	1110	5	2	9	106	163	14	275	3	1	8	119
kA021	12	4	5	11	775	4	1	9	25	61	11	231	4	2	9	115
kA022	16	3	6	16	1239	5	2	8	72	174	15	443	3	1	6	107
kA023	14	4	5	14	809	4	1	9	49	67	14	196	3	1	9	133
kA024	14	5	5	14	752	5	1	9	38	150	14	168	3	1	8	110
kA025	14	4	6	14	1481	5	1	9	32	103	14	447	3	1	7	123
kA026	14	4	5	14	960	4	1	8	98	65	13	319	3	2	9	165
kA027	16	4	6	13	884	4	1	9	38	82	15	149	3	1	7	112
kA028	16	4	6	13	1108	4	1	8	35	90	15	310	3	1	7	114
kA029	14	5	5	12	1111	4	1	7	244	124	13	228	3	1	6	113
kA050	16	4	5	12	1116	4	1	9	68	221	15	474	3	1	6	131
kA031	14	4	6	14	1628	4	1	8	29	97	14	279	3	1	9	115
kA032	16	4	6	16	785	3	1	6	46	32	15	172	3	1	6	122
kA033	16	3	5	16	926	5	1	10	61	53	14	279	3	1	9	130
kA034	16	5	5	13	730	4	1	8	44	39	16	185	3	1	5	130
kA035	14	4	4	12	867	4	1	10	87	51	14	108	3	1	9	116
kA036	16	5	5	16	1253	4	1	10	39	52	15	187	3	1	7	120
kA037	16	4	6	13	857	4	1	9	53	58	16	174	3	1	5	116
kA038	16	4	6	14	394	5	1	10	45	10	15	56	3	1	8	161
kA039	18	4	5	17	986	4	1	9	59	82	15	272	3	1	11	127
kA040	14	4	4	14	840	4	1	9	32	47	14	236	3	2	7	108
kA041	16	3	5	15	793	4	1	7	45	130	14	249	3	2	5	109
kA042	16	3	5	14	970	4	2	10	44	131	13	253	3	2	8	130
kA043	16	5	5	15	1017	4	1	8	70	137	15	205	3	1	8	132
kA044	16	4	6	16	1063	3	1	9	45	188	16	474	3	1	5	108
kA045	14	4	5	14	960	5	1	8	36	42	13	151	3	2	8	119
kA046	14	4	5	14	684	4	1	8	36	71	13	238	3	2	7	123
kA047	16	4	5	16	762	3	1	9	53	102	15	208	3	1	7	117
kA048	14	4	5	14	864	4	1	8	15	80	13	192	3	2	6	112

Ins	id <sub>p</sub>	matheuristique							PLNE							
		lb <sub>1</sub>	lb <sub>2</sub>	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps	PL	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps
kA049	16	4	6	16	1209	3	1	9	45	43	15	203	3	1	6	114
kA050	16	4	5	12	1116	4	1	9	68	221	15	474	3	1	6	131
kA051	14	4	5	14	951	3	1	8	60	31	13	219	3	1	8	131
kA052	16	4	6	16	9201	3	1	9	60	42	14	276	3	1	6	133
kA053	14	4	5	14	700	4	3	8	52	36	14	100	3	1	6	132
kA054	14	4	5	12	633	5	1	8	43	70	13	231	3	1	9	153
kA055	14	3	6	14	640	4	2	8	58	66	14	184	3	1	6	112
kA056	16	4	5	16	1458	4	1	9	106	255	14	452	3	1	9	132
kA057	16	5	5	14	1160	4	1	8	77	113	16	332	3	1	5	113
kA058	18	4	5	18	5118	3	1	9	99	100	18	412	2	1	8	123
kA059	14	3	5	12	552	4	1	8	47	59	14	163	3	1	8	119
kA060	16	3	5	16	1270	3	1	8	29	188	16	427	3	1	8	139
kA061	14	4	5	14	567	4	1	8	21	49	13	125	3	1	9	124
kA062	16	4	6	15	657	4	3	7	30	83	15	343	3	1	5	127
kA063	12	4	4	12	681	4	2	8	32	32	11	56	4	2	8	116
kA064	14	4	5	11	780	5	1	9	40	138	14	329	3	1	7	115
kA065	14	4	5	14	824	4	1	9	43	92	14	338	3	1	6	108
kA066	16	3	5	15	641	4	1	9	85	27	16	222	3	1	6	120
kA067	16	5	6	12	740	4	2	7	125	47	16	246	3	1	6	137
kA068	16	4	5	15	969	4	1	8	100	75	14	146	3	1	7	128
kA069	16	5	6	10	635	5	3	10	117	120	12	252	4	2	7	122
kA070	16	5	5	15	1004	3	2	7	115	48	14	173	3	1	7	124
kA071	14	4	6	14	747	3	1	8	50	149	13	350	3	2	7	113
kA072	14	4	5	14	832	3	1	9	57	39	14	206	3	1	7	143
kA073	16	5	6	12	1198	4	1	9	54	36	16	197	3	1	6	143
kA074	14	4	5	12	818	4	1	9	55	47	14	165	3	2	5	111
kA075	16	5	6	16	1247	3	2	7	63	17	15	269	3	1	6	108
kA076	14	4	6	14	894	4	2	7	55	42	14	282	3	1	6	111
kA077	16	4	6	16	1058	3	1	7	48	145	15	388	3	1	9	123
kA078	18	4	11	17	1714	4	1	8	43	233	17	491	2	1	7	126
kA079	16	4	4	15	883	3	1	9	47	32	16	90	3	1	5	129
kA080	14	4	5	14	925	4	2	9	43	50	14	153	3	1	7	119
kA081	16	3	5	16	858	4	1	9	13	122	14	244	3	1	7	116
kA082	14	4	4	14	747	4	1	9	30	74	13	198	3	1	10	149
kA083	14	4	5	14	1026	4	1	8	37	125	14	275	3	2	6	112
kA084	16	5	5	16	581	4	1	8	98	46	15	116	3	1	6	250
kA085	14	5	5	11	868	5	4	10	47	85	14	303	3	1	6	114
kA086	16	5	5	16	1420	3	1	8	39	229	15	431	3	1	8	111
kA087	14	3	6	14	1027	4	1	9	39	38	14	166	3	1	7	106
kA088	16	5	6	16	815	3	1	9	49	81	13	236	3	2	7	105
kA089	14	4	6	14	1226	4	1	9	44	169	14	307	3	1	8	130
kA090	14	5	6	14	1111	3	1	8	45	132	14	226	3	1	6	113
kA091	16	4	5	11	894	4	1	8	47	115	14	214	3	1	11	117
kA092	12	3	15	12	5290	4	2	7	36	58	12	175	4	1	8	110
kA093	16	5	6	16	1293	4	1	9	56	295	15	457	3	1	6	136
kA094	14	4	5	14	960	5	1	9	43	73	13	289	3	1	6	121
kA095	16	5	6	13	1161	5	2	8	36	164	16	363	3	1	7	124
kA096	16	4	5	13	925	4	1	8	51	92	15	277	3	1	8	117
kA097	16	5	5	16	764	6	3	8	37	119	16	204	3	1	9	116
kA098	18	4	5	18	1027	3	1	9	64	55	15	220	3	1	8	122
kA099	12	3	5	12	617	5	2	9	21	15	12	72	4	1	11	107

Ins	id <sub>p</sub>	matheuristique								PLNE						
		lb <sub>1</sub>	lb <sub>2</sub>	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps	PL	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps
kA100	14	4	6	12	839	5	2	9	188	80	13	168	3	1	9	111
kA101	16	4	5	16	8114	4	1	8	45	79	15	181	3	2	7	116
kA102	14	4	5	13	605	5	1	9	41	61	14	200	3	1	6	118
kA103	18	5	5	12	1250	4	1	9	53	52	16	211	3	1	5	126
kA104	16	4	5	16	1021	3	1	8	31	147	15	228	3	1	6	118
kA105	14	4	4	14	869	4	1	9	36	104	14	232	3	1	7	123
kA106	18	3	5	15	684	3	1	8	39	84	17	236	2	1	6	112
kA107	16	4	5	16	1023	3	1	6	65	198	15	310	3	1	5	117
kA108	14	4	4	14	838	4	1	8	41	39	14	126	3	2	6	113
kA109	14	4	4	14	645	4	2	8	15	44	14	172	3	2	7	126
kA110	14	4	6	14	1047	4	1	8	22	136	12	243	4	1	8	116
kA111	16	5	6	16	9640	3	1	9	37	76	16	288	3	1	6	110
kA112	14	4	4	13	1093	3	1	9	84	50	14	166	3	1	6	109
kA113	14	4	6	14	932	4	1	8	25	113	14	241	3	1	8	120
kA114	14	4	4	14	918	4	1	10	7	48	14	146	3	1	6	114
kA115	16	4	5	16	866	4	1	9	87	45	14	179	3	1	7	121
kA116	16	4	6	15	829	5	2	8	47	32	14	177	3	1	8	119
kA117	16	4	5	14	698	5	2	8	24	178	15	288	3	1	6	125
kA118	16	4	8	16	1347	4	1	9	89	93	16	227	3	1	5	127
kA119	16	4	5	16	1005	3	1	8	72	199	16	374	3	1	7	122
kA120	18	4	6	18	1362	3	2	9	92	171	17	290	2	1	6	107
kA121	14	4	5	14	954	4	2	8	65	148	13	324	3	1	8	133
kA122	14	4	5	14	877	5	2	9	13	177	13	278	3	1	10	126
kA123	16	3	6	16	1107	3	1	9	51	29	14	63	3	2	7	116
kA124	14	4	5	14	1189	3	1	9	53	132	14	280	3	1	7	134
kA125	14	4	6	14	1059	5	2	10	45	121	14	292	3	1	7	120
kA126	16	4	6	16	1213	4	1	8	79	217	15	372	3	1	8	119
kA127	14	4	5	12	1084	4	1	7	53	19	14	117	3	1	6	113
kA128	16	4	6	14	1107	4	1	7	61	152	14	182	3	1	8	116
kA129	14	4	4	14	1008	4	1	7	45	67	14	188	3	1	7	117
kA150	18	4	5	17	1147	4	1	9	50	107	18	180	2	1	5	116
kA131	16	5	16	13	889	5	1	9	48	53	16	207	3	1	7	134
kA132	14	5	5	14	1122	3	1	7	45	79	14	268	3	1	8	109
kA133	14	4	5	14	1006	3	1	8	47	61	14	219	3	1	6	120
kA134	16	4	5	16	744	4	1	10	49	121	15	195	3	1	6	119
kA135	18	4	6	18	1375	4	1	8	49	236	17	392	2	1	7	107
kA136	14	4	6	14	851	4	1	8	51	61	14	341	3	1	7	116
kA137	14	5	5	13	807	4	2	9	36	30	13	155	3	2	7	127
kA138	16	4	5	16	1220	4	1	8	16	142	16	288	3	1	6	124
kA139	14	4	6	14	5995	4	1	8	44	90	14	261	3	1	5	135
kA140	14	3	5	12	920	5	2	9	63	48	14	102	3	2	6	113
kA141	16	4	5	16	956	3	1	8	44	76	15	316	3	1	7	110
kA142	16	4	6	15	7148	5	2	8	17	108	15	331	3	1	6	124
kA143	18	4	6	18	1137	5	2	8	51	145	16	284	3	1	9	133
kA144	14	5	5	12	646	5	2	9	38	107	14	226	3	1	6	108
kA145	16	4	5	16	1315	3	1	6	204	229	14	457	3	2	8	127
kA146	12	5	5	11	575	4	1	9	33	53	12	148	4	1	6	132
kA147	16	4	5	16	809	4	1	8	37	41	16	170	3	1	7	130
kA148	14	4	5	11	752	5	2	8	31	37	12	237	4	1	8	111
kA149	12	4	5	12	639	4	1	9	41	22	12	71	4	2	7	114
kA150	18	4	5	17	1147	4	1	9	50	107	18	180	2	1	5	116

Ins	id <sub>p</sub>	matheuristicque							PLNE							
		lb <sub>1</sub>	lb <sub>2</sub>	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps	PL	#id <sub>p</sub>	dist	avg	min	max	temps
kA151	14	5	5	14	5304	4	1	9	64	85	14	281	3	1	10	123
kA152	16	5	5	16	4378	3	1	9	61	86	15	205	3	1	7	203
kA153	16	4	5	14	894	3	1	8	39	49	15	156	3	1	7	120
kA154	16	4	5	16	873	4	2	9	42	43	15	243	3	1	6	107
kA155	16	5	5	16	7884	4	1	8	39	71	16	211	3	1	6	108
kA156	14	4	5	12	785	4	1	9	49	78	14	398	3	1	7	119
kA157	14	4	5	14	944	4	1	7	41	88	14	162	3	2	9	108
kA158	16	4	5	16	1022	4	1	9	43	94	15	256	3	1	8	120
kA159	18	4	6	18	1260	4	1	8	47	127	17	360	2	1	6	114
kA160	18	4	5	18	975	4	1	10	57	44	17	139	2	1	6	122
kA161	14	5	5	13	974	5	1	9	29	62	14	268	3	1	5	112
kA162	14	4	5	14	2372	3	1	8	20	45	13	169	3	1	6	112
kA163	18	4	4	18	901	4	1	9	64	171	17	296	2	1	6	133
kA164	16	4	13	16	1362	3	1	7	22	100	14	329	3	1	8	125
kA165	14	4	5	12	717	5	1	10	25	84	14	122	3	1	8	107
kA166	16	4	6	16	825	3	1	8	24	83	15	238	3	1	8	128
kA167	14	3	4	14	633	3	1	9	6	138	14	170	3	1	8	124
kA168	16	4	5	16	1204	4	1	8	33	118	15	187	3	1	7	118
kA169	14	4	5	14	1183	4	1	8	60	44	14	251	3	1	7	121
kA170	16	5	5	16	688	4	1	9	493	19	15	118	3	1	8	120
kA171	14	4	13	14	1056	3	1	7	102	4	14	125	3	1	8	136
kA172	16	4	5	14	987	4	1	9	96	62	15	218	3	1	8	184
kA173	16	4	4	16	771	4	1	9	107	79	15	222	3	1	8	119
kA174	16	5	5	14	707	4	1	9	65	41	15	163	3	1	8	132
kA175	16	5	5	16	3676	4	1	8	58	35	14	140	3	1	8	127
kA176	14	4	5	14	8146	4	1	7	43	52	14	255	3	1	8	124
kA177	14	4	4	14	647	4	1	9	63	44	13	253	3	1	7	142
kA178	16	5	6	14	1284	5	1	9	47	167	13	319	3	1	8	109
kA179	14	4	4	13	893	4	1	9	58	44	13	114	3	1	8	121
kA180	12	4	6	11	6167	4	1	8	32	26	12	242	4	1	7	124
kA181	16	4	5	16	1192	4	1	9	49	77	15	400	3	2	6	117
kA182	16	5	5	11	1204	5	1	9	49	164	13	422	3	2	7	115
kA183	16	4	5	16	928	4	1	10	54	185	15	273	3	1	8	119
kA184	16	5	6	16	987	4	1	8	32	267	15	426	3	1	8	116
kA185	16	3	5	14	685	5	1	10	99	72	14	137	3	1	7	112
kA186	14	4	5	14	763	4	1	9	39	77	12	251	4	2	7	115
kA187	16	5	5	14	896	3	1	8	62	162	13	259	3	1	6	133
kA188	14	3	5	14	769	4	1	9	40	96	14	219	3	1	6	122
kA189	16	5	5	14	763	4	1	9	66	0	16	154	3	1	8	124
kA190	18	4	6	18	1057	3	1	8	42	58	17	158	2	1	8	119
kA191	14	4	14	14	918	3	1	8	43	82	14	243	3	1	6	140
kA192	14	4	5	14	1040	3	1	9	9	110	14	255	3	1	7	114
kA193	14	5	5	12	934	5	1	9	37	117	13	224	3	1	8	116
kA194	16	4	5	16	846	5	3	9	31	125	15	339	3	1	6	134
kA195	16	4	8	16	940	4	1	9	41	119	16	194	3	1	7	132
kA196	14	4	4	14	456	4	1	10	35	18	14	103	3	1	8	121
kA197	14	4	13	12	3032	4	1	8	22	85	13	247	3	1	6	120
kA198	16	5	5	16	958	4	1	9	30	105	16	234	3	1	6	115
kA199	14	4	5	14	931	3	1	7	38	87	14	307	3	1	6	118

Minimisation du nombre de personnels actifs sur un horizon étendu

TABLE A.7: Résultat de la minimisation du nombre de personnels sur un horizon étendu

Ins	id <sub>p</sub>	nb <sub>s</sub>	nb <sub>s</sub> /patient			#id <sub>p</sub> /jour			#id <sub>p</sub> /patient			jours travail			jours repos			dist	temps	
			moy	min	max	#id <sub>p</sub>	moy	min	max	moy	min	max	moy	min	max	moy	min			max
kA000	14	398	7	4	13	9	5	3	6	2	1	4	7	2	12	6	2	12	11373	478
kA001	14	387	7	4	14	10	5	3	7	2	1	4	8	2	12	5	2	12	10848	454
kA002	16	399	7	4	14	10	5	3	7	2	1	4	8	1	11	6	3	13	16368	637
kA003	14	383	7	4	12	10	5	4	7	2	1	3	8	2	11	5	3	12	15130	541
kA004	12	407	8	4	14	10	6	5	7	2	1	5	8	2	12	5	2	12	13373	557
kA005	14	391	7	4	13	11	6	5	7	2	1	4	8	3	12	6	2	11	17731	543
kA006	14	402	8	4	13	10	5	4	7	2	1	4	7	3	12	6	2	11	14675	577
kA007	14	402	8	4	13	9	5	4	7	2	1	4	9	6	11	4	3	8	13157	513
kA008	16	425	8	4	14	10	5	5	7	2	1	4	7	3	12	6	2	11	14035	357
kA009	12	423	8	4	14	9	5	4	7	2	1	4	8	5	12	5	2	9	13638	539
kA010	14	404	8	4	13	10	5	4	7	2	1	4	7	2	12	6	2	12	13993	598
kA011	16	426	8	5	14	9	6	5	7	2	1	3	9	6	12	4	2	8	15164	371
kA012	12	430	8	4	14	9	5	5	7	2	2	3	8	3	11	5	3	11	16972	503
kA013	16	412	8	4	14	9	5	4	7	2	1	3	9	4	12	4	2	10	22318	658
kA014	14	406	8	4	12	8	4	3	6	2	1	4	8	2	12	6	2	12	11756	384
kA015	14	406	8	4	12	10	5	5	7	2	1	4	8	4	12	5	2	10	11349	499
kA016	14	408	8	3	14	10	6	4	8	2	1	4	8	6	11	5	3	8	15553	522
kA017	16	398	7	4	14	10	6	5	8	2	1	4	8	2	11	5	3	12	16026	521
kA018	14	389	7	4	12	11	6	4	8	2	1	4	8	2	12	5	2	12	15283	665
kA019	16	411	8	4	14	10	5	5	7	2	2	4	8	5	11	5	3	9	9955	417
kA020	16	411	8	4	14	9	5	5	7	2	1	3	8	5	10	5	4	9	14046	372
kA021	16	406	8	4	14	9	5	4	7	2	1	3	8	4	12	5	2	10	11980	638
kA022	14	397	7	4	13	8	4	4	6	2	1	3	8	2	12	5	2	12	11434	556
kA023	16	406	8	4	14	8	5	4	6	2	1	3	9	3	12	4	2	11	12907	600
kA024	16	411	8	4	14	10	5	4	9	2	1	4	7	2	11	6	3	12	13695	511
kA025	16	407	8	4	14	11	5	4	7	2	1	4	7	2	12	6	2	12	12885	370
kA026	14	403	8	5	14	9	5	5	6	2	2	4	8	3	12	5	2	11	12445	370
kA027	16	409	8	5	14	9	5	4	7	2	1	3	9	5	11	4	3	9	12902	615
kA028	16	406	8	5	14	10	5	5	8	2	2	4	8	1	11	5	3	13	18345	414
kA029	14	403	8	4	13	9	5	3	7	2	1	4	8	2	12	6	2	12	10758	548
kA030	14	403	8	4	13	11	6	5	8	2	1	4	7	2	12	6	2	12	14255	375
kA031	14	432	8	5	14	10	5	4	7	2	1	3	8	4	12	5	2	10	13114	502
kA032	14	385	7	5	11	9	5	4	6	2	1	3	8	2	12	5	2	12	10529	570
kA033	14	407	8	4	14	10	5	4	7	2	1	4	8	2	12	6	2	12	17900	509
kA034	14	407	8	4	14	9	5	4	6	2	2	3	8	6	11	5	3	8	12454	449
kA035	14	392	7	4	14	9	5	4	7	2	1	4	8	3	12	5	2	11	12139	387
kA036	12	423	8	4	14	10	5	4	7	2	1	4	7	2	12	6	2	12	9918	492
kA037	14	397	7	4	13	8	4	3	6	2	1	3	8	5	11	5	3	9	11871	533
kA038	16	399	7	4	14	9	5	5	7	2	1	3	8	3	12	5	2	11	16893	441
kA039	16	403	8	4	14	11	6	5	8	2	1	5	8	2	11	5	3	12	23530	370
kA040	16	418	8	4	14	10	6	6	8	2	2	4	8	2	12	5	2	12	15102	489
kA041	14	390	7	4	11	10	5	4	8	2	2	4	8	5	11	5	3	9	12882	458
kA042	16	417	8	4	14	10	5	5	7	2	1	4	8	2	12	6	2	12	13142	634
kA043	14	410	8	4	12	9	5	4	7	2	1	3	8	4	12	5	2	10	11735	562
kA044	14	403	8	4	14	11	6	5	8	2	1	4	8	5	10	5	4	9	16230	427
kA045	16	414	8	4	14	10	6	6	8	2	1	4	9	6	11	4	3	8	18726	601
kA046	14	399	7	5	13	10	5	4	7	2	2	3	8	2	12	5	2	12	13639	487
kA047	14	398	7	4	14	9	5	4	7	2	1	5	8	3	12	5	2	11	12395	609
kA048	14	405	8	4	12	9	6	5	8	2	1	3	9	6	12	4	2	8	16269	526

Ins	id <sub>p</sub>	nb <sub>s</sub>	nb <sub>s</sub> /patient			#id <sub>p</sub>	#id <sub>p</sub> /jour			#id <sub>p</sub> /patient			jours travail			jours repos			dist	temps
			moy	min	max		moy	min	max	moy	min	max	moy	min	max	moy	min	max		
kA049	14	420	8	5	14	9	5	4	7	2	1	4	8	4	12	5	2	10	12193	376
kA050	14	420	8	5	14	10	6	5	8	2	1	4	9	6	12	5	2	8	16385	381
kA051	14	385	7	5	12	9	5	5	7	2	1	3	8	5	12	5	2	9	15988	452
kA052	14	385	7	5	12	9	5	4	6	2	1	4	7	3	12	6	2	11	15361	645
kA053	12	447	8	4	14	9	5	5	6	2	1	3	8	4	10	5	4	10	11222	547
kA054	16	427	8	4	14	11	6	5	8	2	1	5	8	5	10	5	4	9	18276	371
kA055	14	380	7	4	12	9	5	3	7	2	1	3	8	3	12	6	2	11	14491	493
kA056	16	394	7	4	14	9	5	5	7	2	1	3	8	4	11	5	3	10	18440	482
kA057	16	427	8	4	14	9	6	5	7	2	1	3	9	6	12	4	2	8	16156	457
kA058	12	418	8	5	14	10	5	4	8	2	1	3	7	1	12	6	2	13	10220	436
kA059	14	403	8	5	13	8	4	3	6	2	1	3	8	3	11	5	3	11	11192	526
kA060	18	402	8	3	14	11	6	5	8	2	1	4	7	2	12	6	2	12	15211	686
kA061	16	401	8	4	14	10	5	4	8	2	1	4	8	2	12	5	2	12	15719	372
kA062	14	397	7	4	13	9	5	4	6	2	1	4	8	2	11	5	3	12	11431	390
kA063	14	397	7	4	13	8	5	4	7	2	1	3	9	6	12	4	2	8	11906	677
kA064	14	392	7	4	13	9	5	5	7	2	1	3	8	4	12	5	2	10	19048	596
kA065	16	403	8	4	14	11	6	5	8	2	1	4	8	2	12	5	2	12	15787	622
kA066	16	406	8	5	14	10	5	4	8	2	1	4	8	1	11	6	3	13	14460	490
kA067	16	408	8	5	14	9	5	5	6	2	1	3	8	5	12	5	2	9	13513	411
kA068	16	420	8	4	14	10	5	4	7	2	1	4	7	2	12	6	2	12	19900	501
kA069	14	386	7	4	13	9	5	5	6	2	1	4	8	4	11	5	3	10	21004	484
kA070	14	384	7	4	12	10	5	4	6	2	1	4	7	2	11	6	3	12	10319	618
kA071	16	411	8	4	14	10	5	5	7	2	1	4	8	2	11	5	3	12	25691	498
kA072	14	388	7	4	13	9	5	5	6	2	1	4	8	5	11	5	3	9	11396	632
kA073	16	399	7	4	14	10	6	5	8	2	1	4	8	4	11	5	3	10	16779	550
kA074	14	386	7	5	13	9	5	4	7	2	1	3	8	7	11	5	3	7	13248	374
kA075	16	404	8	4	14	8	5	4	6	2	1	3	9	7	11	4	3	7	13080	371
kA076	14	395	7	4	13	10	6	5	7	2	1	4	8	6	10	5	4	8	14864	504
kA077	14	423	8	4	14	9	5	5	7	2	1	3	8	5	12	5	2	9	14859	611
kA078	16	432	8	4	14	10	6	5	7	2	1	4	8	4	12	5	2	10	14127	371
kA079	16	414	8	4	14	11	6	5	8	2	2	4	8	2	12	5	2	12	17301	374
kA080	12	420	8	4	14	9	5	5	7	2	1	4	8	2	12	5	2	12	9673	420
kA081	16	412	8	4	14	10	6	6	8	2	1	4	9	4	12	5	2	10	14265	393
kA082	14	410	8	3	14	9	5	4	7	2	1	3	8	7	11	5	3	7	12368	580
kA083	12	437	8	3	14	10	5	5	8	2	2	4	8	1	11	6	3	13	10564	357
kA084	16	407	8	4	14	9	5	5	7	2	1	3	8	4	12	5	2	10	15312	552
kA085	16	404	8	4	14	10	6	5	8	2	1	4	9	4	11	5	3	10	19762	376
kA086	14	372	7	5	13	10	5	4	6	2	1	3	7	2	12	6	2	12	10536	375
kA087	14	372	7	5	13	10	5	4	7	2	1	4	7	1	12	6	2	13	14719	612
kA088	16	414	8	3	14	10	5	4	7	2	1	4	7	2	11	6	3	12	14512	359
kA089	14	398	7	5	13	10	5	5	6	2	1	4	8	3	12	5	2	11	13728	436
kA090	14	398	7	5	13	8	5	4	6	2	1	3	8	7	11	5	3	7	9833	638
kA091	14	407	8	4	14	8	5	4	6	2	1	3	8	4	12	5	2	10	13284	578
kA092	16	417	8	5	14	10	5	4	7	2	1	4	7	1	11	6	3	13	14495	617
kA093	14	411	8	5	12	10	6	4	8	2	1	4	8	5	11	5	3	9	14408	566
kA094	14	384	7	4	13	10	5	4	7	2	1	5	8	4	12	5	2	10	11269	372
kA095	14	408	8	4	13	9	5	4	6	2	1	3	7	3	12	6	2	11	12260	565
kA096	14	401	8	4	13	9	5	3	7	2	1	4	8	2	12	5	2	12	10015	632
kA097	16	414	8	4	14	9	6	5	7	2	1	4	9	6	12	4	2	8	18916	560
kA098	16	414	8	4	14	10	6	5	8	2	1	4	8	2	11	5	3	12	16090	370
kA099	16	408	8	5	14	11	6	5	7	2	1	4	7	1	12	6	2	13	16394	635
kA100	16	408	8	5	14	9	5	4	7	2	1	3	9	5	11	5	3	9	15706	641

Ins	id <sub>p</sub>	nb <sub>s</sub>	nb <sub>s</sub> /patient			#id <sub>p</sub>	#id <sub>p</sub> /jour			#id <sub>p</sub> /patient	jours travail			jours repos			dist	temps		
			moy	min	max		moy	min	max		moy	min	max	moy	min	max				
kA101	16	408	8	5	14	9	5	4	7	2	1	3	8	4	10	5	4	10	15207	454
kA102	16	413	8	5	14	11	6	5	8	2	1	4	8	2	11	5	3	12	15786	372
kA103	14	403	8	5	13	9	5	5	7	2	1	3	8	4	12	5	2	10	14140	374
kA104	18	406	8	4	14	10	5	5	7	2	1	4	7	2	12	6	2	12	14199	374
kA105	14	409	8	5	13	10	5	4	7	2	1	4	8	2	11	5	3	12	13819	617
kA106	16	406	8	4	14	10	6	5	7	2	1	4	8	4	12	5	2	10	12578	372
kA107	14	394	7	4	12	8	4	3	6	2	1	3	8	3	12	5	2	11	13921	508
kA108	14	417	8	4	12	9	5	4	8	2	1	4	8	3	11	5	3	11	14265	370
kA109	16	424	8	4	14	9	5	5	8	2	1	4	8	2	12	5	2	12	20540	373
kA110	14	402	8	4	14	10	5	5	7	2	1	4	8	2	10	5	4	12	13681	351



Minimisation de la distance sur un horizon étendu

TABLE A.8: Résultat de la minimisation de la distance sur un horizon étendu

Ins	id <sub>p</sub>	nb <sub>s</sub>	nb <sub>s</sub> /patient			#id <sub>p</sub> /jour			#id <sub>p</sub> /patient			jours travail			jours repos			dist	temps	
			moy	min	max	#id <sub>p</sub>	moy	min	max	moy	min	max	moy	min	max	moy	min			max
kA000	14	398	7	4	13	11	5	5	7	2	2	5	7	1	11	6	3	13	7133	287
kA001	14	387	7	4	14	13	5	3	8	3	2	6	6	3	10	7	4	11	8215	547
kA002	16	399	7	4	14	14	6	3	9	3	2	4	6	1	11	7	3	13	12560	409
kA003	14	383	7	4	12	12	6	4	7	3	2	5	7	2	10	6	4	12	26028	593
kA004	12	407	8	4	14	12	6	5	7	3	1	5	7	1	11	6	3	13	10650	626
kA005	14	391	7	4	13	13	6	5	8	3	2	5	7	1	10	6	4	13	14270	393
kA006	14	402	8	4	13	12	5	4	7	3	1	5	6	2	10	7	4	12	11882	440
kA007	14	402	8	4	13	13	6	5	8	3	2	5	6	2	10	7	4	12	8972	418
kA008	16	425	8	4	14	15	6	5	9	3	1	5	6	2	11	7	3	12	9512	573
kA009	12	423	8	4	14	11	6	4	8	3	1	4	7	2	12	6	2	12	10182	283
kA010	14	404	8	4	13	13	6	4	8	3	2	5	6	2	11	7	3	12	10442	537
kA011	16	426	8	5	14	15	7	6	9	3	1	6	6	2	12	7	2	12	16784	572
kA012	12	430	8	4	14	11	5	5	7	2	2	4	7	5	10	6	4	9	14298	136
kA013	16	412	8	4	14	12	6	4	8	3	2	5	7	3	10	6	4	11	13583	633
kA014	14	406	8	4	12	10	5	4	7	2	1	5	7	4	10	6	4	10	10448	324
kA015	14	406	8	4	12	11	5	5	7	2	2	4	7	3	10	6	4	11	8887	400
kA016	14	408	8	3	14	13	6	4	9	3	2	6	7	1	11	7	3	13	14667	430
kA017	16	398	7	4	14	13	6	6	8	3	1	5	6	3	11	7	3	11	13274	524
kA018	14	389	7	4	12	13	6	4	8	3	1	5	7	2	12	6	2	12	10367	425
kA019	16	411	8	4	14	15	6	5	8	3	1	5	6	2	11	7	3	12	6885	449
kA020	16	411	8	4	14	13	6	5	8	3	2	5	6	2	11	7	3	12	12745	590
kA021	16	406	8	4	14	14	6	4	8	3	1	5	6	1	12	7	2	13	9208	357
kA022	14	397	7	4	13	12	5	4	8	3	1	5	6	3	10	7	4	11	8313	199
kA023	16	406	8	4	14	11	5	4	7	3	1	5	7	4	12	6	2	10	9659	517
kA024	16	411	8	4	14	13	5	4	9	2	2	5	6	2	12	7	2	12	11485	497
kA025	16	407	8	4	14	13	6	5	7	3	2	5	6	2	11	7	3	12	7957	604
kA026	14	403	8	5	14	13	5	5	7	3	2	6	6	3	10	7	4	11	10496	292
kA027	16	409	8	5	14	13	6	4	9	3	1	5	6	2	12	7	2	12	10431	276
kA028	16	406	8	5	14	15	7	5	9	3	2	6	6	2	11	7	3	12	13765	404
kA029	14	403	8	4	13	12	5	3	8	3	2	5	6	1	10	7	4	13	8671	260
kA030	14	403	8	4	13	14	6	5	9	3	1	6	6	2	10	7	4	12	10624	504
kA031	14	432	8	5	14	10	6	4	8	2	1	4	8	5	12	5	2	9	8766	421
kA032	14	385	7	5	11	12	5	4	7	3	1	5	6	2	11	7	3	12	8865	320
kA033	14	407	8	4	14	14	5	4	7	3	2	5	5	2	11	8	3	12	8627	449
kA034	14	407	8	4	14	11	5	5	7	2	2	4	7	2	12	6	2	12	8397	371
kA035	14	392	7	4	14	13	6	5	9	2	2	4	6	1	12	7	2	13	9593	343
kA036	12	423	8	4	14	12	5	4	7	3	1	5	6	3	12	7	2	11	8639	433
kA037	14	397	7	4	13	12	4	3	7	3	2	5	5	1	11	8	3	13	9816	352
kA038	16	399	7	4	14	14	6	5	8	3	2	5	6	1	10	7	4	13	13872	351
kA039	16	403	8	4	14	13	6	5	9	3	1	5	7	2	11	6	3	12	19847	607
kA040	16	418	8	4	14	14	6	6	9	3	2	5	6	2	12	7	2	12	17529	359
kA041	14	390	7	4	11	13	6	5	8	3	1	5	6	2	10	7	4	12	11862	380
kA042	16	417	8	4	14	14	6	5	8	3	2	6	6	1	11	7	3	13	10061	350
kA043	14	410	8	4	12	11	5	4	7	2	2	4	7	1	12	6	2	13	9412	433
kA044	14	403	8	4	14	13	6	5	8	3	2	5	7	4	11	6	3	10	18198	187
kA045	16	414	8	4	14	14	6	6	9	3	2	5	6	1	10	7	4	13	18137	555
kA046	14	399	7	5	13	12	6	5	8	2	2	5	7	2	10	6	4	12	10171	237
kA047	14	398	7	4	14	12	5	4	8	3	2	6	6	2	9	7	5	12	9748	353
kA048	14	405	8	4	12	12	6	5	8	3	2	5	7	3	12	6	2	11	12915	287
kA049	14	420	8	5	14	11	5	4	7	3	1	5	7	3	11	6	3	11	10684	652

Ins	id <sub>p</sub>	nb <sub>s</sub>	nb <sub>s</sub> /patient			#id <sub>p</sub>	#id <sub>p</sub> /jour			#id <sub>p</sub> /patient			jours travail			jours repos			dist	temps
			moy	min	max		moy	min	max	moy	min	max	moy	min	max	moy	min	max		
kA050	14	420	8	5	14	12	6	5	8	3	2	4	7	4	12	6	2	10	12683	346
kA051	14	385	7	5	12	14	6	5	8	3	2	5	6	1	12	7	2	13	13188	512
kA052	14	385	7	5	12	11	5	5	8	2	2	5	7	4	11	6	3	10	12114	409
kA053	12	447	8	4	14	11	5	5	7	3	2	4	7	2	11	6	3	12	9493	437
kA054	16	427	8	4	14	15	7	6	10	3	1	5	6	2	11	7	3	12	16070	403
kA055	14	380	7	4	12	12	5	3	8	3	2	5	6	1	10	7	4	13	12169	223
kA056	16	394	7	4	14	12	6	5	8	2	1	4	7	2	12	6	2	12	13943	321
kA057	16	427	8	4	14	13	6	5	7	3	1	5	6	4	10	7	4	10	18445	366
kA058	12	418	8	5	14	12	5	4	8	2	1	4	6	1	12	7	2	13	8684	249
kA059	14	403	8	5	13	11	5	4	6	3	2	4	6	1	11	7	3	13	9008	266
kA060	18	402	8	3	14	14	6	5	9	3	2	5	6	2	10	7	4	12	10198	580
kA061	16	401	8	4	14	13	6	4	7	2	2	4	6	2	10	7	4	12	12861	362
kA062	14	397	7	4	13	13	5	4	7	3	2	5	6	2	10	7	4	12	10293	258
kA063	14	397	7	4	13	12	6	5	8	2	1	5	7	2	12	6	2	12	9613	373
kA064	14	392	7	4	13	10	5	5	7	2	1	4	7	5	11	6	3	9	16024	222
kA065	16	403	8	4	14	15	6	5	10	3	2	5	6	2	12	7	2	12	16088	504
kA066	16	406	8	5	14	11	5	4	8	2	1	4	7	2	11	6	3	12	9258	546
kA067	16	408	8	5	14	14	5	5	7	3	2	5	5	2	11	8	3	12	11483	398
kA068	16	420	8	4	14	13	5	4	7	3	1	6	6	2	10	7	4	12	13670	390
kA069	14	386	7	4	13	13	5	5	7	3	1	6	6	2	11	8	3	12	9840	166
kA070	14	384	7	4	12	13	5	4	7	3	2	5	6	3	9	7	5	11	8439	201
kA071	16	411	8	4	14	12	6	5	8	3	2	5	7	3	12	6	2	11	11976	440
kA072	14	388	7	4	13	13	5	5	7	3	1	6	6	2	10	7	4	12	9476	342
kA073	16	399	7	4	14	13	6	5	8	3	2	4	6	2	9	7	5	12	8623	506
kA074	14	386	7	5	13	14	6	5	7	3	1	5	6	1	10	7	4	13	12624	645
kA075	16	404	8	4	14	14	6	5	8	3	2	5	6	2	9	8	5	12	13765	565
kA076	14	395	7	4	13	13	6	5	7	3	1	5	6	4	12	7	2	10	11272	274
kA077	14	423	8	4	14	12	6	5	8	3	2	4	7	1	11	7	3	13	9417	308
kA078	16	432	8	4	14	15	6	5	9	3	2	6	6	2	10	7	4	12	11322	455
kA079	16	414	8	4	14	14	7	5	9	3	2	5	7	2	10	6	4	12	15641	511
kA080	12	420	8	4	14	10	6	5	8	2	1	4	8	7	10	5	4	7	25972	431
kA081	16	412	8	4	14	13	7	6	9	2	1	5	7	2	12	6	2	12	9885	499
kA082	14	410	8	3	14	12	6	5	7	3	2	4	7	2	10	7	4	12	11556	477
kA083	12	437	8	3	14	11	6	4	8	2	2	4	7	4	12	6	2	10	7886	188
kA084	16	407	8	4	14	15	6	5	7	3	1	5	5	1	9	8	5	13	8940	485
kA085	16	404	8	4	14	14	6	5	9	3	2	5	6	2	12	7	2	12	11333	523
kA086	14	372	7	5	13	13	5	4	6	3	2	5	5	2	10	8	4	12	10039	471
kA087	14	372	7	5	13	13	6	5	7	3	2	5	6	2	10	7	4	12	13781	235
kA088	16	414	8	3	14	15	6	4	7	3	2	5	5	2	11	8	3	12	11980	221
kA089	14	398	7	5	13	13	5	5	7	3	2	5	6	2	10	7	4	12	11803	379
kA090	14	398	7	5	13	11	5	4	7	2	1	4	7	1	11	6	3	13	7512	247
kA091	14	407	8	4	14	12	5	4	6	3	2	4	6	2	10	7	4	12	10585	275
kA092	16	417	8	5	14	14	6	4	10	3	2	5	6	2	12	7	2	12	12001	275
kA093	14	411	8	5	12	13	6	4	8	3	2	5	6	1	11	7	3	13	11816	324
kA094	14	384	7	4	13	12	6	5	9	3	1	6	7	3	11	6	3	11	8712	388
kA095	14	408	8	4	13	13	5	4	7	3	1	6	5	2	10	8	4	12	10181	303
kA096	14	401	8	4	13	13	5	4	8	3	2	5	6	1	11	7	3	13	7319	303
kA097	16	414	8	4	14	15	6	5	9	3	1	6	5	2	12	8	2	12	15347	457
kA098	16	414	8	4	14	16	6	4	8	3	2	6	5	1	9	8	5	13	12312	403
kA099	16	408	8	5	14	13	6	5	8	3	1	5	6	2	12	7	2	12	14157	458
kA100	16	408	8	5	14	12	6	5	8	2	1	4	7	2	12	6	2	12	12128	333
kA101	16	408	8	5	14	14	6	5	9	3	2	5	6	1	12	7	2	13	10629	434

Ins	id <sub>p</sub>	nb <sub>s</sub>	nb <sub>s</sub> /patient			#id <sub>p</sub> /jour			#id <sub>p</sub> /patient			jours travail			jours repos			dist	temps	
			moy	min	max	#id <sub>p</sub>	moy	min	max	moy	min	max	moy	min	max	moy	min			max
kA102	16	413	8	5	14	15	6	5	8	3	2	7	6	2	11	7	3	12	18250	560
kA103	14	403	8	5	13	13	6	5	8	3	2	4	6	2	12	7	2	12	19223	391
kA104	18	406	8	4	14	13	6	5	9	2	1	4	7	1	10	7	4	13	11368	316
kA105	14	409	8	5	13	12	5	4	7	3	2	5	6	2	12	7	2	12	12081	293
kA106	16	406	8	4	14	15	6	5	8	3	2	5	6	1	12	7	2	13	8724	495
kA107	14	394	7	4	12	12	4	3	6	2	1	5	5	1	11	8	3	13	9498	301
kA108	14	417	8	4	12	11	5	4	8	2	2	4	7	4	11	6	3	10	10010	513
kA109	16	424	8	4	14	13	5	5	8	3	2	5	6	1	10	7	4	13	13651	352
kA110	14	402	8	4	14	13	5	4	7	3	2	6	6	3	10	7	4	11	10857	368

Comparaison des résultats obtenus avec les deux objectifs

TABLE A.9: Comparaison des résultats obtenus avec les deux objectifs

Ins	min nombre de personnels actifs								min distance								différences entre les deux	
	#id <sub>p</sub> /jour				#id <sub>p</sub> /patient				#id <sub>p</sub> /jour				#id <sub>p</sub> /patient				dist <sup>1</sup> - dist <sup>2</sup>	#id <sub>p</sub> <sup>2</sup> - #id <sub>p</sub> <sup>1</sup>
	#id <sub>p</sub> <sup>1</sup>	moy	min	max	moy	min	max	dist <sup>1</sup>	#id <sub>p</sub> <sup>2</sup>	moy	min	max	moy	min	max	dist <sup>2</sup>		
kA000	9	5	3	6	2	1	4	11373	11	5	5	7	2	2	5	7133	4240	2
kA001	10	5	3	7	2	1	4	10848	13	5	3	8	3	2	6	8215	2633	3
kA002	10	5	3	7	2	1	4	16368	14	6	3	9	3	2	4	12560	3808	4
<u>kA003</u>	10	5	4	7	2	1	3	15130	12	6	4	7	3	2	5	26028	-10898	2
kA004	10	6	5	7	2	1	5	13373	12	6	5	7	3	1	5	10650	2723	2
kA005	11	6	5	7	2	1	4	17731	13	6	5	8	3	2	5	14270	3461	2
kA006	10	5	4	7	2	1	4	14675	12	5	4	7	3	1	5	11882	2793	2
kA007	9	5	4	7	2	1	4	13157	13	6	5	8	3	2	5	8972	4185	4
kA008	10	5	5	7	2	1	4	14035	15	6	5	9	3	1	5	9512	4523	5
kA009	9	5	4	7	2	1	4	13638	11	6	4	8	3	1	4	10182	3456	2
kA010	10	5	4	7	2	1	4	13993	13	6	4	8	3	2	5	10442	3551	3
<u>kA011</u>	9	6	5	7	2	1	3	15164	15	7	6	9	3	1	6	16784	-1620	6
kA012	9	5	5	7	2	2	3	16972	11	5	5	7	2	2	4	14298	2674	2
kA013	9	5	4	7	2	1	3	22318	12	6	4	8	3	2	5	13583	8735	3
kA014	8	4	3	6	2	1	4	11756	10	5	4	7	2	1	5	10448	1308	2
kA015	10	5	5	7	2	1	4	11349	11	5	5	7	2	2	4	8887	2462	1
kA016	10	6	4	8	2	1	4	15553	13	6	4	9	3	2	6	14667	886	3
kA017	10	6	5	8	2	1	4	16026	13	6	6	8	3	1	5	13274	2752	3
kA018	11	6	4	8	2	1	4	15283	13	6	4	8	3	1	5	10367	4916	2
kA019	10	5	5	7	2	2	4	9955	15	6	5	8	3	1	5	6885	3070	5
kA020	9	5	5	7	2	1	3	14046	13	6	5	8	3	2	5	12745	1301	4
kA021	9	5	4	7	2	1	3	11980	14	6	4	8	3	1	5	9208	2772	5
kA022	8	4	4	6	2	1	3	11434	12	5	4	8	3	1	5	8313	3121	4
kA023	8	5	4	6	2	1	3	12907	11	5	4	7	3	1	5	9659	3248	3
kA024	10	5	4	9	2	1	4	13695	13	5	4	9	2	2	5	11485	2210	3
kA025	11	5	4	7	2	1	4	12885	13	6	5	7	3	2	5	7957	4928	2
kA026	9	5	5	6	2	2	4	12445	13	5	5	7	3	2	6	10496	1949	4
kA027	9	5	4	7	2	1	3	12902	13	6	4	9	3	1	5	10431	2471	4
kA028	10	5	5	8	2	2	4	18345	15	7	5	9	3	2	6	13765	4580	5
kA029	9	5	3	7	2	1	4	10758	12	5	3	8	3	2	5	8671	2087	3
kA030	11	6	5	8	2	1	4	14255	14	6	5	9	3	1	6	10624	3631	3
kA031	10	5	4	7	2	1	3	13114	10	6	4	8	2	1	4	8766	4348	0
kA032	9	5	4	6	2	1	3	10529	12	5	4	7	3	1	5	8865	1664	3
kA033	10	5	4	7	2	1	4	17900	14	5	4	7	3	2	5	8627	9273	4
kA034	9	5	4	6	2	2	3	12454	11	5	5	7	2	2	4	8397	4057	2
kA035	9	5	4	7	2	1	4	12139	13	6	5	9	2	2	4	9593	2546	4
kA036	10	5	4	7	2	1	4	9918	12	5	4	7	3	1	5	8639	1279	2
kA037	8	4	3	6	2	1	3	11871	12	4	3	7	3	2	5	9816	2055	4
kA038	9	5	5	7	2	1	3	16893	14	6	5	8	3	2	5	13872	3021	5
kA039	11	6	5	8	2	1	5	23530	13	6	5	9	3	1	5	19847	3683	2
<u>kA040</u>	10	6	6	8	2	2	4	15102	14	6	6	9	3	2	5	17529	-2427	4
kA041	10	5	4	8	2	2	4	12882	13	6	5	8	3	1	5	11862	1020	3
kA042	10	5	5	7	2	1	4	13142	14	6	5	8	3	2	6	10061	3081	4
kA043	9	5	4	7	2	1	3	11735	11	5	4	7	2	2	4	9412	2323	2
<u>kA044</u>	11	6	5	8	2	1	4	16230	13	6	5	8	3	2	5	18198	-1968	2
kA045	10	6	6	8	2	1	4	18726	14	6	6	9	3	2	5	18137	589	4
kA046	10	5	4	7	2	2	3	13639	12	6	5	8	2	2	5	10171	3468	2
kA047	9	5	4	7	2	1	5	12395	12	5	4	8	3	2	6	9748	2647	3

Ins	min nombre de personnels actifs								min distance								différences entre les deux		
	#id <sub>p</sub> /jour				#id <sub>p</sub> /patient				#id <sub>p</sub> /jour				#id <sub>p</sub> /patient				dist <sup>1</sup> - dist <sup>2</sup>	#id <sub>p</sub> <sup>2</sup> - #id <sub>p</sub> <sup>1</sup>	
	#id <sub>p</sub> <sup>1</sup>	moy	min	max	moy	min	max	dist <sup>1</sup>	#id <sub>p</sub> <sup>2</sup>	moy	min	max	moy	min	max	dist <sup>2</sup>			
kA048	9	6	5	8	2	1	3	16269	12	6	5	8	3	2	5	12915	3354	3	
kA049	9	5	4	7	2	1	4	12193	11	5	4	7	3	1	5	10684	1509	2	
kA050	10	6	5	8	2	1	4	16385	12	6	5	8	3	2	4	12683	3197	2	
kA051	9	5	5	7	2	1	3	15988	14	6	5	8	3	2	5	13188	3874	5	
kA052	9	5	4	6	2	1	4	15361	11	5	5	8	2	2	5	12114	5868	2	
kA053	9	5	5	6	2	1	3	11222	11	5	5	7	3	2	4	9493	-4848	2	
kA054	11	6	5	8	2	1	5	18276	15	7	6	10	3	1	5	16070	6107	4	
kA055	9	5	3	7	2	1	3	14491	12	5	3	8	3	2	5	12169	548	3	
kA056	9	5	5	7	2	1	3	18440	12	6	5	8	2	1	4	13943	-5	3	
kA057	9	6	5	7	2	1	3	16156	13	6	5	7	3	1	5	18445	7472	4	
kA058	10	5	4	8	2	1	3	10220	12	5	4	8	2	1	4	8684	1212	2	
kA059	8	4	3	6	2	1	3	11192	11	5	4	6	3	2	4	9008	994	3	
kA060	11	6	5	8	2	1	4	15211	14	6	5	9	3	2	5	10198	2350	3	
kA061	10	5	4	8	2	1	4	15719	13	6	4	7	2	2	4	12861	5426	3	
kA062	9	5	4	6	2	1	4	11431	13	5	4	7	3	2	5	10293	1818	4	
kA063	8	5	4	7	2	1	3	11906	12	6	5	8	2	1	5	9613	-4118	4	
kA064	9	5	5	7	2	1	3	19048	10	5	5	7	2	1	4	16024	2960	1	
kA065	11	6	5	8	2	1	4	15787	15	6	5	10	3	2	5	16088	6529	4	
kA066	10	5	4	8	2	1	4	14460	11	5	4	8	2	1	4	9258	2977	1	
kA067	9	5	5	6	2	1	3	13513	14	5	5	7	3	2	5	11483	-157	5	
kA068	10	5	4	7	2	1	4	19900	13	5	4	7	3	1	6	13670	10060	3	
kA069	9	5	5	6	2	1	4	21004	13	5	5	7	3	1	6	9840	12565	4	
kA070	10	5	4	6	2	1	4	10319	13	5	4	7	3	2	5	8439	-1657	3	
kA071	10	5	5	7	2	1	4	25691	12	6	5	8	3	2	5	11976	16215	2	
kA072	9	5	5	6	2	1	4	11396	13	5	5	7	3	1	6	9476	2773	4	
kA073	10	6	5	8	2	1	4	16779	13	6	5	8	3	2	4	8623	4155	3	
kA074	9	5	4	7	2	1	3	13248	14	6	5	7	3	1	5	12624	-517	5	
kA075	8	5	4	6	2	1	3	13080	14	6	5	8	3	2	5	13765	1808	6	
kA076	10	6	5	7	2	1	4	14864	13	6	5	7	3	1	5	11272	5447	3	
kA077	9	5	5	7	2	1	3	14859	12	6	5	8	3	2	4	9417	3537	3	
kA078	10	6	5	7	2	1	4	14127	15	6	5	9	3	2	6	11322	-1514	5	
kA079	11	6	5	8	2	2	4	17301	14	7	5	9	3	2	5	15641	-8671	3	
kA080	9	5	5	7	2	1	4	9673	10	6	5	8	2	1	4	25972	-212	1	
kA081	10	6	6	8	2	1	4	14265	13	7	6	9	2	1	5	9885	2709	3	
kA082	9	5	4	7	2	1	3	12368	12	6	5	7	3	2	4	11556	4482	3	
kA083	10	5	5	8	2	2	4	10564	11	6	4	8	2	2	4	7886	1624	1	
kA084	9	5	5	7	2	1	3	15312	15	6	5	7	3	1	5	8940	3979	6	
kA085	10	6	5	8	2	1	4	19762	14	6	5	9	3	2	5	11333	9723	4	
kA086	10	5	4	6	2	1	3	10536	13	5	4	6	3	2	5	10039	-3245	3	
kA087	10	5	4	7	2	1	4	14719	13	6	5	7	3	2	5	13781	2739	3	
kA088	10	5	4	7	2	1	4	14512	15	6	4	7	3	2	5	11980	2709	5	
kA089	10	5	5	6	2	1	4	13728	13	5	5	7	3	2	5	11803	6216	3	
kA090	8	5	4	6	2	1	3	9833	11	5	4	7	2	1	4	7512	-752	3	
kA091	8	5	4	6	2	1	3	13284	12	5	4	6	3	2	4	10585	1283	4	
kA092	10	5	4	7	2	1	4	14495	14	6	4	10	3	2	5	12001	2679	4	
kA093	10	6	4	8	2	1	4	14408	13	6	4	8	3	2	5	11816	5696	3	
kA094	10	5	4	7	2	1	5	11269	12	6	5	9	3	1	6	8712	1088	2	
kA095	9	5	4	6	2	1	3	12260	13	5	4	7	3	1	6	10181	4941	4	
kA096	9	5	3	7	2	1	4	10015	13	5	4	8	3	2	5	7319	-5332	4	
kA097	9	6	5	7	2	1	4	18916	15	6	5	9	3	1	6	15347	6604	6	

Ins	min nombre de personnels actifs							min distance							différences entre les deux			
	#id <sub>p</sub> <sup>1</sup>	#id <sub>p</sub> /jour			#id <sub>p</sub> /patient			dist <sup>1</sup>	#id <sub>p</sub> <sup>2</sup>	#id <sub>p</sub> /jour			#id <sub>p</sub> /patient			dist <sup>1</sup> - dist <sup>2</sup>	#id <sub>p</sub> <sup>2</sup> - #id <sub>p</sub> <sup>1</sup>	
		moy	min	max	moy	min	max			moy	min	max	moy	min	max			dist <sup>2</sup>
kA098	10	6	5	8	2	1	4	16090	16	6	4	8	3	2	6	12312	1933	6
kA099	11	6	5	7	2	1	4	16394	13	6	5	8	3	1	5	14157	4266	2
kA100	9	5	4	7	2	1	3	15706	12	6	5	8	2	1	4	12128	5077	3
kA101	9	5	4	7	2	1	3	15207	14	6	5	9	3	2	5	10629	-3043	5
kA102	11	6	5	8	2	1	4	15786	15	6	5	8	3	2	7	18250	-3437	4
kA103	9	5	5	7	2	1	3	14140	13	6	5	8	3	2	4	19223	2772	4
kA104	10	5	5	7	2	1	4	14199	13	6	5	9	2	1	4	11368	2118	3
kA105	10	5	4	7	2	1	4	13819	12	5	4	7	3	2	5	12081	5095	2
kA106	10	6	5	7	2	1	4	12578	15	6	5	8	3	2	5	8724	3080	5
kA107	8	4	3	6	2	1	3	13921	12	4	3	6	2	1	5	9498	3911	4
kA108	9	5	4	8	2	1	4	14265	11	5	4	8	2	2	4	10010	614	2
kA109	9	5	5	8	2	1	4	20540	13	5	5	8	3	2	5	13651	9683	4
kA110	10	5	5	7	2	1	4	13681	13	5	4	7	3	2	6	10857	13681	3



# Bibliographie

- [Aggarwal, 1982] Aggarwal, S. C. (1982). A focussed review of scheduling in services. *European Journal of Operational Research*, 9(2) :114–121. (Cité en page 14.)
- [Akcali et al., 2006] Akcali, E., Côté, M. J., and Lin, C. (2006). A network flow approach to optimizing hospital bed capacity decisions. *Health Care Management Science*, 9(4) :391–404. (Cité en page 2.)
- [Akjiratikarl et al., 2007] Akjiratikarl, C., Yenradee, P., and Drake, P. R. (2007). PSO-based algorithm for home care worker scheduling in the uk. *Computers & Industrial Engineering*, 53(4) :559–583. (Cité en pages 24, 27 et 28.)
- [Akkerman and Knip, 2004] Akkerman, R. and Knip, M. (2004). Reallocation of beds to reduce waiting time for cardiac surgery. *Health Care Management Science*, 7(2) :119–126. (Cité en page 2.)
- [Allaoua et al., 2012] Allaoua, H., Borne, S., Létocart, L., and Wolfler-Calvo, R. (2012). Combining routing and rostering for the home health care problem. In *ORAHS 2012, Enschede, Pays-Bas*. (Cité en page 112.)
- [Allaoua et al., 2013a] Allaoua, H., Borne, S., Létocart, L., and Wolfler-Calvo, R. (2013a). Combining routing and rostering for the home health care problem. In *TRISTAN 2013, San Pedro de Atacama, Chile*. (Cité en page 112.)
- [Allaoua et al., 2013b] Allaoua, H., Borne, S., Létocart, L., and Wolfler-Calvo, R. (2013b). A matheuristic approach for solving a home health care problem. In *INOC 2013, Ténérife, Espagne*, number 41, pages 471–478. (Cité en page 112.)
- [Allaoua et al., 2014] Allaoua, H., Borne, S., Létocart, L., and Wolfler-Calvo, R. (2014). Planification et routage des personnels

- pour l'hospitalisation à domicile. In *ROADEF 2014, Bordeaux*. (Cité en page 112.)
- [Anbil et al., 1991] Anbil, R., Gelman, E., Patty, B., and Tanga, R. (1991). Recent advances in crew-pairing optimization at american airlines. *Interfaces*, 21(1) :62–74. (Cité en page 15.)
- [Applegate, 2006] Applegate, D. L. (2006). *The traveling salesman problem : a computational study*. Princeton University Press. (Cité en page 17.)
- [Archetti et al., 2006] Archetti, C., Speranza, M. G., and Hertz, A. (2006). A tabu search algorithm for the split delivery vehicle routing problem. *Transportation Science*, 40(1) :64–73. (Cité en page 18.)
- [Augerat et al., 1995] Augerat, P., Belenguer, J., Benavent, E., Corberán, A., Naddef, D., and Rinaldi, G. (1995). Computational results with a branch and cut code for the capacitated vehicle routing problem. *Rapport de recherche*, 1. (Cité en page 18.)
- [Ausiello et al., 2006] Ausiello, G., Escoffier, B., Monnot, J., and Paschos, V. T. (2006). Reoptimization of minimum and maximum traveling salesman's tours. In *Algorithm Theory–SWAT 2006*, pages 196–207. Springer. (Cité en page 97.)
- [Baker and Fisher, 1981] Baker, E. and Fisher, M. (1981). Computational results for very large air crew scheduling problems. *Omega*, 9(6) :613–618. (Cité en page 14.)
- [Baldacci et al., 2010] Baldacci, R., Bartolini, E., Mingozzi, A., and Roberti, R. (2010). An exact solution framework for a broad class of vehicle routing problems. *Computational Management Science*, 7(3) :229–268. (Cité en page 19.)
- [Baldacci et al., 2008a] Baldacci, R., Battarra, M., and Vigo, D. (2008a). Routing a heterogeneous fleet of vehicles. In *The vehicle routing problem : latest advances and new challenges*, pages 3–27. Springer. (Cité en page 18.)

- [Baldacci et al., 2008b] Baldacci, R., Christofides, N., and Mingozzi, A. (2008b). An exact algorithm for the vehicle routing problem based on the set partitioning formulation with additional cuts. *Mathematical Programming*, 115(2) :351–385. (Cité en pages 18 et 19.)
- [Baldacci et al., 2004] Baldacci, R., Hadjiconstantinou, E., and Mingozzi, A. (2004). An exact algorithm for the capacitated vehicle routing problem based on a two-commodity network flow formulation. *Operations Research*, 52(5) :723–738. (Cité en pages 18 et 19.)
- [Baldacci et al., 2012] Baldacci, R., Mingozzi, A., and Roberti, R. (2012). Recent exact algorithms for solving the vehicle routing problem under capacity and time window constraints. *European Journal of Operational Research*, 218(1) :1–6. (Cité en pages 18 et 19.)
- [Baldacci et al., 2007] Baldacci, R., Toth, P., and Vigo, D. (2007). Recent advances in vehicle routing exact algorithms. *4OR*, 5(4) :269–298. (Cité en page 18.)
- [Bar-Yehuda et al., 2005] Bar-Yehuda, R., Even, G., and Shahar, S. M. (2005). On approximating a geometric prize-collecting traveling salesman problem with time windows. *Journal of Algorithms*, 55(1) :76–92. (Cité en page 63.)
- [Bard and Purnomo, 2005] Bard, J. F. and Purnomo, H. W. (2005). Preference scheduling for nurses using column generation. *European Journal of Operational Research*, 164(2) :510–534. (Cité en page 16.)
- [Bard and Purnomo, 2007] Bard, J. F. and Purnomo, H. W. (2007). Cyclic preference scheduling of nurses using a lagrangian-based heuristic. *Journal of Scheduling*, 10(1) :5–23. (Cité en page 16.)
- [Beasley and Cao, 1996] Beasley, J. E. and Cao, B. (1996). A tree search algorithm for the crew scheduling problem. *Euro-*

- pean Journal of Operational Research*, 94(3) :517–526. (Cité en page 14.)
- [Begur et al., 1997] Begur, S. V., Miller, D. M., and Weaver, J. R. (1997). An integrated spatial DSS for scheduling and routing home-health-care nurses. *Interfaces*, 27(4) :35–48. (Cité en pages 25, 27 et 28.)
- [Bektas, 2006] Bektas, T. (2006). The multiple traveling salesman problem : an overview of formulations and solution procedures. *Omega*, 34(3) :209–219. (Cité en page 17.)
- [Ben Bachouch, 2010] Ben Bachouch, R. (2010). Pilotage opérationnel des structures d’hospitalisation à domicile. (Cité en page 5.)
- [Ben Bachouch et al., 2009] Ben Bachouch, R., Fakhfakh, M., Guinet, A., Hajri-Gabouj, S., et al. (2009). Planification des tournées des infirmiers dans une structure de soins à domicile. (Cité en pages 23, 24 et 27.)
- [Ben Bachouch et al., 2007] Ben Bachouch, R., Guinet, A., Hajri Gabouj, S., et al. (2007). Gestion des lits mutualisés d’un établissement hospitalier. *Actes CDROM 7ème Congrès International de Génie Industriel*. (Cité en page 3.)
- [Bennett, 2009] Bennett, A. R. (2009). Home health care logistics planning. (Cité en pages 26 et 27.)
- [Bennett and Erera, 2011] Bennett, A. R. and Erera, A. L. (2011). Dynamic periodic fixed appointment scheduling for home health. *IIE Transactions on Healthcare Systems Engineering*, 1(1) :6–19. (Cité en page 114.)
- [Berkey and Wang, 1987] Berkey, J. and Wang, P. (1987). Two-dimensional finite bin-packing algorithms. *Journal of the operational research society*, pages 423–429. (Cité en page 58.)
- [Bertels and Fahle, 2006] Bertels, S. and Fahle, T. (2006). A hybrid setup for a hybrid scenario : combining heuristics for the

- home health care problem. *Computers & Operations Research*, 33(10) :2866–2890. (Cité en pages 25, 27 et 28.)
- [Blais et al., 2003] Blais, M., Lapierre, S. D., and Laporte, G. (2003). Solving a home care districting problem in an urban setting. *Journal of the Operational Research Society*, 54(11) :1141–1147. (Cité en page 26.)
- [Bl chliger, 2004] Bl chliger, I. (2004). Modeling staff scheduling problems. a tutorial. *European Journal of Operational Research*, 158(3) :533–542. (Cité en page 13.)
- [B ckenhauer et al., 2007] B ckenhauer, H.-J., Forlizzi, L., Hromkovic, J., Kneis, J., Kupke, J., Proietti, G., and Widmayer, P. (2007). On the approximability of tsp on local modifications of optimally solved instances. *Algorithmic Operations Research*, 2(2) :83. (Cité en page 97.)
- [Bodin and Golden, 1981] Bodin, L. and Golden, B. (1981). Classification in vehicle routing and scheduling. *Networks*, 11(2) :97–108. (Cité en page 18.)
- [Boldy and O’Kane, 1982] Boldy, D. P. and O’Kane, P. C. (1982). Health operational research-a selective overview. *European Journal of Operational Research*, 10(1) :1–9. (Cité en page 2.)
- [Borsani et al., 2006] Borsani, V., Matta, A., Beschi, G., and Sommaruga, F. (2006). A home care scheduling model for human resources. In *Service Systems and Service Management, 2006 International Conference on*, volume 1, pages 449–454. IEEE. (Cité en pages 23, 27 et 28.)
- [Boucher, 2011] Boucher, M. (2011). Fin de vie en hospitalisation   domicile : acteurs : m decin g n raliste, m decin coordonnateur,  quipe HAD. (Cité en page 6.)
- [Bradley and Martin, 1991] Bradley, D. and Martin, J. (1991). Continuous personnel scheduling algorithms : a literature review. *Journal of the Society for Health Systems*, 2(2) :8. (Cité en page 15.)

- [Bräysy and Gendreau, 2005a] Bräysy, O. and Gendreau, M. (2005a). Vehicle routing problem with time windows, Part I : Route construction and local search algorithms. *Transportation science*, 39(1) :104–118. (Cité en page 19.)
- [Bräysy and Gendreau, 2005b] Bräysy, O. and Gendreau, M. (2005b). Vehicle routing problem with time windows, Part II : Metaheuristics. *Transportation science*, 39(1) :119–139. (Cité en page 19.)
- [Bredström and Rönnqvist, 2007] Bredström, D. and Rönnqvist, M. (2007). A branch and price algorithm for the combined vehicle routing and scheduling problem with synchronization constraints. *Discussion Papers*, 7. (Cité en pages 21, 24, 27 et 28.)
- [Bredström and Rönnqvist, 2008] Bredström, D. and Rönnqvist, M. (2008). Combined vehicle routing and scheduling with temporal precedence and synchronization constraints. *European Journal of Operational Research*, 191(1) :19–31. (Cité en pages 23, 24 et 27.)
- [Breedam, 2001] Breedam, A. V. (2001). Comparing descent heuristics and metaheuristics for the vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 28(4) :289–315. (Cité en page 109.)
- [Brucker et al., 2011] Brucker, P., Qu, R., and Burke, E. (2011). Personnel scheduling : Models and complexity. *European Journal of Operational Research*, 210(3) :467–473. (Cité en page 12.)
- [Burke et al., 1999] Burke, E., De Causmaecker, P., and Berghe, G. V. (1999). A hybrid tabu search algorithm for the nurse rostering problem. In *Simulated evolution and learning*, pages 187–194. Springer. (Cité en page 16.)
- [Burke et al., 2004] Burke, E. K., De Causmaecker, P., Berghe, G. V., and Van Landeghem, H. (2004). The state of the art

- of nurse rostering. *Journal of scheduling*, 7(6) :441–499. (Cité en pages 2 et 16.)
- [Callanquin et al., 2001] Callanquin, J., Camuzeaux, C., and Labrude, P. (2001). Le matériel de maintien à domicile : généralités, prescription, description, exercices d’application. (Cité en page 5.)
- [Caprara et al., 1999] Caprara, A., Fischetti, M., Guida, P. L., Toth, P., and Vigo, D. (1999). Solution of large-scale railway crew planning problems : The italian experience. In *Computer-aided transit scheduling*, pages 1–18. Springer. (Cité en page 15.)
- [Cardoen et al., 2010] Cardoen, B., Demeulemeester, E., and Beliën, J. (2010). Operating room planning and scheduling : A literature review. *European Journal of Operational Research*, 201(3) :921–932. (Cité en page 2.)
- [Casazza et al., 2013] Casazza, M., Ceselli, A., and Létocart, L. (October 2013). Dynamically negotiating time slots in attended home service delivery. *Technical Report "Nota del Polo - Ricerca" n. 140, D.I. Università degli Studi di Milano*. (Cité en pages 63 et 64.)
- [Cayirli et al., 2006] Cayirli, T., Veral, E., and Rosen, H. (2006). Designing appointment scheduling systems for ambulatory care services. *Health Care Management Science*, 9(1) :47–58. (Cité en page 2.)
- [Chabrier, 2006] Chabrier, A. (2006). Vehicle routing problem with elementary shortest path based column generation. *Computers & Operations Research*, 33(10) :2972–2990. (Cité en page 19.)
- [Chahed Jebalia, 2008] Chahed Jebalia, S. (2008). *Modélisation et analyse de l’organisation et du fonctionnement des structures d’Hospitalisation À Domicile*. PhD thesis, Ecole Centrale Paris. (Cité en pages 5 et 6.)
- [Cheang et al., 2003] Cheang, B., Li, H., Lim, A., and Rodrigues, B. (2003). Nurse rostering problems : a bibliographic survey. *Eu-*



- ropean Journal of Operational Research*, 151(3) :447–460. (Cité en page 16.)
- [Cheng and Rich, 1998] Cheng, E. and Rich, J. L. (1998). A home health care routing and scheduling problem. *Rice University, Texas, Tech. Rep. TR98-04*. (Cité en pages 25 et 27.)
- [Chiang and Russell, 1997] Chiang, W.-C. and Russell, R. A. (1997). A reactive tabu search metaheuristic for the vehicle routing problem with time windows. *INFORMS Journal on computing*, 9(4) :417–430. (Cité en page 19.)
- [Clarke and Wright, 1964] Clarke, G. u. and Wright, J. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations research*, 12(4) :568–581. (Cité en page 25.)
- [Clautiaux et al., 2007] Clautiaux, F., Jouglet, A., and El Hayek, J. (2007). A new lower bound for the non-oriented two-dimensional bin-packing problem. *Operations research letters*, 35(3) :365–373. (Cité en page 58.)
- [Cordeau et al., 2002] Cordeau, J. F., Desaulniers, G., Desrosiers, J., Solomon, M. M., and Soumis, F. (2002). VRP with time windows. *The vehicle routing problem*, 9 :157–193. (Cité en pages 18 et 19.)
- [Cordeau et al., 1997] Cordeau, J. F., Gendreau, M., and Laporte, G. (1997). A tabu search heuristic for periodic and multi-depot vehicle routing problems. *Networks*, 30(2) :105–119. (Cité en page 18.)
- [Cordeau et al., 2001] Cordeau, J. F., Laporte, G., Mercier, A., et al. (2001). A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows. *Journal of the Operational research society*, 52(8) :928–936. (Cité en page 19.)
- [Cordone and Wolfler Calvo., 2000] Cordone, R. and Wolfler Calvo., R. (2000). Note on Time Window Constraints in Routing Problems. (Cité en page 68.)



- [Daknou et al., 2010] Daknou, A., Zgaya, H., Hammadi, S., and Hubert, H. (2010). A dynamic patient scheduling at the emergency department in hospitals. In *Health Care Management (WHCM), 2010 IEEE Workshop on*, pages 1–6. IEEE. (Cité en page 3.)
- [Danna and Le Pape, 2005] Danna, E. and Le Pape, C. (2005). Branch-and-price heuristics : A case study on the vehicle routing problem with time windows. In *Column Generation*, pages 99–129. Springer. (Cité en page 19.)
- [Dantzig et al., 1954] Dantzig, G., Fulkerson, R., and Johnson, S. (1954). Solution of a large-scale traveling-salesman problem. *Journal of the operations research society of America*, 2(4) :393–410. (Cité en page 17.)
- [Dantzig and Ramser, 1959] Dantzig, G. B. and Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management science*, 6(1) :80–91. (Cité en page 17.)
- [Datta, 1993] Datta, S. (1993). Applications of OR in health in developing countries : a review. *Social Science & Medicine*, 37(12) :1441–1450. (Cité en page 2.)
- [De Angelis, 1998] De Angelis, V. (1998). Planning home assistance for AIDS patients in the city of Rome, Italy. *Interfaces*, 28(3) :75–83. (Cité en page 12.)
- [Demeester et al., 2010] Demeester, P., Souffriau, W., De Causmaecker, P., and Vanden Berghe, G. (2010). A hybrid tabu search algorithm for automatically assigning patients to beds. *Artificial Intelligence in Medicine*, 48(1) :61–70. (Cité en page 3.)
- [Desaulniers et al., 1998] Desaulniers, G., Desrosiers, J., Gamache, M., and Soumis, F. (1998). Crew scheduling in air transportation. (Cité en page 14.)
- [Desrosiers et al., 1995] Desrosiers, J., Dumas, Y., Solomon, M. M., and Soumis, F. (1995). Time constrained routing and

- scheduling. *Handbooks in operations research and management science*, 8 :35–139. (Cité en page 19.)
- [Dohn et al., 2009] Dohn, A., Kolind, E., and Clausen, J. (2009). The manpower allocation problem with time windows and job-teaming constraints : A branch-and-price approach. *Computers & Operations Research*, 36(4) :1145–1157. (Cité en page 29.)
- [Dohn et al., 2008] Dohn, A., Rasmussen, M. S., Justesen, T., and Larsen, J. (2008). The home care crew scheduling problem. In *Proceedings of the 1st international conference on applied operational research (ICAOR'08), Yerevan, Armenia. Lecture Notes in Management Science*, volume 1, pages 1–8. (Cité en pages 21 et 23.)
- [Dowland et al., 2000] Dowland, K., Thompson, J., et al. (2000). Solving a nurse scheduling problem with knapsacks, networks and tabu search. *Journal of the Operational Research Society*, 51(7) :825–833. (Cité en page 16.)
- [Duhamel et al., 2012] Duhamel, C., Lacomme, P., and Prodhon, C. (2012). A hybrid evolutionary local search with depth first search split procedure for the heterogeneous vehicle routing problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(2) :345–358. (Cité en page 18.)
- [Dumas et al., 1995] Dumas, Y., Desrosiers, J., Gelinas, E., and Solomon, M. M. (1995). An optimal algorithm for the traveling salesman problem with time windows. *Operations research*, 43(2) :367–371. (Cité en page 64.)
- [Durand et al., 2010] Durand, N., Lannelongue, C., and Legrand, P. (2010). Hospitalisation à domicile. (Cité en page 6.)
- [Edie, 1954] Edie, L. C. (1954). Traffic delays at toll booths. *Operations Research*, 2(2) :107–138. (Cité en page 14.)
- [Ernst et al., 2004] Ernst, A. T., Jiang, H., Krishnamoorthy, M., and Sier, D. (2004). Staff scheduling and rostering : A review of

- applications, methods and models. *European journal of operational research*, 153(1) :3–27. (Cité en page 16.)
- [Escoffier et al., 2009] Escoffier, B., Milanič, M., and Paschos, V. T. (2009). Simple and fast reoptimizations for the steiner tree problem. *Algorithmic Operations Research*, 4(2) :Pages–86. (Cité en page 97.)
- [Ettore and Matta, 2010] Ettore, L. and Matta, A. (2010). Analysis of a patient-nurse assignment policy in home care services. In *Proceedings of conference GISEH, Clermont-Ferrand, France*. (Cité en page 12.)
- [Eveborn et al., 2006] Eveborn, P., Flisberg, P., and Rönnqvist, M. (2006). LAPS CARE an operational system for staff planning of home care. *European Journal of Operational Research*, 171(3) :962–976. (Cité en pages 20, 23, 27 et 28.)
- [Fahrion and Wrede, 1990] Fahrion, R. and Wrede, M. (1990). On a principle of chain-exchange for vehicle-routeing problems (1-*vrp*). *Journal of the Operational Research Society*, pages 821–827. (Cité en page 109.)
- [Feillet, 2010] Feillet, D. (2010). A tutorial on column generation and branch-and-price for vehicle routing problems. *4or*, 8(4) :407–424. (Cité en page 19.)
- [Feillet et al., 2005] Feillet, D., Dejax, P., and Gendreau, M. (2005). The profitable arc tour problem : Solution with a branch-and-price algorithm. *Transportation Science*, 39(4) :539–552. (Cité en page 19.)
- [Feillet et al., 2004] Feillet, D., Dejax, P., Gendreau, M., and Gueguen, C. (2004). An exact algorithm for the elementary shortest path problem with resource constraints : Application to some vehicle routing problems. *Networks*, 44(3) :216–229. (Cité en page 19.)

- [Fisher and Jaikumar, 1981] Fisher, M. L. and Jaikumar, R. (1981). A generalized assignment heuristic for vehicle routing. *Networks*, 11(2) :109–124. (Cité en page 54.)
- [FNEHAD, 2012] FNEHAD (2012). Rapport d’activité de la FNEHAD 2012-2013. (Cité en pages ix, 6 et 8.)
- [Fries, 1979] Fries, B. E. (1979). Technical note-bibliography of operations research in health care systems : An update. *Operations Research*, 27(2) :408–419. (Cité en page 1.)
- [Fukasawa et al., 2006] Fukasawa, R., Longo, H., Lysgaard, J., de Aragão, M. P., Reis, M., Uchoa, E., and Werneck, R. F. (2006). Robust branch-and-cut-and-price for the capacitated vehicle routing problem. *Mathematical programming*, 106(3) :491–511. (Cité en pages 18 et 19.)
- [Garey and Johnson, 1979] Garey, M. R. and Johnson, D. S. (1979). Computer and intractability. *A Guide to the NP-Completeness*. Ney York, NY : WH Freeman and Company. (Cité en pages 17 et 18.)
- [Gehring and Homberger, 2001] Gehring, H. and Homberger, J. (2001). A parallel two-phase metaheuristic for routing problems with time windows. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 18 :35–47. (Cité en page 19.)
- [Gendreau et al., 1992] Gendreau, M., Hertz, A., and Laporte, G. (1992). New insertion and postoptimization procedures for the traveling salesman problem. *Operations Research*, 40(6) :1086–1094. (Cité en page 109.)
- [Gillett and Miller, 1974] Gillett, B. E. and Miller, L. R. (1974). A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem. *Operations research*, 22(2) :340–349. (Cité en pages 25 et 53.)
- [Gilmore and Gomory, 1965] Gilmore, P. and Gomory, R. (1965). Multistage cutting stock problems of two and more dimensions. *Operations Research*, 13(1) :94–120. (Cité en page 58.)

- [Guerriero and Guido, 2011] Guerriero, F. and Guido, R. (2011). Operational research in the management of the operating theatre : a survey. *Health care management science*, 14(1) :89–114. (Cité en page 2.)
- [Haggerty et al., 2003] Haggerty, J. L., Reid, R. J., Freeman, G. K., Starfield, B. H., Adair, C. E., and McKendry, R. (2003). Continuity of care : a multidisciplinary review. *Bmj*, 327(7425) :1219–1221. (Cité en page 12.)
- [Harper et al., 2002] Harper, P., Shahani, A., et al. (2002). Modelling for the planning and management of bed capacities in hospitals. *Journal of the Operational Research Society*, 53(1) :11–18. (Cité en page 2.)
- [Hertz and Lahrichi, 2009] Hertz, A. and Lahrichi, N. (2009). A patient assignment algorithm for home care services. *Journal of the Operational Research Society*, 60(4) :481–495. (Cité en page 26.)
- [Hoffman and Padberg, 1993] Hoffman, K. L. and Padberg, M. (1993). Solving airline crew scheduling problems by branch-and-cut. *Management Science*, 39(6) :657–682. (Cité en page 15.)
- [Huang, 1998] Huang, X.-M. (1998). Decision making support in reshaping hospital medical services. *Health care management science*, 1(2) :165–173. (Cité en page 2.)
- [Hung, 1995] Hung, R. (1995). Hospital nurse scheduling. *Journal of Nursing Administration*, 25(7-8) :21–23. (Cité en page 16.)
- [Irnich and Villeneuve, 2006] Irnich, S. and Villeneuve, D. (2006). The shortest-path problem with resource constraints and k-cycle elimination for  $k \geq 3$ . *INFORMS Journal on Computing*, 18(3) :391–406. (Cité en page 19.)
- [Ishizaka and Labib, 2009] Ishizaka, A. and Labib, A. (2009). Analytic hierarchy process and expert choice : Benefits and limitations. *OR Insight*, 22(4) :201–220. (Cité en page 2.)

- [Jacobson et al., 2006] Jacobson, S. H., Hall, S. N., and Swisher, J. R. (2006). Discrete-event simulation of health care systems. In *Patient flow : Reducing delay in healthcare delivery*, pages 211–252. Springer. (Cité en page 2.)
- [Jebali, 2004] Jebali, A. (2004). Vers un outil d’aide à la planification et à l’ordonnancement des ressources dans les services de soins. *Th : Institut National Polytechnique de Grenoble*. (Cité en page 2.)
- [Jepsen et al., 2008] Jepsen, M., Petersen, B., Spoorendonk, S., and Pisinger, D. (2008). Subset-row inequalities applied to the vehicle routing problem with time windows. *Operations Research*, 56(2) :497–511. (Cité en page 19.)
- [Kallehauge, 2008] Kallehauge, B. (2008). Formulations and exact algorithms for the vehicle routing problem with time windows. *Computers & Operations Research*, 35(7) :2307–2330. (Cité en page 19.)
- [Kallehauge et al., 2005] Kallehauge, B., Larsen, J., Madsen, O. B., and Solomon, M. M. (2005). Vehicle routing problem with time windows. (Cité en page 19.)
- [Karp, 1972] Karp, R. M. (1972). Reducibility among combinatorial problems. *Complexity of Computer Computations*, pages 85–103. (Cité en page 55.)
- [Kennedy et al., 1995] Kennedy, J., Eberhart, R., et al. (1995). Particle swarm optimization. In *Proceedings of IEEE international conference on neural networks*, volume 4, pages 1942–1948. Perth, Australia. (Cité en page 24.)
- [Kergosien et al., 2009] Kergosien, Y., Lenté, C., and Billaut, J. C. (2009). Home health care problem : An extended multiple traveling salesman problem. In *4th Multidisciplinary International Conference on Scheduling : Theory and Applications (MISTA’09), Dublin (Irlande)*, pages 10–12. (Cité en pages 21, 27, 28 et 44.)

- [Kovacs et al., 2012] Kovacs, A. A., Parragh, S. N., Doerner, K. F., and Hartl, R. F. (2012). Adaptive large neighborhood search for service technician routing and scheduling problems. *Journal of scheduling*, 15(5) :579–600. (Cité en page 29.)
- [Lahrichi et al., 2006] Lahrichi, N., Lapierre, S., Hertz, A., Talib, A., and Bouvier, L. (2006). Analysis of a territorial approach to the delivery of nursing home care services based on historical data. *Journal of medical systems*, 30(4) :283–291. (Cité en page 26.)
- [Laporte, 1992] Laporte, G. (1992). The vehicle routing problem : An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, 59(3) :345–358. (Cité en page 18.)
- [Laporte, 2007] Laporte, G. (2007). What you should know about the vehicle routing problem. *Naval Research Logistics (NRL)*, 54(8) :811–819. (Cité en page 18.)
- [Laporte, 2009] Laporte, G. (2009). Fifty years of vehicle routing. *Transportation Science*, 43(4) :408–416. (Cité en page 18.)
- [Lau et al., 2003] Lau, H. C., Sim, M., and Teo, K. M. (2003). Vehicle routing problem with time windows and a limited number of vehicles. *European Journal of Operational Research*, 148(3) :559–569. (Cité en page 20.)
- [Lenstra and Kan, 1981] Lenstra, J. K. and Kan, A. (1981). Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks*, 11(2) :221–227. (Cité en page 12.)
- [Letchford et al., 2007] Letchford, A. N., Lysgaard, J., and Eglese, R. W. (2007). A branch-and-cut algorithm for the capacitated open vehicle routing problem. *Journal of the Operational Research Society*, 58(12) :1642–1651. (Cité en page 18.)
- [Li and Benton, 1996] Li, L. and Benton, W. (1996). Performance measurement criteria in health care organizations : review and



- future research directions. *European Journal of Operational Research*, 93(3) :449–468. (Cité en page 2.)
- [Li et al., 2005] Li, Y., Lim, A., and Rodrigues, B. (2005). Manpower allocation with time windows and job-teaming constraints. *Naval Research Logistics (NRL)*, 52(4) :302–311. (Cité en page 29.)
- [Liberatore and Nydick, 2008] Liberatore, M. J. and Nydick, R. L. (2008). The analytic hierarchy process in medical and health care decision making : A literature review. *European Journal of Operational Research*, 189(1) :194–207. (Cité en page 2.)
- [Lim et al., 2004] Lim, A., Rodrigues, B., and Song, L. (2004). Manpower allocation with time windows. *Journal of the Operational Research Society*, 55(11) :1178–1186. (Cité en page 28.)
- [Lin and Kernighan, 1973] Lin, S. and Kernighan, B. W. (1973). An effective heuristic algorithm for the traveling-salesman problem. *Operations research*, 21(2) :498–516. (Cité en pages 25 et 109.)
- [Littig and Isken, 2007] Littig, S. J. and Isken, M. W. (2007). Short term hospital occupancy prediction. *Health care management science*, 10(1) :47–66. (Cité en page 2.)
- [L.Smith, 1976] L.Smith (1976). The application of an interactive algorithm to develop cyclical rotational schedule for nursing personnel 1976. *INFOR Journal*, 14(1) :53–70. (Cité en page 15.)
- [Lysgaard, 2006] Lysgaard, J. (2006). Reachability cuts for the vehicle routing problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 175(1) :210–223. (Cité en page 19.)
- [Lysgaard et al., 2004] Lysgaard, J., Letchford, A. N., and Eglese, R. W. (2004). A new branch-and-cut algorithm for the capacitated vehicle routing problem. *Mathematical Programming*, 100(2) :423–445. (Cité en pages 18 et 19.)



- [Maier Rothe and Wolfe, 1973] Maier Rothe, C. and Wolfe, H. B. (1973). Cyclical scheduling and allocation of nursing staff. *Socio-Economic Planning Sciences*, 7(5) :471–487. (Cité en page 15.)
- [Mankowska et al., 2013] Mankowska, D. S., Meisel, F., and Bierwirth, C. (2013). The home health care routing and scheduling problem with interdependent services. *Health care management science*, pages 1–16. (Cité en pages 21 et 23.)
- [Misir et al., 2014] Misir, M., Smet, P., and Berghe, G. V. (2014). An analysis of generalised heuristics for vehicle routing and personnel rostering problems. *Journal of the Operational Research Society*. (Cité en pages xi et 31.)
- [Misir et al., 2011] Misir, M., Smet, P., Verbeeck, K., and Vanden Berghe, G. (2011). Security personnel routing and rostering : a hyper-heuristic approach. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Applied Operational Research*, volume 3, pages 193–205. (Cité en page 30.)
- [Naddef and Rinaldi, 2002] Naddef, D. and Rinaldi, G. (2002). Branch-and-cut algorithms for the capacitated VRP. *The vehicle routing problem*, 9 :53–81. (Cité en pages 18 et 19.)
- [Nickel et al., 2012] Nickel, S., Schröder, M., and Steeg, J. (2012). Mid-term and short-term planning support for home health care services. *European Journal of Operational Research*, 219(3) :574–587. (Cité en pages 21, 22, 27 et 28.)
- [Or, 1976] Or, I. (1976). Traveling salesman-type combinatorial optimization problems and their relation to the logistics of regional blood banking. *Ph.D. dissertation, Northwestern University Evanston, IL*. (Cité en page 109.)
- [Partouche, 1998] Partouche, A. (1998). *Planification d’horaires de travail methodologie, modélisation et résolution a l’aide de la programmation linéaire en nombres entiers et de la programmation par contraintes*. PhD thesis, Paris 9. (Cité en pages ix et 13.)

- [Pillac et al., 2012] Pillac, V., Guéret, C., and Medaglia, A. L. (2012). A parallel matheuristic for the technician routing and scheduling problem. *Optimization Letters*, pages 1–11. (Cité en page 29.)
- [Potvin and Rousseau, 1993] Potvin, J. Y. and Rousseau, J. M. (1993). A parallel route building algorithm for the vehicle routing and scheduling problem with time windows. *European Journal of Operational Research*, 66(3) :331–340. (Cité en page 19.)
- [Prins, 2004] Prins, C. (2004). A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 31(12) :1985–2002. (Cité en page 18.)
- [Prins et al., 2007] Prins, C., Prodhon, C., Ruiz, A., Soriano, P., and Wolfler Calvo, R. (2007). Solving the capacitated location-routing problem by a cooperative lagrangean relaxation-granular tabu search heuristic. *Transportation Science*, 41(4) :470–483. (Cité en page 18.)
- [Punnen, 2007] Punnen, A. P. (2007). The traveling salesman problem : Applications, formulations and variations. In *The traveling salesman problem and its variations*, pages 1–28. Springer. (Cité en page 17.)
- [Ralphs et al., 2003] Ralphs, T. K., Kopman, L., Pulleyblank, W. R., and Trotter, L. E. (2003). On the capacitated vehicle routing problem. *Mathematical programming*, 94(2-3) :343–359. (Cité en page 18.)
- [Ramis et al., 2001] Ramis, F. J. et al. (2001). The use of simulation for process improvement at an ambulatory surgery center. In *Simulation Conference, 2001. Proceedings of the Winter*, volume 2, pages 1401–1404. IEEE. (Cité en page 2.)
- [Rasmussen et al., 2012] Rasmussen, M. S., Justesen, T., Dohn, A., and Larsen, J. (2012). The home care crew scheduling problem : Preference-based visit clustering and temporal dependen-

- cies. *European Journal of Operational Research*, 219(3) :598–610. (Cité en pages 23, 24, 27 et 28.)
- [Redjem et al., 2011] Redjem, R., Kharraja, S., and Marcon, E. (2011). Collaborative model for planning and scheduling caregivers’ activities in homecare. In *18th IFAC World Congress. Milan, Italy*, pages 2877–2882. (Cité en pages 21, 22 et 27.)
- [Rego and Roucairol, 1994] Rego, C. and Roucairol, C. (1994). Le probleme de tournées de vehicules : étude et résolution approchée. (Cité en page 18.)
- [Righini and Salani, 2006] Righini, G. and Salani, M. (2006). Symmetry helps : bounded bi-directional dynamic programming for the elementary shortest path problem with resource constraints. *Discrete Optimization*, 3(3) :255–273. (Cité en page 19.)
- [Righini and Salani, 2009] Righini, G. and Salani, M. (2009). Decremental state space relaxation strategies and initialization heuristics for solving the orienteering problem with time windows with dynamic programming. *Computers & Operations Research*, 36(4) :1191–1203. (Cité en page 63.)
- [Rochat and Taillard, 1995] Rochat, Y. and Taillard, É. D. (1995). Probabilistic diversification and intensification in local search for vehicle routing. *Journal of heuristics*, 1(1) :147–167. (Cité en page 19.)
- [Rosenhead, 1978] Rosenhead, J. (1978). Operational research in health services planning. *European Journal of Operational Research*, 2(2) :75–85. (Cité en page 2.)
- [Rosenkrantz et al., 1977] Rosenkrantz, D. J., Stearns, R. E., and Lewis, II, P. M. (1977). An analysis of several heuristics for the traveling salesman problem. *SIAM journal on computing*, 6(3) :563–581. (Cité en page 25.)
- [Rousseau et al., 2007] Rousseau, L. M., Gendreau, M., and Feillet, D. (2007). Interior point stabilization for column ge-

- neration. *Operations Research Letters*, 35(5) :660–668. (Cité en page 19.)
- [Rushmeier et al., 1995] Rushmeier, R. A., Hoffman, K. L., and Padberg, M. (1995). Recent advances in exact optimization of airline scheduling problems. *Dept. of Operations Research and Operations Engineering, George Mason University, Working Paper*. (Cité en page 15.)
- [Ryan et al., 1993] Ryan, D. M., Hjorring, C., and Glover, F. (1993). Extensions of the petal method for vehicle routeing. *Journal of the Operational Research Society*, pages 289–296. (Cité en page 54.)
- [Ryan et al., 1975] Ryan, T., Barker, B. L., and MARCIANTE, F. A. (1975). System for determining appropriate nurse staffing. *Journal of Nursing Administration*, 5(5) :30–38. (Cité en page 15.)
- [Savelsbergh, 1988] Savelsbergh, M. (1988). Computer aided routing. *Thesis, Centrum voor Wiskunde en Informatica, Amsterdam*. (Cité en page 109.)
- [Savelsbergh, 1985] Savelsbergh, M. W. P. (1985). Local search in routing problems with time windows. *Annals of Operations Research*, 4(1) :285–305. (Cité en page 68.)
- [Savelsbergh and Sol, 1995] Savelsbergh, M. W. P. and Sol, M. (1995). The general pickup and delivery problem. *Transportation science*, 29(1) :17–29. (Cité en page 18.)
- [Schulze and Fahle, 1999] Schulze, J. and Fahle, T. (1999). A parallel algorithm for the vehicle routing problem with time window constraints. *Annals of Operations Research*, 86 :585–607. (Cité en page 19.)
- [Sentilhes Monkam, 2005] Sentilhes Monkam, A. (2005). Rétrospective de l’hospitalisation à domicile. *Revue française des affaires sociales*, (3) :157–182. (Cité en page 6.)

- [Shachnai et al., 2012] Shachnai, H., Tamir, G., and Tamir, T. (2012). A theory and algorithms for combinatorial reoptimization. In *LATIN 2012 : Theoretical Informatics*, pages 618–630. Springer. (Cité en page 97.)
- [Siferd and Benton, 1992] Siferd, S. P. and Benton, W. (1992). Workforce staffing and scheduling : Hospital nursing specific models. *European Journal of Operational Research*, 60(3) :233–246. (Cité en page 15.)
- [Sinuany-Stern and Teomi, 1986] Sinuany-Stern, Z. and Teomi, Y. (1986). Multi-objective scheduling plans for security guards. *Journal of the Operational Research Society*, pages 67–77. (Cité en page 30.)
- [Sitompul and Randhawa, 1989] Sitompul, D. and Randhawa, S. (1989). Nurse scheduling models : a state-of-the-art review. *Journal of the Society for Health Systems*, 2(1) :62–72. (Cité en page 15.)
- [Solomon and Desrosiers, 1988] Solomon, M. M. and Desrosiers, J. (1988). Survey Paper-Time Window Constrained Routing and Scheduling Problems. *Transportation science*, 22(1) :1–13. (Cité en page 19.)
- [Thomsen, 2006] Thomsen, K. (2006). *Optimization on home care*. PhD thesis, Technical University of Denmark, DTU, DK-2800 Kgs. Lyngby, Denmark. (Cité en pages 21 et 24.)
- [Tien and Kamiyama, 1982] Tien, J. M. and Kamiyama, A. (1982). On manpower scheduling algorithms. *Siam Review*, 24(3) :275–287. (Cité en page 14.)
- [Toth and Vigo, 2002] Toth, P. and Vigo, D. (2002). The vehicle routing problem. 9. (Cité en page 18.)
- [Toth and Vigo, 2003] Toth, P. and Vigo, D. (2003). The granular tabu search and its application to the vehicle-routing problem. *INFORMS Journal on Computing*, 15(4) :333–346. (Cité en page 18.)

- [Trautsamwieser and Hirsch, 2011] Trautsamwieser, A. and Hirsch, P. (2011). Optimization of daily scheduling for home health care services. *Journal of Applied Operational Research*, 3(3) :124–136. (Cité en pages 23, 27 et 28.)
- [Trilling et al., 2007] Trilling, L., Guinet, A., and Le Magny, D. (2007). Planification des infirmiers anesthésistes : analyse comparative des performances de différents solveurs. *Logistique & Management*, 15(1) :5–16. (Cité en page 14.)
- [Trivedi and Warner, 1976] Trivedi, V. M. and Warner, D. M. (1976). A branch and bound algorithm for optimum allocation of float nurses. *Management Science*, 22(9) :972–981. (Cité en page 15.)
- [Utley et al., 2003] Utley, M., Gallivan, S., Davis, K., Daniel, P., Reeves, P., and Worrall, J. (2003). Estimating bed requirements for an intermediate care facility. *European journal of operational research*, 150(1) :92–100. (Cité en page 2.)
- [Valouxis and Housos, 2000] Valouxis, C. and Housos, E. (2000). Hybrid optimization techniques for the workshift and rest assignment of nursing personnel. *Artificial Intelligence in Medicine*, 20(2) :155–175. (Cité en page 14.)
- [Vidal et al., 2011] Vidal, T., Crainic, T. G., Gendreau, M., and Prins, C. (2011). *A unifying view on timing problems and algorithms*. CIRRELT. (Cité en page 68.)
- [Vissers et al., 2007] Vissers, J. M., Adan, I. J., and Dellaert, N. P. (2007). Developing a platform for comparison of hospital admission systems : An illustration. *European Journal of Operational Research*, 180(3) :1290–1301. (Cité en page 2.)
- [Warner, 1976] Warner, D. M. (1976). Scheduling nursing personnel according to nursing preference : A mathematical programming approach. *Operations Research*, 24(5) :842–856. (Cité en page 15.)

- [Warner and Prawda, 1972] Warner, D. M. and Prawda, J. (1972). A mathematical programming model for scheduling nursing personnel in a hospital. *Management Science*, 19(4-part-1) :411–422. (Cité en page 15.)
- [Willemse and Joubert, 2012] Willemse, E. J. and Joubert, J. W. (2012). Applying min–max k postmen problems to the routing of security guards. *Journal of the Operational Research Society*, 63(2) :245–260. (Cité en page 30.)
- [Wolfler Calvo, 2000] Wolfler Calvo, R. (2000). A new heuristic for the traveling salesman problem with time windows. *Transportation Science*, 34(1) :113–124. (Cité en pages 60 et 61.)
- [Wolfler Calvo and Cordone, 2003] Wolfler Calvo, R. and Cordone, R. (2003). A heuristic approach to the overnight security service problem. *Computers & Operations Research*, 30(9) :1269–1287. (Cité en page 30.)
- [Zhang and Tang, 2007] Zhang, Y. and Tang, L. (2007). Solving prize-collecting traveling salesman problem with time windows by chaotic neural network. In *Advances in Neural Networks–ISNN 2007*, pages 63–71. Springer. (Cité en page 63.)