

UNIVERSITÉ D'ARTOIS

Cette thèse intitulée :

**OPTIMISATION DE LA PLANIFICATION DES SERVICES  
D'HOSPITALISATION À DOMICILE**

présentée par : EN-NAHLI Laila

Soutenue le : 22 décembre 2017

en vue de l'obtention du diplôme de : Docteur de l'université d'Artois

Discipline : Sciences Pour l'Ingénieur

Spécialité : Génie Informatique et Automatique

a été dûment acceptée par le jury constitué de :

**Rapporteurs**

- LABADIE, Nacima. MCF-HDR, Université de Technologie de Troyes.
- SAHIN, Evren. Professeur, École Centrale Paris.

**Examineurs**

- DI MASCOLO, Maria. Directrice de Recherche, CNRS.
- GONCALVES, Gilles. Professeur, Université d'Artois.
- TCHERNEV, Nicolay. Professeur, Université d'Auvergne.

**Directeur de thèse**

- ALLAOUI, Hamid. Professeur, Université d'Artois.

**Co-Encadrants**

- AFIFI, Sohaib. MCF, Université d'Artois.
- NOUAOURI, Issam. MCF, Université d'Artois.



Cette thèse a été préparée au **LGI2A** :

Laboratoire de Génie Informatique et d'Automatique de l'Artois

EA 3926 Faculté des Sciences Appliquées Technoparc Futura

62400 BÉTHUNE Cedex France

Site : <http://www.lgi2a.univ-artois.fr>



## REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes plus vifs remerciements à mon directeur de thèse, Mr. Hamid Allaoui, pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant d'encadrer ce travail doctoral, pour sa patience, son écoute, ses multiples conseils et pour toutes les heures qu'il a consacrées à diriger cette recherche. Sa compétence, sa rigueur scientifique et sa clairvoyance m'ont beaucoup appris et je lui adresse ma gratitude pour tout cela.

Je remercie également Mr. Sohaib Afifi et Mr. Issam Nouaouri pour leurs présence, soutien et conseils. Grâce à leur intérêt et leurs compétences scientifiques respectives, ils ont largement contribué à la diversité des travaux réalisés.

Je remercie vivement Mme. Nacima Labadie et Mme. Evren Sahin pour avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse et pour le temps qu'elles ont bien voulu me consacrer. Je suis aussi très reconnaissante envers Mme. Maria Di Mascolo, Mr. Gilles Goncalves et Mr. Nikolay Tchernev pour avoir accepté d'examiner mon travail.

Ce travail n'aurait pas été possible sans le financement de la région Haut de France et de l'université d'Artois, qui m'a permis de me consacrer sereinement à l'élaboration de ma thèse.

Je remercie tous les membres du Laboratoire de Génie Informatique et d'Automatique de l'Artois, pour leur sympathie et agréable compagnie au quotidien, plus particulièrement, l'ensemble des doctorants et ingénieurs avec qui l'échange a toujours été enrichissant. Je remercie sincèrement Mme. Nathalie Morganti pour sa bienveillance qu'elle nous prouve au quotidien.

J'adresse tout mon amour et mon affection à mes merveilleux parents. Malgré mon éloignement, leur confiance, leur tendresse et leur amour me portent et me guident tous les jours. Merci pour avoir fait de moi ce que je suis aujourd'hui.

Je tiens à exprimer toute mon admiration et ma reconnaissance envers mon grand frère qui m'a toujours soutenue et encouragée. Ta présence est une bénédiction pour toute la famille.

Tu es notre force et notre repère. Si j'en suis là aujourd'hui c'est grâce à toi.

Cette aventure n'aurait pas été possible sans les sacrifices, la patience et l'amour de mon cher époux. Je tiens à dire combien ton soutien quotidien a été important tout au long de ces années. Merci d'être là. Que ce travail soit témoignage de ma reconnaissance et de mon amour. Un immense remerciement à ma belle-mère qui m'a accueillie à bras ouverts dans la famille et qui m'a aimée et encouragée sans relâche.

Un grand merci pour mes frères, sœurs, belles-sœurs et beaux-frères. Merci pour votre soutien et votre confiance inébranlable en moi. Une grande pensée pour mes neveux et nièces, je vous aime énormément.

Enfin, une pensée émue pour mon défunt beau-frère...

## RÉSUMÉ

Le déséquilibre financier du système d'assurance maladie et la volonté de la rationalisation de l'offre des soins amènent les pouvoirs publics à vouloir réserver les séjours dans les hôpitaux, aux problèmes médicaux les plus graves et aux actes techniquement les plus complexes. Cela exige le développement structuré et sécurisé d'autres modes de prise en charge hors des murs de l'hôpital tel que les services d'Hospitalisation À Domicile (HAD).

C'est dans ce cadre qu'intervient notre thèse. Nous nous intéressons tout particulièrement à l'optimisation de la planification des tournées du personnel soignant aux domiciles des patients. C'est l'une des problématiques majeures relatives à l'HAD, elle est de nature complexe et nécessite des outils performants d'aide à la décision. Nous proposons dans le cadre de cette thèse des solutions basées sur la programmation linéaire mixte et des (méta)heuristiques afin d'établir une planification quotidienne des soins à domicile.

Etant donné la nature multi-objectif du problème étudié (minimisation du temps de déplacement entre les domiciles des patients, maximisation de la préférence des patients envers les soignants, l'équilibrage des tournées, etc.), nous abordons l'optimisation bi-objectif et choisissons d'optimiser simultanément les deux premiers objectifs. Nous développons une approche de résolution basée sur une méthode exacte  $\varepsilon$ -constraint et une heuristique basée sur la méta-heuristique ILS (Iterated Local Search).

**Mots clés :** Hospitalisation À Domicile, Tournées de véhicules, MILP, Méta-heuristiques, Synchronisation, Optimisation multi-objectif.

## ABSTRACT

The Home Healthcare Services (HHCS) are defined as medical and paramedical services delivered to patients at home. HHCS are growing in many industrialized countries, particularly in France. The aim of these services is to improve life conditions of patients and reduce the congestion of hospitals and the increased costs of healthcare systems. HHCS are subject to the same obligations as in conventional hospitals, they have to provide full and coordinated care to patients. There are many issues relative to HHCS considered in the literature, such as the resources dimensioning, the geographical partitioning of a territory into districts, etc. We focus particularly on the scheduling and routing problem, which is one of the major issues related to HHCS. The purpose is to find an effective working plan for each caregiver on a daily basis, in order to serve a set of geographically dispersed patients, considering economic and human issues.

In Home healthcare scheduling and routing problem, it is generally desirable to optimize more than one objective at the same time. With more than one objective function, there is no single optimal solution that simultaneously optimizes all the objective functions, especially if the objectives are conflictive. Therefore, there is a need to use multi-objective optimization methods to provide the decision maker with alternative solutions called Pareto-optimal or efficient solutions which ensure the compromise among the objectives. To solve our problem, we implemented an exact method based on  $\varepsilon$ -constraint. As the problem studied is NP-hard, the  $\varepsilon$ -constraint method is time and memory consuming. Consequently, we designed a bi-objective RVND-ILS algorithm based on Iterated Local Search metaheuristic (ILS) which uses a Random Variable Neighborhood Descent method as the local search phase (RVND).

**Keywords:** Home healthcare, Vehicle routing problem, MILP, Metaheuristics, Synchronization, Multi-objective optimization.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS . . . . .	iii
RÉSUMÉ . . . . .	v
ABSTRACT . . . . .	vi
TABLE DES MATIÈRES . . . . .	vii
LISTE DES TABLEAUX . . . . .	xii
LISTE DES FIGURES . . . . .	xiv
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS . . . . .	xv
INTRODUCTION GÉNÉRALE . . . . .	1
CHAPITRE 1 L'HOSPITALISATION À DOMICILE EN FRANCE . . . . .	4
1.1 Introduction . . . . .	4
1.2 La définition de l'HAD . . . . .	5
1.3 L'historique de l'HAD . . . . .	5
1.4 Les structures de l'HAD . . . . .	8
1.5 Les organismes autour de l'HAD . . . . .	8
1.5.1 L'Agence Technique de l'Information sur l'Hospitalisation (ATIH) . . . . .	9
1.5.2 La Fédération Nationale des Établissements d'Hospitalisation à Domicile (FNEHAD) . . . . .	9
1.5.3 L'Agence Régionale de Santé ARS . . . . .	10
1.6 Les partenaires de l'HAD . . . . .	10
1.6.1 Les EHPAD et autres établissements sociaux et médico-sociaux . . . . .	10

1.6.2	Les Structures de Soins Infirmiers à Domicile SSIAD et autres structures de maintien à domicile . . . . .	11
1.6.3	Les prestataires de dispositifs médicaux . . . . .	11
1.6.4	Les prestataires de traitement des déchets . . . . .	12
1.7	Les intervenants de l'HAD . . . . .	12
1.7.1	Intervenants externes à la structure HAD . . . . .	12
1.7.2	Intervenants salariés de l'HAD . . . . .	13
1.8	Le coût de l'HAD . . . . .	14
1.9	Les modes de prise en charge en HAD . . . . .	15
1.10	La trajectoire du patient dans l'HAD . . . . .	17
1.11	L'organisation des soins en HAD . . . . .	19
1.11.1	Présentation . . . . .	19
1.11.2	Problématiques . . . . .	20
1.12	L'organisation des soins : Mutualité Française Nord-Pas de Calais MFNPC . . . . .	20
1.12.1	Présentation de la structure MFNPC . . . . .	20
1.12.2	Mutualité Française Nord-Pas de Calais : enquête de satisfaction . . . . .	21
1.13	Motivations et objectifs des travaux de cette thèse . . . . .	24
1.14	Conclusion . . . . .	25

## CHAPITRE 2 LA CONCEPTION DES TOURNÉES DU PERSONNEL SOIGNANT

	AUX DOMICILES DES PATIENTS DANS LA LITTÉRATURE . . . . .	26
2.1	Introduction . . . . .	26
2.2	Problèmes de logistique de transport . . . . .	27
2.2.1	Représentation et notations d'un problème de logistique de transport . . . . .	27
2.2.2	Problème du voyageur de commerce TSP . . . . .	28
2.2.3	Problème de voyageurs de commerce multiples mTSP . . . . .	30
2.2.4	Problème de tournées de véhicules . . . . .	32
2.2.5	Discussions . . . . .	36
2.2.6	Complexité des problèmes de tournées de véhicules . . . . .	36

2.2.7	Problèmes de tournées de véhicules statiques/dynamiques . . . . .	37
2.2.8	Approches de résolution du VRP . . . . .	37
2.3	État de l'art sur les problèmes de tournées de véhicules VRP dans le contexte HAD . . . . .	43
2.3.1	Problèmes mono-objectif de tournées de véhicules VRP dans le contexte HAD . . . . .	44
2.3.2	La littérature des problèmes de conception de tournées de véhicules dans le contexte HAD : problèmes multi-objectif . . . . .	48
2.4	Conclusion . . . . .	51

### CHAPITRE 3 MODÉLISATION DE LA PLANIFICATION DES TOURNÉES DU PERSONNEL SOIGNANT AUX DOMICILES DES PATIENTS . . . . .

3.1	Introduction . . . . .	53
3.2	Présentation du problème . . . . .	53
3.3	Formulation mathématique du problème . . . . .	55
3.4	Étude expérimentale . . . . .	60
3.4.1	Présentation des instances . . . . .	60
3.4.2	Instance de simulation . . . . .	61
3.4.3	Expérimentations et résultats . . . . .	63
3.5	Conclusion . . . . .	64

### CHAPITRE 4 RÉOLUTION APPROCHÉE DU PROBLÈME DE TOURNÉES DE VÉHICULES AVEC LES CONTRAINTES DE FENÊTRES DE TEMPS ET DE SYNCHRONISATION DANS LE CONTEXTE DE L'HAD . . . . .

4.1	Introduction . . . . .	67
4.2	Présentation du problème . . . . .	69
4.3	Formulation mathématique du problème . . . . .	70
4.4	Méthode de résolution . . . . .	73
4.4.1	Heuristique constructive de la solution initiale . . . . .	75

4.4.2	Random Variable Neighborhood Descent RVND . . . . .	75
4.4.3	Perturbation de la solution . . . . .	79
4.5	Résultats Numériques . . . . .	79
4.5.1	Instances de simulation . . . . .	80
4.5.2	Expérimentations . . . . .	80
4.5.3	Analyse de la performance des opérateurs de la recherche locale . . . . .	81
4.6	Conclusion . . . . .	81

CHAPITRE 5 RÉSOLUTION BI-OBJECTIF DU PROBLÈME DE TOURNÉES DE VÉHICULES AVEC LES CONTRAINTES DE FENÊTRES DE TEMPS ET DE SYNCHRONISATION (VRPTWSyn) DANS L'HAD . . . . .		87
5.1	Introduction . . . . .	87
5.2	Problème VRPTWSyn bi-objectif . . . . .	89
5.2.1	Intérêt de l'étude . . . . .	89
5.2.2	Présentation du problème . . . . .	89
5.2.3	Formulation mathématique du problème bi-objectif VRPTWSyn . . . . .	90
5.2.4	Relation de dominance et efficacité . . . . .	92
5.3	Méthodes de résolution du problème bi-objectif VRPTWSyn . . . . .	94
5.3.1	La méthode $\varepsilon$ -constraint . . . . .	95
5.3.2	Implémentation conventionnelle de la méthode $\varepsilon$ -constraint . . . . .	96
5.3.3	Implémentation améliorée de la méthode $\varepsilon$ -constraint . . . . .	96
5.3.4	Algorithme bi-objectif RVND-ILS . . . . .	98
5.4	Expérimentations . . . . .	100
5.4.1	Instances de test . . . . .	101
5.4.2	Résultats de la méthode $\varepsilon$ -Constraint . . . . .	101
5.4.3	Résultats de l'algorithme bi-objectif RVND-ILS comparés aux résultats de l'implémentation améliorée de $\varepsilon$ -constraint . . . . .	103
5.5	Conclusion . . . . .	105

CONCLUSION ET PERSPECTIVES . . . . . 107

RÉFÉRENCES . . . . . 111

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Les différents modes de prise en charge autorisés en HAD[2] . . . . .	16
Tableau 1.2	Nombre de patients par jour par site, MFNPC, Sept. 2016 [25] . . . . .	20
Tableau 1.3	La satisfaction globale de la prise en charge des patients de la Mutualité Française Nord Pas de Calais [25] . . . . .	21
Tableau 1.4	La satisfaction des patients selon les critères de la prise en charge [25]	22
Tableau 2.1	Les problèmes de conception des tournées des soignants dans le contexte d’hospitalisation à domicile . . . . .	49
Tableau 2.2	Contributions dans les chapitres 3, 4 et 5 . . . . .	52
Tableau 3.1	Données relatives aux services . . . . .	61
Tableau 3.2	Affinité entre les patients et les ressources . . . . .	61
Tableau 3.3	Qualifications du personnel soignant . . . . .	62
Tableau 3.4	Matrice des distances . . . . .	62
Tableau 3.5	Valeurs des quatres fonctions objectifs pour chaque fonction-objectif optimisée . . . . .	62
Tableau 3.6	Temps d’arrivée en minutes et affectation du personnel soignant aux services pour la fonction-objectif minimisation du temps de déplacements.	63
Tableau 3.7	Résultats des expérimentations pour la fonction-objectif équilibre de la charge de travail . . . . .	64
Tableau 3.8	Résultats des expérimentations pour la fonction-objectif temps d’attente . . . . .	65
Tableau 3.9	Résultats des expérimentations pour la fonction-objectif temps total de déplacements . . . . .	65
Tableau 3.10	Résultats des expérimentations pour la fonction-objectif des préférences des patients envers les soignants . . . . .	66
Tableau 4.1	Comparaison des solutions et des temps de calcul pour la fonction-objectif temps de trajet total (4.1) . . . . .	82

Tableau 4.2	Comparaison des solutions et des temps de calcul pour la fonction-objectif des préférences (4.2) . . . . .	83
Tableau 4.3	Comparaison des solutions et des temps de calcul pour la fonction-objectif équilibre de la charge de travail (4.3) . . . . .	84
Tableau 5.1	Comparaison de la performance de l'implémentation conventionnelle et améliorée de la méthode $\varepsilon$ -Constraint pour les petites instances . . .	102
Tableau 5.2	Implémentation améliorée de la méthode $\varepsilon$ -Constraint pour les grandes instances . . . . .	103
Tableau 5.3	Résultats de l'implémentation de $\varepsilon$ -constraint et l'algorithme bi-objectif RVND-ILS . . . . .	104

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	La trajectoire du patient dans l’HAD . . . . .	18
Figure 1.2	La matrice importance/performance mettant en perspective la satisfaction des patients avec l’importance qu’ils accordent aux différents critères évalués [25] . . . . .	23
Figure 2.1	Exemple de solution pour un problème VRP . . . . .	33
Figure 4.1	Opérateur d’échange . . . . .	78
Figure 4.2	Opérateur d’insertion aléatoire . . . . .	78
Figure 4.3	Opérateur des meilleures multiples insertions . . . . .	78
Figure 4.4	$2opt^*$ . . . . .	79
Figure 4.5	Évaluation de la performance des opérateurs pour les trois fonctions objectifs . . . . .	85
Figure 5.1	Implémentation conventionnelle de la méthode $\varepsilon$ -constraint . . . . .	97
Figure 5.2	Exemple d’hypervolume pour deux ensembles de solutions . . . . .	100
Figure 5.3	Exemple d’un Front de Pareto exact et approximatif pour l’instance 1s	105
Figure 5.4	Exemple d’un Front de Pareto exact et approximatif pour l’instance 6s	106

**LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS**

HAD	Hospitalisation À Domicile
ATIH	Agence Technique de l'Information sur l'Hospitalisation
FNEHAD	Fédération Nationale des Établissements d'Hospitalisation A Domicile
ILS	Iterated Local Search
VND	Variable Neighborhood Descent
RVND	Random Variable Neighborhood Descent
VRPTWSyn	Vehicle Routing Problem with Time Windows and Synchronization Constraints
MFNPC	Mutualité Française Nord-Pas de Calais

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'Hospitalisation À Domicile (HAD) est une offre émergente en France. Elle permet au patient atteint de pathologies graves, aiguës ou chroniques, évolutives et/ou instables de bénéficier à son domicile, de soins médicaux et paramédicaux complexes et coordonnés [6]. La notion du domicile est étendue et les établissements d'hospitalisation à domicile peuvent intervenir également dans les établissements d'hébergement à caractère social ou médico-social [49].

Compte tenu de l'engorgement des hôpitaux, de la demande croissante de la population d'être soignée dans son environnement familial, de l'augmentation de l'espérance de vie, du vieillissement démographique et de la recrudescence de plusieurs maladies chroniques, les pouvoirs publics se sont fixés pour objectif un doublement d'ici 2018 de la part d'activité de l'HAD, la portant à 1,2 % de l'ensemble des hospitalisations complètes. La stratégie nationale de santé propose de renforcer le positionnement de l'HAD au sein du système de santé. Elle vise à développer la polyvalence et les prises en charge en hospitalisation à domicile et à intensifier les interventions au bénéfice des personnes âgées [86].

Reconnues en 2009 comme des établissements de santé à part entière, les structures d'hospitalisation à domicile sont soumises aux mêmes obligations que les établissements d'hospitalisation conventionnelle. Elles sont dans l'obligation d'assurer la qualité, la sécurité, la permanence et la continuité des soins pour les patients et de mobiliser une équipe pluridisciplinaire (médecin coordinateur, médecin traitant, infirmiers, personnel paramédical, etc.) coordonnée et médicalisée pour la mise en œuvre des soins.

L'enjeu majeur des établissements HAD est l'amélioration de la prise en charge du patient tout en assurant des gains d'efficience pour l'assurance maladie. Par conséquent, elles doivent s'engager dans l'amélioration de leurs compétences dans tous les domaines de leur fonctionnement : gestion, organisation, soins, circuit du médicament, etc., en considération des contraintes spécifiques de l'intervention au domicile. C'est dans ce cadre qu'intervient notre thèse. Nous nous intéressons tout particulièrement à l'amélioration de la planification des

tournées du personnel soignant aux domiciles des patients. Il s'agit de répondre à la demande des patients tout en réduisant les coûts. C'est l'une des problématiques majeures relatives à l'HAD, elle est de nature complexe et nécessite des outils performants d'aide à la décision. Nous proposons dans le cadre de cette thèse des solutions basées sur la programmation linéaire mixte et des (méta)heuristiques afin d'établir une planification quotidienne des soins à domicile.

Cette thèse est structurée en cinq chapitres, qui synthétisent nos travaux de recherche.

Le chapitre 1 présente l'hospitalisation à domicile en France, une description des différents acteurs et modes de prise en charge est donnée. Les résultats de l'enquête de satisfaction menée auprès des patients de la Mutualité Française Nord-Pas de Calais sont présentés à la fin de ce chapitre.

Le chapitre 2 introduit le problème traité dans cette thèse, les difficultés recensées et les approches de résolutions possibles et présente une revue de la littérature concernant les travaux réalisés sur la planification des tournées du personnel soignant en HAD.

Dans le chapitre 3, nous proposons une modélisation basée sur la programmation linéaire mixte pour le problème de planification des tournées du personnel soignant en HAD.

Dans le chapitre 4, nous développons une méta-heuristique pour la résolution de cette problématique de gestion des activités de soins en HAD. Cette méta-heuristique est testée sur un ensemble d'instances. Les résultats de ces tests sont comparés à ceux obtenus par la littérature.

Dans le chapitre 5, nous abordons l'optimisation bi-objectif, étant donné la nature multi-objectif du problème étudié (minimisation du temps de trajet total entre les domiciles des patients, maximisation des préférences des patients envers les soignants, l'équilibrage des tournées, etc.). Nous choisissons d'optimiser simultanément les deux premiers objectifs. Nous développons une approche de résolution basée sur une méthode exacte  $\varepsilon$ -constraint et une heuristique basée sur la méta-heuristique ILS (Iterated Local Search).

Enfin, nous terminons par une conclusion et des perspectives pour faire un bilan de nos

travaux et contributions, et présenter nos perspectives de recherche pour le futur.

# CHAPITRE 1

## L'HOSPITALISATION À DOMICILE EN FRANCE

### 1.1 Introduction

Le déséquilibre financier du système d'assurance maladie et la volonté de la rationalisation de l'offre des soins amènent les pouvoirs publics à vouloir réserver les séjours dans les hôpitaux, aux problèmes médicaux les plus graves et aux actes techniquement les plus complexes [6]. Cela exige le développement structuré et sécurisé d'autres modes de prise en charge hors des murs de l'hôpital. Plusieurs structures existent déjà, tels que les Services de Soins Infirmiers A Domicile (SSIAD), le Maintien À Domicile (MAD), et l'Hospitalisation À Domicile (HAD). Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes intéressés à l'hospitalisation à domicile. Souvent confondue avec les autres structures de prise en charge à domicile, l'HAD se distingue par la complexité et la fréquence de ses actes ; Elle permet de délivrer des actes médicaux comparables à ceux pratiqués à l'hôpital. Le développement de l'hospitalisation à domicile est fortement motivé par [5, 6] :

- La volonté de maîtriser les dépenses de santé,
- L'apparition de plusieurs maladies chroniques,
- L'aspiration de toute personne malade à éviter ou à raccourcir un séjour à l'hôpital et être soigné dans son environnement familial,
- Le vieillissement de la population et l'accroissement du nombre de personnes âgées souffrant de polyopathologies et souhaitant rester dans leur cadre de vie habituel (domicile ou établissement d'accueil de personnes âgées).

Ce chapitre est organisé en trois sections. Dans la première section, nous présentons une description détaillée des structures HAD, leurs rôles, partenaires, et intervenants nécessaires

pour le bon déroulement des soins. La deuxième section consiste à présenter l'organisation des soins autour de l'HAD et les différents modes de prise en charge. Dans la troisième section nous exposons les résultats de l'enquête de satisfaction menée auprès des patients de la Mutualité Française Nord-Pas de Calais.

## **1.2 La définition de l'HAD**

L'hospitalisation à domicile (HAD) est une forme d'hospitalisation qui propose un système organisé de soins complexes et coordonnés entre l'hôpital et le médecin traitant de ville [49]. L'HAD vise à coordonner les interventions de plusieurs professionnels de santé afin d'assurer, au lieu de vie du patient, une prise en charge globale qui garantit la qualité et la sécurité des soins de l'hôpital et le confort de chez soi.

Le décret du 2 octobre 1992 définit les structures d'hospitalisation à domicile comme suit : « Les structures d'hospitalisation à domicile permettent 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. Les soins en HAD se différencient de ceux habituellement dispensés à domicile par la complexité et la fréquence des actes. »

La circulaire du 30 mai 2000 précise : « 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. »

## **1.3 L'historique de l'HAD**

La première forme d'hospitalisation à domicile nommée « Home Care » a vu le jour aux Etats-Unis en 1947. Au lendemain de la seconde guerre mondiale, le professeur Bluestone, chef de service à l'hôpital Montefiore de New York, se trouve confronté à une surpopulation de patients. C'est ainsi qu'est créé en 1947, la première forme d'hospitalisation à domicile nommée « Home Care », fondée sur le principe du déplacement des médecins hospitaliers aux

domiciles des patients.

L'évolution de l'HAD au fil des années, en France, tient compte de l'évolution du cadre juridique, des impératifs économiques et de la volonté politique des acteurs dans les régions (tutelles, établissement de santé, secteur libéral, etc.).

— 1951 : Un dispositif similaire au « home care » voit le jour à Paris, sur l'initiative du professeur Siguier de l'hôpital Tenon à partir de son service de médecine générale, également confronté à une surpopulation de patients.

— 1957 : La première structure officielle d'HAD est créée à l'Assistance Publique–Hôpitaux de Paris (AP-HP) organisée avec les hôpitaux Tenon et St Louis. La vocation de cette première expérience en France est de désencombrer les hôpitaux en s'appuyant sur la médecine libérale pour assurer la continuité des soins aux domiciles des patients.

— 1958 : La deuxième structure d'HAD « Santé Service » destinée à des malades cancéreux voit le jour à Puteaux sur l'initiative du Professeur Denoix, directeur de l'Institut Gustave Roussy de Villejuif.

— 1960 : La première convention est signée entre la caisse primaire d'assurance maladie et l'HAD de l'AP-HP d'une part, Santé Service d'autre part. Dans cette convention, un certain nombre d'acteurs HAD est représenté : le médecin hospitalier, le médecin traitant, l'assistante sociale, l'infirmière, l'aide-soignante et l'aide-ménagère.

— 1965 : La création du secteur de pédiatrie en HAD.

— 1970 : L'HAD obtient sa reconnaissance légale par la loi hospitalière du 31 décembre 1970.

— 1973 : La création de la Fédération Nationale des Établissements d'Hospitalisation à Domicile (FNEHAD) qui permet de réunir les structures d'HAD ; La France comptait une dizaine de structures d'HAD, essentiellement urbaines. la Fédération intervient à tous les niveaux : de la défense de l'activité d'HAD auprès des grandes instances politiques à l'organisation de manifestations et de formations. Son action vise à garantir un développement pérenne de l'offre des soins en HAD.

— 1975 : L'ouverture du premier service de kinésithérapie à domicile.

- 1978 : L'ouverture du premier service d'obstétrique et d'ergothérapie en HAD.
- 1986 : L'ouverture du premier service de diététique en HAD.
- 1991 : La progression des structures HAD étant lente, du fait d'un vide juridique et d'une opacité de la situation sur le terrain. La législation reconnaît donc l'HAD comme une alternative à part entière à l'hospitalisation traditionnelle.
- La décennie 2000 : Un intérêt renouvelé est porté aux HAD. Cette décennie est propice à des améliorations du statut de l'HAD. L'évolution de la réglementation et de la définition du rôle de l'HAD et des différents intervenants posent des bases nouvelles pour une intensification du développement de l'HAD.
- 2007 : La circulaire du 5 octobre 2007 autorise les établissements d'HAD à prendre en charge des patients en établissement d'hébergement pour personnes âgées dépendantes (EHPAD) ou non dépendantes (EHPA) avec certaines restrictions (seulement pour huit modes de prise en charge à titre principal).
- 2008 : Plan national pour le développement des soins palliatifs et l'accompagnement en fin de vie au domicile.
- 2009 : La loi Hôpital Patients Santé Territoire (HPST) du 21 juillet 2009 reconnaît l'HAD comme une hospitalisation à part entière et non plus comme une simple alternative à l'hospitalisation conventionnelle, et étend la notion du domicile au lieu de résidence, comme les établissements avec hébergement relevant du code de l'action sociale et des familles.
- 2013 : Une circulaire de décembre 2013 prévoit à l'horizon 2018, soit en cinq ans, un doublement de l'activité HAD constatée en 2011.
- 2015 : La loi du 28 décembre 2015 relative à l'adaptation de la société au vieillissement donne comme priorité « de permettre à ceux qui le souhaitent de vivre à domicile dans de bonnes conditions : c'est la préférence des personnes âgées et des familles. »
- 2017 : Les restrictions d'intervention de l'HAD en EHPAD sont supprimées depuis le 1er mars 2017.

Depuis les années 2000, les pouvoirs publics ont constamment accompagné la structuration des HAD et l'hospitalisation à domicile a acquis au fil du temps souplesse, adaptabilité et savoir-faire technique. Malgré la nécessité de développer des structures d'hospitalisation à domicile, la progression des HAD en France reste assez lente.

#### **1.4 Les structures de l'HAD**

Les structures d'HAD ont des statuts variés, publics ou privés (à but commercial ou à but non lucratif), rattachées à un établissement hospitalier ou autonome (associatif ou mutualiste par exemple). Elles sont certifiées tous les 4 ans par la haute autorité de santé (HAS) dans les mêmes conditions que les établissements hospitaliers classiques.

Soumises, selon la loi, aux mêmes réglementations et obligations que les établissements hospitaliers classiques, elles répondent à toutes les obligations, notamment en matière de sécurité, de qualité, de continuité des soins 24H/24 et 7j/7 et de respect des droits des patients.

A l'instar des établissements hospitaliers avec hébergement, les HAD sont soumis à :

- L'autorisation d'activités délivrée par l'État après remise d'un dossier complet ;
- La certification délivrée par la Haute Autorité de Santé (HAS) qui garantit la qualité de la prise en charge des malades ;
- La lutte contre les maladies nosocomiales, les infections nosocomiales et la douleur ;
- La prévention des risques.

#### **1.5 Les organismes autour de l'HAD**

Il est important de présenter l'Agence Technique de l'Information sur l'Hospitalisation, la Fédération Nationale des Établissements d'Hospitalisation à Domicile, et l'Agence Régionale de Santé. Ces organismes se font toujours remarquer lors d'une recherche autour de l'hospitalisation à domicile. Nous expliquons le rôle de chacun ci-dessous.

### **1.5.1 L'Agence Technique de l'Information sur l'Hospitalisation (ATIH)**

l'Agence Technique de l'Information sur l'Hospitalisation (ATIH), fondée en 2000, est un établissement public de l'État à caractère administratif placé sous la tutelle des ministres chargés de la santé, des affaires sociales et de la sécurité sociale.

l'ATIH est un opérateur dans le recueil, la restitution et l'analyse de données des structures médico-sociales et des établissements de santé, notamment, les structures d'hospitalisation à domicile. En ce qui concerne les structures d'hospitalisation à domicile, l'agence s'intéresse à déterminer la place de l'HAD dans la filière de prise en charge hospitalière et d'analyser la provenance des patients de l'HAD. Grâce à la collecte, l'analyse et la diffusion des données HAD, des résultats sont actualisés chaque année sous forme d'indicateurs synthétiques, qui fournissent une mesure, en nombre de patients, de pourcentage en terme de mode de prise en charge, etc.

Ces résultats permettent de connaître l'activité des établissements HAD et la nature des pathologies prises en charge, et de suivre l'évolution des mesures nationales de la politique de santé.

### **1.5.2 La Fédération Nationale des Établissements d'Hospitalisation à Domicile (FNEHAD)**

L'un des organismes importants en relation avec l'hospitalisation à domicile est la fédération nationale des établissements d'hospitalisation à domicile (FNEHAD).

Créée en 1973, la fédération nationale des établissements d'hospitalisation à domicile est la seule fédération hospitalière spécifiquement dédiée à l'hospitalisation à domicile. Elle regroupe actuellement 308 établissements d'HAD [49] installés sur le territoire métropolitain et ultramarin, quel que soit leur statut juridique : public, privé non lucratif et privé lucratif. L'objectif de la FNEHAD est de promouvoir l'hospitalisation à domicile et de placer le malade au cœur d'un dispositif médicalisé organisé autour de lui, dans son environnement habituel.

La fédération a pour vocation de défendre l'activité d'HAD auprès des grandes instances politiques, d'organiser des manifestations, de mutualiser et de promouvoir l'expérience de ses adhérents, de réunir, de former et d'informer les professionnels de santé [49].

### **1.5.3 L'Agence Régionale de Santé ARS**

Les agences régionales de santé (ARS) sont chargées du pilotage régional du système de santé. Elles définissent et mettent en œuvre la politique de santé en région, au plus près des besoins de la population. Elles sont compétentes sur le champ de la santé dans sa globalité, de la prévention aux soins, à l'accompagnement médico-social [1].

En ce qui concerne l'hospitalisation à domicile, l'objectif des agences régionales de santé est de développer l'HAD et le positionner comme un relais entre l'hôpital et la médecine de ville.

## **1.6 Les partenaires de l'HAD**

Afin de bien prendre en charge les malades dans leurs lieux de vie habituels, les structures d'hospitalisation à domicile ont souvent besoin de nouer des conventions avec des partenaires tels que des établissements sociaux et médico-sociaux avec hébergement, des services de soins infirmiers à domicile, des prestataires de dispositifs médicaux ou des prestataires de traitement des déchets. Ces conventions permettent de formaliser les relations et les obligations respectives entre les partenaires.

### **1.6.1 Les EHPAD et autres établissements sociaux et médico-sociaux**

Les EHPAD sont des Établissements d'Hébergement pour Personnes Âgées Dépendantes (connus par maisons de retraite médicalisées) qui accueillent des personnes âgées de plus de 60 ans en situation de perte d'autonomie physique et/ou psychique, pour lesquelles un maintien à domicile n'est plus possible.

Ces structures médicalisées proposent aux résidents des soins médicaux personnalisés et leur offrent de l'aide dans la vie quotidienne (lever, coucher, toilette, repas, etc.), ainsi que des

services tels que la restauration, la blanchisserie et les animations. Un EHPAD peut être spécialisé dans les maladies comme Alzheimer, Parkinson ou dans des maladies dégénératives. Depuis 2007, La notion d'hospitalisation à domicile est étendue pour inclure les EHPAD ainsi que l'ensemble des établissements sociaux ou médico-sociaux avec hébergement (maisons d'accueil spécialisées, instituts médico-éducatifs, etc.).

Pour les établissements d'hébergement sociaux et médico-sociaux, l'HAD assure une prise en charge globale des patients en complétant les soins disponibles et en combinant ses moyens à ceux de l'entourage habituel. L'HAD n'a pas pour vocation de répondre aux besoins de soins habituellement assurés par l'établissement d'hébergement et n'intervient que sur les axes qui relèvent de ses compétences et de ses modes de prise en charge autorisés.

### **1.6.2 Les Structures de Soins Infirmiers à Domicile SSIAD et autres structures de maintien à domicile**

Les SSIAD interviennent auprès des personnes âgées malades ou dépendantes faisant l'objet d'une prescription médicale. Le personnel (infirmier, aide-soignant) assure des soins infirmiers et d'hygiène. Selon la circulaire du 1er décembre 2006, « L'HAD est complémentaire aux structures telles que les SSIAD, dont elle a vocation à prendre éventuellement le relais, si la situation du malade s'aggrave, et à contrario auxquels elle peut confier un malade stabilisé.»

### **1.6.3 Les prestataires de dispositifs médicaux**

Les prestataires de dispositifs médicaux sont des partenaires importants dans la prise en charge à domicile. Ils offrent un soutien logistique nécessaire pour la fourniture et la gestion du matériel médical, des équipements de soins et d'hygiène (lits médicaux, appareils de dialyse, d'oxygénothérapie, pompes ou pousses seringues, dispositifs de télésurveillance, mobiliers adaptés aux soins et au confort du patient, etc.).

#### 1.6.4 Les prestataires de traitement des déchets

Les déchets des activités de soins en HAD sont issus des activités de diagnostic, de suivi et de traitement préventif, curatif ou palliatif à domicile. La structure HAD peut faire appel à un prestataire de traitement des déchets qui s'engage à :

- garantir la collecte des déchets,
- livrer des emballages conformes,
- respecter la fréquence de collecte des déchets définie au préalable avec la structure HAD,
- procéder à l'élimination des déchets dans les délais imposés par la loi.

#### 1.7 Les intervenants de l'HAD

Une structure de l'HAD regroupe plusieurs intervenants/acteurs constituant une équipe pluridisciplinaire. Chaque acteur assume une fonction relative aux activités suivantes : la prise en charge du patient, la coordination des soins, l'environnement social du malade, suivi, aide et soutien du patient, etc.

L'acteur peut être un salarié de la structure, ou un libéral lié par des conventions avec l'HAD et indemnisé sur la base d'un forfait ou à l'acte.

##### 1.7.1 Intervenants externes à la structure HAD

Les intervenants libéraux externes à la structure HAD peuvent être choisis par le patient ou par son entourage mais doivent, afin de préserver la continuité des soins, être joignables pendant toute la durée de l'hospitalisation.

##### **Le médecin traitant :**

Il est le pivot de la prise en charge du patient à domicile. Il peut être le prescripteur de l'HAD ou bien choisi par le patient pour élaborer le projet thérapeutique en collaboration avec le médecin coordonnateur et assurer le suivi des soins.

**L'infirmier libéral :**

Il assure les soins des malades dans le strict respect des pratiques de l'hospitalisation à domicile.

**Le pharmacien d'officine :**

Il est le fournisseur des médicaments des malades, ceux-ci ayant le libre choix de leur pharmacien.

**Autres :**

Les masseurs kinésithérapeutes, orthophonistes, pédicures, diététiciens, aides-soignants, biologistes peuvent assurer la prise en charge de leurs patients s'ils le souhaitent, dans le respect des obligations de l'HAD.

**1.7.2 Intervenants salariés de l'HAD****Le responsable de l'établissement :**

Il est l'interface administrative des acteurs avec lesquels travaille l'établissement d'HAD, notamment les établissements hospitaliers, les professionnels libéraux, les prestataires locaux. Il assure la gestion de l'ensemble de l'équipe salariée.

**Le médecin coordonnateur :**

Il est le référent médical de la structure. Il pilote l'élaboration du protocole des soins préparés avec le médecin traitant. Il garantit la bonne exécution du protocole des soins, et la qualité de la prise en charge des malades et évalue avec le personnel soignant les prestations délivrées aux patients.

**L'infirmier coordonnateur :**

Il conduit la mission de coordination des soins des malades 24h/24 et 7j/7. Il organise et coordonne les interventions humaines et matérielles, et assure les relations avec les professionnels libéraux. Il est l'intermédiaire entre l'établissement HAD et les familles des patients.

**L'assistant social :**

Il évalue la capacité du domicile du patient et de son entourage à assurer et à maintenir

matériellement l'hospitalisation à domicile. Il mobilise des moyens matériels, humains et financiers pour garantir au malade une bonne qualité de vie.

#### **Le psychologue :**

L'intervention des psychologues est intégrée aux prestations proposées par les structures HAD. Si l'accompagnement psychologique est nécessaire, le psychologue soutient alors le patient et son entourage. Ce soutien peut aussi s'adresser aux soignants soumis à des situations complexes dans l'exercice de leur métier.

#### **L'aide-soignant :**

Il réalise des soins d'hygiène, de confort et de bien-être et assure une observation du patient permettant d'alerter les infirmiers coordonnateurs.

#### **Le masseur-kinésithérapeute :**

Il réalise des soins de rééducation pour le patient.

#### **Le diététicien :**

En cas de problèmes d'obésité, maigreur, diabète ou d'une thérapie qui nécessite des précautions alimentaires particulières, le diététicien décide avec le patient et/ou sa famille des objectifs et des moyens pour avoir un équilibre alimentaire.

#### **Le pharmacien :**

Il est le responsable de l'activité pharmaceutique au sein de la structure HAD, il assure la gestion, l'approvisionnement, la préparation et le contrôle des médicaments.

#### **Les cadres de santé :**

Ces acteurs ne participent pas directement aux processus des soins. Les cadres présents dans l'établissement HAD répondent à des questions d'ordre administratif, juridique, financier, gestion du personnel, qualité, gestion des risques ou informatique.

### **1.8 Le coût de l'HAD**

Selon le rapport d'activité 2016-2017 de la fédération nationale de l'hospitalisation à domicile (FNEHAD), le coût moyen d'une journée d'hospitalisation à domicile est de 198,2€ pour

l'assurance maladie. Ce coût est quatre fois moins cher que le coût d'une hospitalisation à l'hôpital [49].

Une structure HAD facture ses prestations à l'assurance maladie et les mutuelles dans les mêmes conditions qu'une hospitalisation classique, à l'exception du forfait hospitalier puisque la partie hébergement est à la charge du patient.

Les établissements HAD facturent leurs prestations à l'assurance maladie conformément à la tarification à l'activité qui leur est appliquée depuis 2005, les tarifs étant fixés chaque année par le ministère de la santé. Ces tarifs tiennent compte de la nature des soins prodigués, la complexité de la situation clinique, l'état de dépendance de la personne accueillie, la durée de sa prise en charge et l'évolution de son état de santé au cours du séjour.

### **1.9 Les modes de prise en charge en HAD**

Les critères d'admission d'un patient dans une structure HAD sont liés à la densité des soins et se réfèrent à une liste des modes de prise en charge autorisés en HAD [2].

Chaque mode de prise en charge 1.1 est défini par un code et un libellé<sup>1</sup>. Un patient peut avoir plusieurs modes de prise en charge. Le mode de prise en charge principale (MPP) est celui qui suscite la consommation la plus importante de ressources : frais de personnels, de location de matériel et des médicaments.

Si le patient bénéficie d'un autre mode de prise en charge, ayant consommé moins de ressources que le mode de prise en charge principale, ce deuxième mode est défini comme un mode de prise en charge associé (MPA). Si le patient bénéficie d'un troisième mode de prise en charge, il est renseigné en tant que mode de prise en charge supplémentaire. Il est possible d'enregistrer jusqu'à 5 modes de prise en charge documentaires (MDP). S'il en existe d'avantage, l'enregistrement de ceux qui ont consommé le plus de ressources est privilégié.

Les modes de prise en charge numérotés de 26 à 28 ne sont admis qu'en tant que modes de prise en charge documentaires [2].

---

1. Depuis 2015, le mode de prise en charge n=20 est supprimé

Code	Libellé depuis 2012 des modes de prise en charge	MPP	MPA	MPD
00	Pas de mode de prise en charge associé	-	X	-
01	Assistance respiratoire	X	X	X
02	Nutrition parentérale	X	X	X
03	Traitement intraveineux	X	X	X
04	Soins palliatifs	X	X	X
05	Chimiothérapie anticancéreuse	X	X	X
06	Nutrition entérale	X	X	X
07	Prise en charge de la douleur	X	X	X
08	Autres traitements	X	X	X
09	Pansements complexes et soins spécifiques (stomies compliquées)	X	X	X
10	Post traitement chirurgical	X	X	X
11	Rééducation orthopédique	X	X	X
12	Rééducation neurologique	X	X	X
13	Surveillance postchimiothérapie anticancéreuse	X	X	X
14	Soins de nursing lourds	X	X	X
15	Éducation du patient et de son entourage	X	X	X
17	Surveillance de radiothérapie	X	X	X
18	Transfusion sanguine	X	X	X
19	Surveillance de grossesse à risque	X	X	X
21	Post partum pathologique	X	X	X
22	Prise en charge du nouveau-né à risque	X	-	-
24	Surveillance d'aplasie	X	X	X
25	Prise en charge psychologique et/ou sociale	-	X	X
26	Traitement intraveineux, un seul passage quotidien	-	-	X
27	Éducation du patient et/ou son entourage chez un enfant ou un adolescent de moins 18 ans	-	-	X
28	Prise en charge psychologique et/ou sociale chez les patients de moins de 18 ans	-	-	X
29	Sortie précoce de chirurgie	X	-	-

Tableau 1.1 Les différents modes de prise en charge autorisés en HAD[2]

Avec le vieillissement de la population, l'augmentation de l'espérance de vie et l'apparition de plusieurs maladies chroniques, les soins palliatifs comptent parmi les modes de prise en charge les plus enregistrés en HAD [49]. La prise en charge palliative à domicile concerne les patients atteints d'une maladie grave en phase avancée ou terminale mettant en jeu à plus ou moins court terme son pronostic vital. Les soins prodigués visent à réduire la douleur, à soulager la souffrance et à apporter le soutien psychique au patient tout en gardant le confort

du domicile et la présence et le soutien de l'entourage.

Le développement des soins palliatifs et l'accompagnement en fin de vie en HAD est fortement motivé par les pouvoirs publics. En 2016, 24% du total des journées de l'HAD ont été réservés à ce mode de prise en charge. Ce chiffre pourrait devenir plus important dans les années à venir grâce aux préconisations du plan national 2015-2018 [86] pour le développement des soins palliatifs et l'accompagnement en fin de vie [49].

### **1.10 La trajectoire du patient dans l'HAD**

Une hospitalisation à domicile est avant tout un choix du malade ou/et de sa famille, le consentement de celui-ci et/ou de sa famille est nécessaire. La demande d'admission dans une structure HAD est faite exclusivement sur prescription médicale du médecin traitant ou du médecin hospitalier suite à une hospitalisation dans un hôpital ou une clinique avec l'accord du médecin traitant du patient, qui assure la prise en charge médicale tout au long du séjour. L'hospitalisation à domicile concerne des malades de tous les âges – enfants, adolescents, adultes– atteints de pathologies graves, aiguës ou chroniques, souvent multiples, évolutives et/ou instables [6]. L'admission en HAD n'est possible qu'après évaluation de la capacité du lieu de vie du patient et de son entourage à assurer et à maintenir l'hospitalisation à domicile. Une visite au domicile du malade est donc nécessaire afin de définir les modalités d'installation du malade et les besoins en fournitures matérielles.

Les conditions suivantes sont donc nécessaires pour l'admission en HAD :

- Le consentement du patient et/ou de sa famille,
- La prescription médicale du médecin traitant ou du médecin hospitalier avec l'accord du médecin coordonnateur de la structure HAD,
- La possibilité de la prise en charge médicale à domicile afin de garantir au malade une bonne qualité de vie,
- La prise en charge satisfait les critères d'admission fixés par la sécurité sociale.

La demande d'admission étant jugée recevable par le directeur de la structure, le médecin traitant, en coordination avec le médecin coordonnateur de la structure HAD et l'équipe soignante HAD, établit le projet thérapeutique du patient pour une période limitée mais révisable en fonction de l'évolution de l'état de santé du patient.

La prise en charge peut se faire au domicile du patient ou dans un établissement d'hébergement pour personnes âgées dépendantes (EHPAD) ou non dépendantes (EHPA). Le séjour d'un patient en HAD est défini comme la période de soins comprise entre le jour d'admission et le jour de la sortie du patient, ces deux jours étant inclus [6].

A l'issue de cette période, si l'objectif thérapeutique est atteint, les patients restent dans leurs lieux de vie. Sinon ils sont redirigés, selon l'évolution de leur état de santé, vers l'hôpital ou une autre forme de prise en charge à domicile (SSIAD, MAD, etc.).

Le séjour du patient en HAD peut être interrompu si le directeur de l'HAD déclare une impossibilité de pratiquer les soins au domicile ou si le patient ne désire plus être pris en charge. La fin de séjour en HAD est prononcée sur prescription médicale du médecin coordonnateur après accord du médecin traitant.

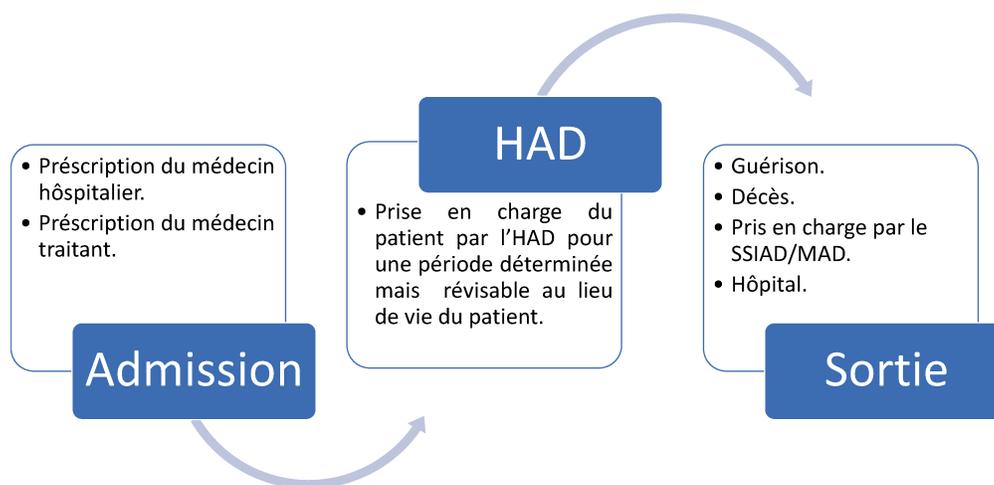


Figure 1.1 La trajectoire du patient dans l'HAD

## 1.11 L'organisation des soins en HAD

### 1.11.1 Présentation

L'organisation des soins en HAD peut différer d'une structure à une autre. En effet, certaines disposent de leurs propres équipes soignantes, tandis que d'autres n'assurent qu'une fonction de coordination entre les professionnels de santé libéraux, ou alors disposant de salariés et faisant appel, en même temps, à des libéraux. Mais, toute structure HAD doit assurer la continuité et la permanence des soins à ses patients. Les structures HAD doivent mettre à disposition du patient et de son entourage une permanence téléphonique; un infirmier coordinateur, salarié de l'établissement d'HAD, est d'astreinte téléphonique 7 jours/7 et 24 heures/24. Certains établissements offrent la possibilité de déplacements d'infirmiers à domicile la nuit. L'infirmier libéral et/ou le médecin traitant peuvent être sollicités également. En cas d'urgence, l'infirmier coordinateur peut organiser l'intervention des secours.

La planification des soins se fait après l'admission du dossier du patient dans la structure HAD. Les protocoles des soins sont établis par le médecin traitant en coordination avec le médecin coordonnateur. L'ensemble du personnel participant aux processus de soins, salariés de l'HAD et éventuellement des libéraux, est communiqué au patient et à sa famille. Le projet thérapeutique est expliqué également au patient et à son entourage lors d'une première réunion dont l'objectif est de s'assurer des bonnes conditions de l'installation du patient.

Les différents intervenants HAD (salariés et libéraux) travaillent en coordination afin d'assurer au malade une prise en charge de qualité et de prévenir les risques inhérents à toute activité médicale et paramédicale. Ils organisent et planifient l'attribution des soins afin de coordonner au mieux leurs interventions au domicile du patient, en prenant en considération dans la mesure du possible, les souhaits des patients et/ou de leurs familles. Le suivi de la prise en charge s'effectue par des visites régulières de l'infirmier coordonnateur au domicile du patient. Si des évolutions dans l'état de santé du patient le justifient, le projet thérapeutique est réadapté par le médecin traitant en coordination avec le médecin coordonnateur de la structure HAD, et les différents intervenants concernés sont informés lors de réunions

régulières de suivi.

### 1.11.2 Problématiques

La planification des soins est un processus particulièrement complexe qui se caractérise par une forte présence du facteur humain. Benzarti et al. [13] identifient les facteurs de complexité auxquels sont confrontées les structures d'HAD, parmi lesquels nous citons : la diversité de l'offre de services en fonction des pathologies de prise en charge et des différents protocoles de soins, l'incertitude relative à la disponibilité des patients et des ressources humaines/matérielles, la distinction entre le personnel soignant en fonction du niveau d'expérience, la qualité des soins, l'ordonnancement des activités de chaque personnel soignant en déterminant l'ordre dans lequel les visites vont être réalisées, la répartition équitable des charges de travail entre les différents professionnels de santé, la satisfaction des patients, la réactivité face aux demandes imprévues (urgences) et la maîtrise des coûts.

## 1.12 L'organisation des soins : Mutualité Française Nord-Pas de Calais MFNPC

### 1.12.1 Présentation de la structure MFNPC

La Mutualité Française Nord-Pas de Calais compte cinq sites d'hospitalisation à domicile dans le Pas-De-Calais : Saint Omer, Douai, Calais, Beauvois en Cambrésis et Dunkerque (Tableau 1.2).

Site	Patients/jour
HAD de Calais-Saint-Omer	87
HAD de Douai	69
HAD du Cambrésis	51
HAD de Flandre Maritime	77
<b>TOTAL</b>	286

Tableau 1.2 Nombre de patients par jour par site, MFNPC, Sept. 2016 [25]

Afin d'améliorer la planification des soins de la Mutualité Française Nord-Pas de Calais, nous

avons travaillé en collaboration avec le laboratoire Lille Économie Management (LEM) dans le cadre d'un projet de recherche. Ce dernier a été mené en deux phases. La première consiste à réaliser une enquête de satisfaction (portée par l'équipe LEM) afin d'identifier les critères de satisfaction les plus significatifs d'un patient en HAD. La deuxième phase (que nous portons), considère les résultats de l'enquête pour la conception d'outils d'aide à la décision pour la planification des soins à domicile.

### 1.12.2 Mutualité Française Nord-Pas de Calais : enquête de satisfaction

L'enquête de satisfaction a été menée auprès des patients de la Mutualité Française Nord-Pas de Calais. L'objectif de cette enquête est d'améliorer la prise en charge des patients à domicile en prenant en considération le facteur humain (satisfaction des patients et du personnel soignant).

Le Tableau 1.3 répond à la question de la satisfaction des patients de la prise en charge globale. Près de 41% des usagers estiment que la prise en charge répond à leurs attentes, environ 36% la jugent plutôt satisfaite. 23,5% estiment en revanche, qu'elle est plutôt non satisfaite.

<b>Evaluation des attentes</b>	<b>pourcentage</b>
Attentes plutôt non satisfaites	23.5%
Attentes plutôt satisfaites	35.8%
Attentes complètement satisfaites	40.7%
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>

Tableau 1.3 La satisfaction globale de la prise en charge des patients de la Mutualité Française Nord Pas de Calais [25]

Quatorze critères de satisfaction sont identifiés. Une enquête de satisfaction a été menée auprès d'un échantillon représentatif des patients HAD de la Mutualité Française Nord-Pas de Calais. Le Tableau 1.4 représente le taux de satisfaction des patients selon le critère identifié. Nous référons le lecteur au rapport [25] pour plus de détails sur les résultats de cette enquête.

	<b>plutôt pas satisfait</b>	<b>plutôt satisfait</b>	<b>tout à fait satisfait</b>
L'information reçue lors de l'orientation en HAD	15.6%	32.5%	51.9%
L'information reçue sur les soins prodigués	16.5%	31.6%	51.9%
L'information reçue sur les formalités administratives	7.2%	40.6%	52.2%
L'information reçue sur le déroulement général	13.2 %	42.4%	44.7%
Des soins reçus	8.8 %	30%	61.3%
De la gestion de la douleur	10.8 %	17.6%	71.6%
De la coordination concernant la prise en charge	19.7 %	34.2%	46.1%
De la part que vous pouvez prendre dans les soins	8.6 %	41.4%	50%
Du respect de l'intimité	3.8 %	23.1%	73.1%
De l'écoute des professionnels	3.8 %	25.0%	71.3%
Des horaires de la prise en charge	32.5%	33.8%	33.8%
De la réactivité du service en cas d'urgence	7.2%	23.2%	69.6%
Du respect de votre vie privée	2.5%	25.3%	72.2%
Du professionnalisme des intervenants	6.3%	31.6%	62.0%

Tableau 1.4 La satisfaction des patients selon les critères de la prise en charge [25]

Les résultats aux quatorze critères de satisfaction retenus attirent l'attention sur la sous-représentation des « tout à fait satisfait » sur les critères suivants : les horaires et la coordination de la prise en charge.

La matrice importance/performance, comme le montre la figure 1.2, permet de mettre en perspective la satisfaction des patients avec l'importance qu'ils accordent aux différents critères évalués. En haut à droite, apparaissent les critères correspondant aux points forts. L'HAD est jugée positivement sur des critères très importants pour les patients. Il s'agit du professionnalisme des intervenants, du respect de la vie privée, des soins reçus, et de la réactivité en cas d'urgence. En bas à gauche se situe une zone « neutre ». Ces critères font l'objet d'une satisfaction moindre mais ils sont peu importants pour les patients. On y trouve l'information reçue sur le déroulement général de la prise en charge et l'information reçue lors de l'orientation en HAD. En bas à droite, une zone « à maintenir » qui comporte des critères bien évalués mais ils sont d'une importance moindre pour les usagers. Il s'agit des critères suivants : l'information reçue sur les soins prodigués, celle donnée sur les formalités

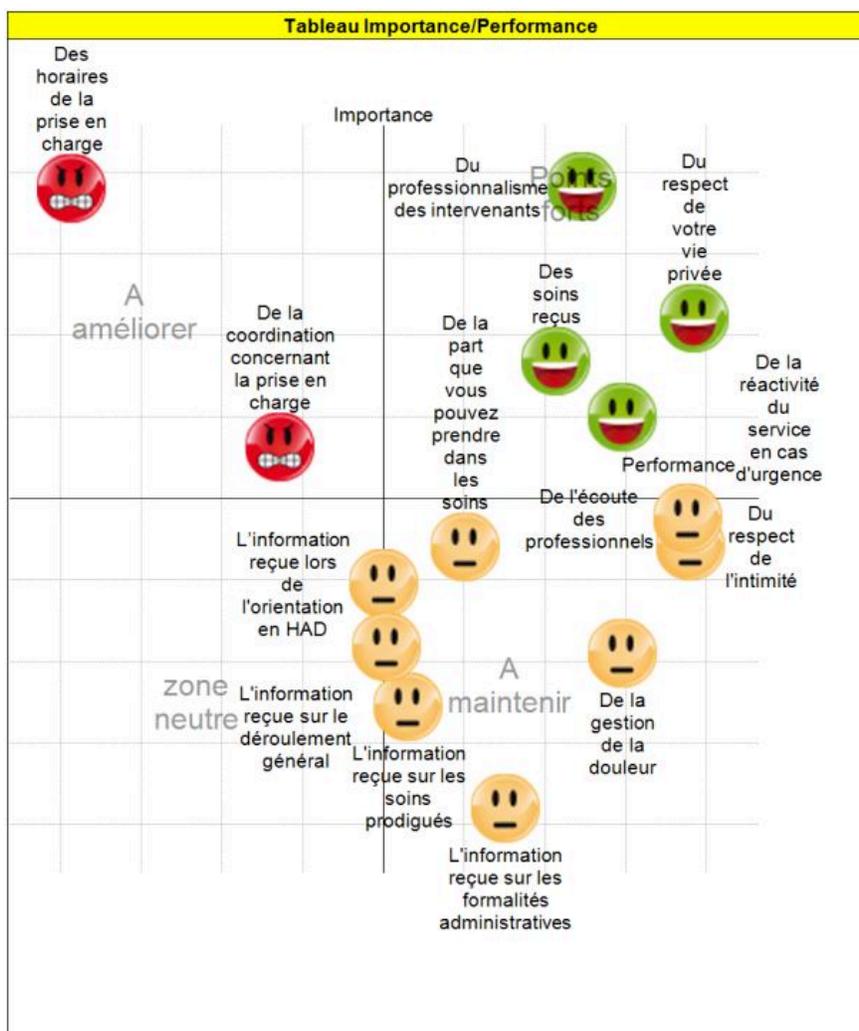


Figure 1.2 La matrice importance/performance mettant en perspective la satisfaction des patients avec l'importance qu'ils accordent aux différents critères évalués [25]

administratives, la gestion de la douleur, le respect de l'intimité, l'écoute des professionnels et la part que les usagers peuvent prendre dans les soins.

En haut à gauche se situe la zone prioritaire de progrès qui indique les deux critères importants peu satisfaisants : les horaires de la prise en charge et la coordination de la prise en charge [25] .

### **1.13 Motivations et objectifs des travaux de cette thèse**

L'enjeu majeur des établissements HAD est l'amélioration de la prise en charge du patient à domicile tout en assurant des gains d'efficience pour l'assurance maladie. Par conséquent, elles doivent s'engager dans l'amélioration de leurs compétences dans tous les domaines de leur fonctionnement, y compris l'organisation et la planification des soins.

Nous nous intéressons, dans le cadre de cette thèse, à cette problématique en particulier. Considérons un ensemble de patients ayant besoin d'un ensemble de services (soins), le problème consiste à concevoir les tournées des soignants, en respectant certaines contraintes liées à l'intervention aux domiciles. Selon les résultats de l'enquête de satisfaction menée auprès de la Mutualité Française Nord-Pas de Calais [25], les contraintes liées aux horaires de prise en charge (fenêtres de temps) et à la coordination des visites des soignants aux domiciles des patients (synchronisation des ressources) sont très importantes et doivent être considérées lors de la planification des soins.

Notre objectif est de concevoir des outils d'aide à la décision afin d'optimiser la planification des services d'hospitalisation à domicile, et de proposer au décideur HAD une solution optimale correspondant aux tournées des soignants aux domiciles des patients.

Compte tenu de la diversité des acteurs (patients, soignants, administration HAD) impliqués dans la planification, il est très rare de trouver une solution qui répond aux attentes de tous les acteurs. Le problème multi-objectif doit être considéré dans le contexte HAD afin de proposer au décideur un ensemble de solutions de "compromis". Nous nous intéressons dans cette thèse, à un problème bi-objectif afin de réaliser une planification optimale des tournées qui répond au mieux aux attentes (critères) des patients et de la structure HAD.

## 1.14 Conclusion

L'hospitalisation à domicile est un système complexe et difficile à gérer de point de vue humain et matériel. De ce fait, les structures de l'HAD doivent être parfaitement organisées afin d'assurer une prise en charge de qualité aux patients, et de respecter la charge de travail des soignants, tout en réduisant les coûts relatifs aux processus des soins.

Nous nous intéressons, dans le cadre de cette thèse, à la conception des tournées du personnel soignant chez les patients. Nous prenons en considération la satisfaction des patients exprimée dans les résultats de l'enquête menée auprès de la Mutualité Française Nord-Pas de Calais et nous intégrons les contraintes des horaires de la prise en charge et de la coordination des interventions du personnel au domicile du patient dans la problématique étudiée.

La conception des tournées du personnel soignant aux domiciles des patients appartient à la famille des problèmes de tournées de véhicules et des problèmes de voyageurs de commerce multiples.

Le chapitre suivant aborde plus en détail la problématique traitée, les différentes approches de résolution existantes dans la littérature et les travaux menés sur l'optimisation des tournées dans le contexte HAD.

## CHAPITRE 2

### LA CONCEPTION DES TOURNÉES DU PERSONNEL SOIGNANT AUX DOMICILES DES PATIENTS DANS LA LITTÉRATURE

#### 2.1 Introduction

Les structures d'hospitalisation à domicile se développent dans de nombreux pays industrialisés, notamment en France où 4,8 millions de journées ont été consacrées en 2016 [49]. Elles sont soumises aux mêmes obligations que dans les hôpitaux conventionnels. Elles doivent fournir des soins complets et coordonnés aux patients. Cependant, il existe de nombreux problèmes liés à la gestion des opérations au sein de ces services. Nous avons introduit, dans le chapitre précédent, l'hospitalisation à domicile, et les différentes problématiques que rencontrent les structures HAD.

Nous nous intéressons, dans ce chapitre, et dans cette thèse en général, à l'une des problématiques majeures relatives à l'HAD qui est la planification quotidienne des tournées du personnel soignant aux domiciles des patients. Il s'agit de concevoir les tournées des soignants aux domiciles des patients afin de leur attribuer des soins. Cette problématique s'apparente aux problèmes classiques de la Recherche Opérationnelle que sont les problèmes de tournées de véhicules connus sous le nom de Vehicle Routing Problems (VRP).

Le problème de tournées des véhicules (VRP) a été introduit il y a 50 ans [78] par les auteurs Dantzig et Ramser [32]. Le VRP et ses variantes constituent l'un des sujets les plus étudiés de la recherche opérationnelle, ceci est dû d'une part à la complexité du problème, et d'autre part à ses nombreuses applications pratiques en logistique.

Nous présentons dans ce chapitre une définition de ces problèmes classiques, leur complexité, leurs variantes et les différents outils mathématiques et approches de résolution possibles. Nous ne citerons dans ce rapport que les contraintes qui ont un intérêt pour notre problème.

Nous présentons également dans ce chapitre une brève introduction des problèmes de tournées de véhicules multi-objectif et les différentes méthodes de résolution possibles. Ensuite, nous présentons un état de l'art sur les problèmes de tournées de véhicules étudiés essentiellement dans le cadre de l'hospitalisation à domicile ou du maintien à domicile en général. Nous nous intéressons aux contraintes et besoins exprimés par l'HAD rencontré (Mutualité Française Nord Pas de Calais) et les résultats de l'enquête de satisfaction menée auprès de ses patients. Nous présentons également d'autres travaux qui relèvent d'autres domaines d'application, en relation avec les spécificités de notre problématique.

## 2.2 Problèmes de logistique de transport

Les problèmes de transport, appelés communément problèmes de routage ou de tournées de véhicules, modélisent des problèmes réels liés au transport de produits ou de personnes. Il s'agit généralement de déterminer l'acheminement de biens ou de personnes à partir d'une ou de plusieurs sources vers une ou plusieurs destinations et cela à moindre coût.

La problématique traitée dans cette thèse « la conception des tournées du personnel soignant aux domiciles des patients » relève d'un problème de logistique de transport. Nous présentons principalement dans ce qui suit les deux problèmes classiques de logistique de transport. Il s'agit du problème du voyageur de commerce et du problème de tournées de véhicules. Nous introduisons également quelques variantes du problème de tournées de véhicules.

### 2.2.1 Représentation et notations d'un problème de logistique de transport

Nous retiendrons que les problèmes de transport se modélisent par un graphe orienté ou non-orienté  $G = (V, E)$  tel que :

- $V = \{v_1, \dots, v_n\}$  est un ensemble de sommets modélisant  $n$  villes (clients ou services)
- $A = (v_i, v_j) : i \leq j; (v_i, v_j) \in V$  est un ensemble d'arêtes ou d'arcs reliant les villes,

clients ou services.

- $C = (c_{ij})$  est la matrice de distances/coûts associée à  $A$ . Le problème est dit symétrique si  $C$  est symétrique (ou non orienté) :  $c_{ij} = c_{ji}$ , pour chaque  $(i, j) \in A$ . Le problème est asymétrique (orienté) ou Euclidien si  $C$  est asymétrique :  $c_{ij} + c_{jk} \geq c_{ik}$ , pour chaque  $i, j, k \in V$  [11, 77].

## 2.2.2 Problème du voyageur de commerce TSP

### 2.2.2.1 Définition

Le problème du voyageur de commerce, connu sous l'acronyme de TSP "Traveling Salesman Problem" est aujourd'hui l'un des problèmes les plus anciens et les plus étudiés dans l'optimisation combinatoire [76].

Les premières approches mathématiques pour le problème ont été proposées au 19ème siècle par les mathématiciens Sir William Rowan Hamilton et Thomas Penyngton Kirkman. Hamilton en a fait un jeu : Hamilton's Icosian game. Les joueurs devaient réaliser une tournée passant par 20 points en utilisant uniquement les connections prédéfinies [79].

Un aperçu perspicace et complet de tous les principaux résultats de recherche sur le problème du voyageur de commerce est donné par les auteurs [57, 79, 95]. Le TSP a plusieurs applications en plus de celles liées aux problème de transport [76, 83]. Nous en citons l'optimisation de parcours en robotique ou en conception de circuits électroniques ainsi que certains problèmes d'ordonnancement, etc.

Le problème du voyageur de commerce s'énonce traditionnellement de la façon suivante : un représentant de commerce doit visiter, une fois et une seule, un certain nombre de clients /villes pour vendre sa marchandise, et retourner au point de départ. La tournée doit être de longueur minimale et doit être planifiée de façon à visiter toutes les villes/clients une et une seule fois [79].

### 2.2.2.2 Formulation mathématique

Pour modéliser le TSP, nous reprenons les mêmes notations définies dans la section précédente 2.2.1. La formulation du TSP que nous présentons ici correspond à la formulation mathématique basée sur la programmation linéaire en nombres entiers, proposée par les auteurs Dantzig, G.B., Fulkerson, D.R., and Johnson [31]. Elle compte parmi les premières formulations proposées dans la littérature [76]. Une variable binaire  $x_{ij}$  est associée à chaque arc  $(i, j)$ ,  $\forall (i, j) \in A$

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{Si l'arc (i,j) est utilisé dans la solution optimale ;} \\ 0, & \text{Sinon.} \end{cases}$$

La formulation mathématique du problème du voyageur de commerce TSP est la suivante [31] :

$$\min \sum_{\substack{(i,j) \\ i \neq j}} c_{ij} x_{ij} \quad (2.1)$$

Sous les contraintes suivantes :

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall i \in V, \quad (2.2)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad \forall j \in V, \quad (2.3)$$

$$\sum_{i,j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, \quad \forall S \subset V, \quad 2 \leq |S| \leq n - 1, \quad (2.4)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V, \quad i \neq j. \quad (2.5)$$

La fonction objective (2.1) décrit la minimisation du coût de la tournée du voyageur. Les

contraintes (2.2) et (2.3) sont des contraintes de conservation de flux : chaque sommet (ville/client) est visité une et une seule fois. Les contraintes (2.4) sont des contraintes d'élimination des sous tours. Enfin, les contraintes (2.5) imposent des valeurs binaires aux variables de décision.

### 2.2.3 Problème de voyageurs de commerce multiples mTSP

#### 2.2.3.1 Définition

Le problème de voyageurs de commerce multiples (mTSP) est une généralisation du problème du voyageur de commerce (TSP), où plus d'un représentant de commerce est autorisé à être utilisé dans la solution. Le problème mTSP consiste à déterminer un ensemble de routes pour plusieurs représentants (de nombre  $m$ ) qui partent et retournent à une ville/point de départ (dépôt) [77]. Bien que le TSP ait reçu beaucoup d'attention, la recherche sur le mTSP est limitée quoique les caractéristiques du mTSP semblent plus appropriées pour les applications réelles [11]. Les mêmes auteurs Bektas et al. [11] présentent dans leur article les différentes applications du mTSP.

#### 2.2.3.2 Formulation Mathématique

Plusieurs formulations mathématiques ont été proposées pour modéliser le mTSP. Deux formulations mathématiques basées sur la programmation linéaire en nombres entiers sont proposées dans [77]. La première correspond au problème mTSP symétrique et la deuxième correspond au problème mTSP asymétrique. Un état de l'art récent et détaillé de ces modélisations est dressé dans l'article [11].

Nous présentons dans cette section, la formulation mathématique à trois indices proposée par Christofides et al [27] et adaptée au problème mTSP par les auteurs Bektas et al. [11]. Pour modéliser le mTSP, nous reprenons les mêmes notations définies dans la section 2.2.1. Nous considérons le graphe  $G = (V, A)$  et nous rajoutons à la définition du problème  $m$  voyageurs de commerce représenté par l'ensemble  $K$ . Nous précisons que tous les voyageurs

de commerce partent et retournent à une seule ville/point de départ (dépôt) représenté par le nœud  $v_1$ .

Le modèle mathématique du mTSP est le suivant [11, 27] :

$$\forall (i, j) \in A \quad \forall k \in K$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{Si le voyageur de commerce } k \text{ visite le nœud } j \text{ directement après le nœud } i; \\ 0, & \text{Sinon.} \end{cases}$$

$$\min \sum_{i,j=1}^n c_{ij} \sum_{k=1}^m x_{ijk} \quad (2.6)$$

Sous les contraintes suivantes :

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in V, \quad (2.7)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ipk} - \sum_{j=1}^n x_{pjk} = 0 \quad \forall k \in K, \quad \forall p \in V, \quad (2.8)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{1jk} = 1 \quad \forall k \in K, \quad (2.9)$$

$$u_i - u_j + n \sum_{k=1}^m x_{ijk} \leq n - 1, \quad \forall i \neq j \in \{2, \dots, n\}, \quad (2.10)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V, \quad i \neq j, \quad \forall k \in K, \quad (2.11)$$

$$u_i \in N.$$

La fonction objective (2.6) est la minimisation du coût des tournées de l'ensemble des voya-

geurs. Les contraintes (2.7) exigent que chaque client soit visité exactement une seule fois et les contraintes (2.8) sont les contraintes de conservation de flux qui assurent qu'un voyageur qui visite un client, doit également partir du même client. Des contraintes (2.9) garantissent que chaque voyageur fasse une seule tournée et (2.10) sont les contraintes d'élimination des sous tours, basées sur la formulation MTZ des auteurs Miller, Trucker and Zemin [85]. Ces mêmes contraintes exigent que chaque tournée d'un voyageur passe par le dépôt. Les contraintes (2.11) sont les contraintes d'intégrité du modèle.

## 2.2.4 Problème de tournées de véhicules

### 2.2.4.1 Définition

Le problème de tournées de véhicules dont l'acronyme est VRP « Vehicle Routing Problem » est une extension du problème du voyageur de commerce [32, 78]. Introduit pour la première fois par Dantzig et al. [32] sous le nom de « Truck Dispatching Problem ». Ce problème a fait l'objet de nombreuses études pour le classifier, le modéliser et le résoudre. Des articles et états de l'art très complets sont proposés dans la littérature. A notre connaissance l'étude la plus récente est celle des auteurs Braekers et al. [19]. Elle porte sur les articles publiés entre 2009 et 2015. L'état de l'art d'Eksioglu, Vural et Reisman [40] a révélé que 1021 articles de revue portant sur le VRP ont été publiés entre 1959 et 2008. Un certain nombre de livres [55, 69, 100, 101] et une quantité considérable d'articles de conférence ont également contribué à la littérature VRP qui existe aujourd'hui. D'après Eksioglu et al. [40], la littérature VRP a connu une croissance exponentielle de 6% chaque année. Cette popularité rend difficile le suivi des développements dans le domaine et d'avoir un aperçu clair des variantes et des méthodes de résolution qui sont relativement nouvelles [19].

La version de base des problèmes de tournées de véhicules est le problème de tournées de véhicules avec les contraintes de capacité CVRP « Capacitated VRP » [65, 70]. Le principe du CVRP est le suivant : des clients dispersés géographiquement ont des demandes pour

un produit ou un bien. Ils doivent être desservis par des véhicules identiques d'une capacité limitée basés à un dépôt. Le CVRP vise à déterminer les tournées d'un ensemble de véhicules avec un coût total minimal tels que : (i) chaque route commence et se termine au dépôt ; (ii) chaque client est desservi par un seul véhicule ; et (iii) la demande totale sur chaque tournée ne dépasse pas la capacité du véhicule [30, 70].

La Figure 2.1 représente un exemple de problème de VRP résolu avec 4 véhicules.

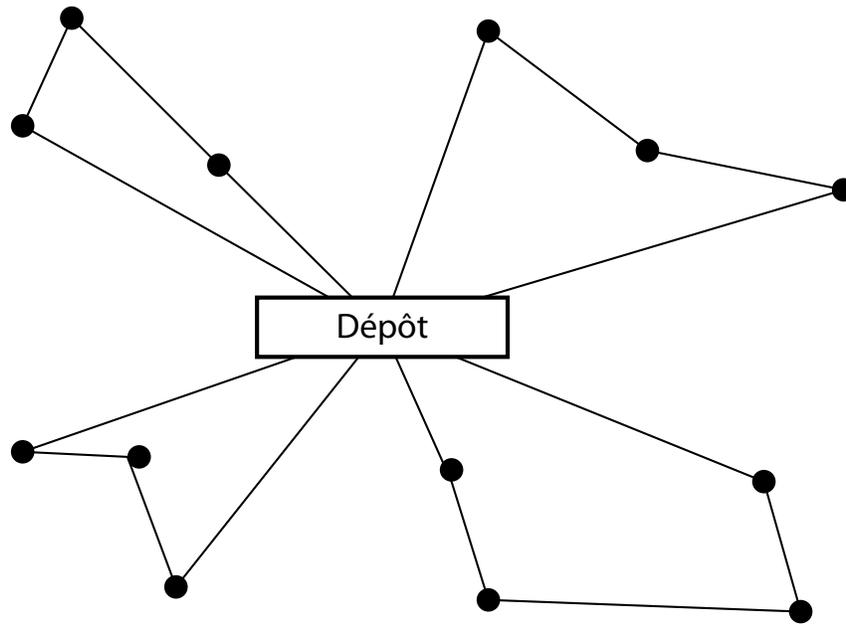


Figure 2.1 Exemple de solution pour un problème VRP

#### 2.2.4.2 Formulation mathématique

La définition de ce problème peut s'appuyer sur un graphe valué  $G = (V, A)$  [100]. Nous reprenons les mêmes notations définies dans la section 2.2.1 en ajoutant un autre sommet  $v_0$  correspondant au dépôt, à l'ensemble des sommets du graphe  $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ . Chaque sommet de  $V$  représente un des  $n$  clients. Un client étant caractérisé par une quantité de produit demandée. Nous représentons également les demandes des clients par  $D = \{d_1, \dots, d_n\}$ , et la flotte de véhicules  $k = \{1, \dots, K\}$  de capacité  $Q$  partant et retournant au dépôt  $v_0$ .

Nous rappelons les autres constantes du problème :  $n$  nombre de clients (ou sommets),  $K$  nombre de véhicules et  $c_{ij}$  le coût de l'arc reliant le sommet  $i$  à  $j$  (distance ou temps de parcours).

Toth et Vigo [100] classent les nombreuses formulations mathématiques du problème VRP en trois catégories :

- Les modèles de flot de commodités,
- Les modèles de partitionnement d'ensemble,
- Les modèles de flot de véhicules.

Pour un état de l'art sur les différentes formulations proposées dans la littérature, nous référons le lecteur au [74, 78, 100]. La formulation du VRP que nous présentons ici est basée sur le programme linéaire en nombres entiers proposé par Fisher et al. [51]. Ce type de formulation fait partie des modèles de flot de véhicules, souvent utilisée comme modèle de base et généralisée pour de nouvelles variantes du VRP. Ayant un indice par véhicule, il est en général facile d'y ajouter de nouvelles contraintes. Cette formulation traduit en effet la modélisation naturelle du problème par la définition d'une variable binaire  $x_{ijk}$  à trois indices qui est égale à 1 si le véhicule  $k$  parcourt l'arc  $(v_i, v_j)$ , et la variable  $y_{ik}$  tel que :

$$\forall i \in V, \forall k \in \{1, \dots, K\}$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{Si le client } i \text{ est servi par le véhicule } k ; \\ 0, & \text{Sinon.} \end{cases}$$

La formulation mathématique du CVRP est la suivante [51] :

$$\min \sum_{i,j \in V} c_{ij} \sum_{k=1}^K x_{ijk} \tag{2.12}$$

Sous les contraintes suivantes :

$$\sum_{k=1}^K y_{ik} = 1 \quad \forall i \in V \setminus \{v_0\} \quad (2.13)$$

$$\sum_{k=1}^K y_{0k} = K \quad (2.14)$$

$$\sum_{j \in V} x_{ijk} = \sum_{j \in V} x_{jik} = y_{ik} \quad \forall k \in \{1, \dots, K\}, \forall i \in V \quad (2.15)$$

$$\sum_{i \in V} d_i y_{ik} \leq Q \quad \forall k \in \{1, \dots, K\}, \quad (2.16)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \notin S} x_{ijk} \geq y_{hk}, \quad \forall k \in \{1, \dots, K\}, \forall h \in S, \forall S \subset V \setminus \{v_0\} \quad (2.17)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in V, i \neq j, \forall k \in \{1, \dots, K\}, \quad (2.18)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in V, \forall k \in \{1, \dots, K\}. \quad (2.19)$$

Sous cette formulation, la fonction objectif (2.12) minimise la somme des coûts de toutes les tournées. Les contraintes (2.13), (2.14) et (2.15) imposent respectivement que chaque client soit visité exactement une fois, que  $K$  véhicules quittent le dépôt, et que le même véhicule visite et quitte un client donné. Les contraintes (2.16) sont la restriction de capacité pour chaque véhicule  $k$ , alors que les contraintes (2.17) imposent la connectivité de la route effectuée par chaque véhicule  $k$ . Ces dernières contraintes peuvent être remplacées par des contraintes d'élimination de sous-tours (2.20) (Subtours Elimination Constraints) [51] :

$$\sum_{i, j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1, \quad \forall S \subset V \setminus \{v_0\}, |S| \geq 2, \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (2.20)$$

Alternativement aux contraintes (2.20), la version généralisée d'élimination des sous tours de Miller-Tucker-Zemlin [85] peut être utilisée [100]. Enfin, les contraintes (2.19) et (2.18) indiquent que les variables de décision sont binaires.

### 2.2.5 Discussions

Le problème de voyageurs de commerce multiples (mTSP) est une généralisation du problème du voyageur de commerce (TSP), où plus d'un représentant de commerce est autorisé à être utilisé dans la solution. Le VRP généralise également le problème du voyageur de commerce (TSP) [100]. Notons que le mTSP est considéré comme une relaxation du VRP, avec les restrictions de capacité retirées. Cela signifie que toutes les formulations et solutions proposées pour le VRP sont également valides et applicables au mTSP, en attribuant des capacités importantes aux voyageurs de commerce (véhicules). Le VRP peut même être identique au m-TSP si la demande totale de tous les clients est inférieure à la capacité d'un seul véhicule [65]

La problématique de conception des tournées du personnel soignant aux domiciles des patients ne prend généralement pas en considération la contrainte de capacité. Par conséquent, les deux problèmes TSP et VRP sont utilisés dans la littérature pour décrire la nature du problème. Dans le reste de ce document on utilisera la définition du problème de tournées de véhicules pour désigner également le problème de voyageurs de commerce multiples.

### 2.2.6 Complexité des problèmes de tournées de véhicules

Les problèmes de tournées de véhicules sont des problèmes d'optimisation combinatoire. Laporte [74] a démontré que le problème du voyageur de commerce est NP-difficile. Du moment que le mTSP et le VRP sont des généralisations du problème TSP, ils sont également NP-difficiles. Les auteurs Lenstra et al. [80] ont analysé la complexité du problème de tournées de véhicules et ont conclu que pratiquement tous les problèmes VRP sont NP-difficiles. C'est-à-dire qu'il n'existe pas à ce jour d'algorithme déterministe pouvant résoudre ce problème en

temps polynomial.

### **2.2.7 Problèmes de tournées de véhicules statiques/dynamiques**

Le problème est dit statique lorsque les données sont parfaitement et exhaustivement connues et ne sont pas soumises à des changements pendant l'horizon de planification. Dans le cas dynamique, il faut prendre en considération les imprévus qui peuvent survenir comme la panne ou le retard d'un véhicule alors que les tournées ont déjà été planifiées et que leur exploitation a démarré.

### **2.2.8 Approches de résolution du VRP**

Le VRP est un problème d'optimisation combinatoire. Pour la résolution des problèmes de tournées de véhicules VRP et ses variantes, on distingue essentiellement deux catégories de méthodes : les méthodes exactes et les méthodes approchées. Dans cette section, nous présentons les méthodes les plus utilisées pour résoudre les problèmes de tournées de véhicules.

#### **2.2.8.1 Méthodes de résolution exactes**

Une méthode de résolution est dite exacte si elle garantit l'obtention d'une solution optimale du problème. Généralement, pour les problèmes d'optimisation combinatoire et particulièrement pour les problèmes de tournées de véhicules, les méthodes exactes fournissent une solution optimale au prix d'un effort de calcul souvent important. Ainsi, ces méthodes peuvent être efficaces pour résoudre des instances de petite taille mais elles le sont beaucoup moins pour résoudre des instances de moyenne ou de grande taille.

De nombreux auteurs ont développé différentes approches basées sur des méthodes exactes pour le VRP et ses variantes, telle que la technique de Branch and Bound. Kallehaug [65] par exemple a fait un état de l'art, des algorithmes exacts proposés au cours des trois dernières décennies pour la résolution de la variante Vehicle Routing Problem with Time Windows VRPTW. Nous citons ci-dessous quelques méthodes de résolution exactes. Néanmoins, pour

plus de détails, nous référons le lecteur à l'article [74].

**Branch and Bound [71]** Appartenant à la classe des méthodes de recherche arborescente. Cette méthode a été proposée pour la première fois par Land et Doig en 1960 [71]. Cette méthode consiste en la construction d'un arbre de recherche représentant l'espace de l'ensemble des solutions. En effet, pour les problèmes d'optimisation, l'ensemble des solutions est dénombrable. Il est donc possible, d'énumérer toutes les solutions, et choisir celle qui optimise la fonction-objectif considérée. L'inconvénient de cette approche est le nombre exponentiel de solutions par rapport à la taille du problème : il n'est guère évident d'effectuer cette énumération. La méthode de branch and bound consiste à énumérer les solutions du problème, mais aussi à éliminer des solutions mauvaises ou irréalisables. Cette méthode se dote d'une fonction qui permet de mettre une borne sur certaines solutions pour les éliminer ou les maintenir comme des solutions potentielles.

**Branch and Cut [91]** Le Branch and Cut est une méthode basée sur le Branch and Bound et la méthode de cutting plane. L'idée principale de la méthode est de prendre une relaxation de la programmation linéaire du problème, de résoudre la relaxation, puis de l'améliorer en ajoutant des contraintes valides supplémentaires, ou de diviser le problème en deux ou plusieurs sous-problèmes et répéter le processus.

**La programmation dynamique [39]** La programmation dynamique est une méthode d'optimisation qui procède par énumération implicite des solutions. Cette approche consiste à résoudre des problèmes d'optimisation en décomposant le problème initiale en une séquence de problèmes et en établissant une relation de récurrence entre les solutions optimales des problèmes.

Cependant, ces méthodes exactes sont inefficaces en général pour les grandes instances. En conséquence, de nombreux chercheurs ont étudié le VRP et ses variantes en utilisant des approches heuristiques et méta-heuristiques [20, 21].

### 2.2.8.2 Méthodes de résolution approchées

Vu la complexité du problème qui implique un temps de calcul souvent important pour les méthodes exactes, les méthodes approchées sont utilisées de manière intensive pour résoudre des problèmes de grande taille. Comme leur nom l'indique, les méthodes approchées cherchent à approcher une solution optimale. Elles ne garantissent pas l'optimalité de la solution trouvée. Elles se contentent d'obtenir des solutions aussi bonnes que possible dans un temps de calcul raisonnable. Par conséquent, de nombreux chercheurs ont étudié le VRP en utilisant des approches heuristiques et méta-heuristiques [20, 21, 29, 75]. Ces méthodes ont fini par être reconnues comme l'une des approches les plus pratiques pour résoudre de nombreux problèmes complexes, et ceci est particulièrement vrai pour les problèmes du monde réel qui sont de nature combinatoire.

Les méthodes approchées sont classées en deux branches : les heuristiques et les méta-heuristiques. Les méta-heuristiques peuvent également être divisées en deux catégories [98] : les méthodes à parcours et les méthodes à population.

### 2.2.8.3 Heuristiques et recherche locale

**Heuristiques** Les heuristiques sont des algorithmes qui permettent d'obtenir des solutions réalisables en effectuant des décisions élémentaires consécutives. L'algorithme du plus proche voisin et les algorithmes d'insertion ont été parmi les premières heuristiques proposées dans la littérature [97]. Ces algorithmes ont été destinés principalement pour le problème du voyageur de commerce. Ensuite d'autres heuristiques développées spécifiquement pour le problème de tournées de véhicules ont vu le jour [74].

Les méthodes heuristiques les plus utilisées pour le VRP peuvent être classées sous les catégories suivantes [96] :

- Méthodes constructives : ces méthodes ajoutent des clients aux itinéraires des véhicules

un par un sous un critère spécifié, jusqu'à ce qu'une solution complète soit obtenue. Nous citons par exemple l'algorithme de Clarke et Wriqth [28].

- Regroupement d'abord puis routage : l'ensemble des clients est réparti en sous-ensembles. Un véhicule est affecté à chaque sous-ensemble et chaque sous problème est résolu indépendamment. Parmi les heuristiques de cette catégorie, nous citons Gillett et Miller [53].
- Routage d'abord puis regroupement : dans ce cas, le problème est résolu sous la forme d'un problème du voyageur de commerce, puis la solution trouvée est divisée en tournées, une pour chaque véhicule. Parmi les heuristiques de cette catégorie nous citons Gendreau et al. [52],
- Les méthodes d'amélioration : ces méthodes ont généralement une solution initiale qui peut être réalisable ou non, puis dans les étapes ultérieures, la solution initiale est améliorée et/ou réparée en utilisant une méthode définie.

**La recherche local** Cette technique s'est révélée être efficace pour générer de bonnes solutions des instances du VRP ainsi que ses variantes. On définit généralement un voisinage de recherche qui comporte toutes les solutions réalisables qui peuvent être obtenues à partir d'une solution existante par des opérations élémentaires bien définies telles que le déplacement d'un client/nœud vers une nouvelle position dans une tournée. Une solution est sélectionnée parmi ces solutions voisines et le processus est répété jusqu'à ce que le critère d'arrêt spécifié soit atteint.

#### 2.2.8.4 Méta-heuristiques

Les méta-heuristiques sont des méthodes génériques qui fournissent des schémas de résolution généraux permettant de les appliquer à différents problèmes d'optimisation. Elles sont définies comme un processus itératif qui combine intelligemment plusieurs concepts pour explorer et exploiter tout l'espace de recherche afin de trouver les meilleurs solutions [90].

L'avantage pratique de la méta-heuristique réside à la fois dans son efficacité et dans son applicabilité générale. Nous référons le lecteur au livre de Talbi [98] pour plus de détails sur

les méta-heuristiques en général. Les premières méta-heuristiques qui ont vu le jour sont les suivantes :

**Recuit simulé [67]** Le recuit simulé (SA) est considéré comme le plus ancien parmi les méta-heuristiques et sûrement un des premiers algorithmes qui a une stratégie explicite pour échapper aux minima locaux. C'est une méthode de recherche locale dans laquelle une solution voisine n'améliorant pas la solution courante, est acceptée quand même mais selon une probabilité liée à une température. Cette température décroît doucement au fil des itérations comme dans le traitement thermique dont l'algorithme tient l'origine.

**Recherche tabou TS [54]** La recherche tabou dont l'acronyme est TS a été proposée par Glover en 1986. C'est l'une des méta-heuristiques les plus citées et utilisées pour les problèmes combinatoires. Le principe de base de TS est de rechercher une meilleure amélioration chaque fois qu'on rencontre un minimum local en autorisant des mouvements non améliorant de la solution. Le retour à des solutions précédemment explorées est interdit par l'utilisation de listes tabous qui enregistrent l'historique récent de la recherche.

Récemment de nouvelles méta-heuristiques ont émergés et sont largement utilisées pour les problèmes de tournées de véhicules :

**VNS et VND [87]** Le VNS est une méta-heuristique dans laquelle plusieurs opérateurs sont disponibles. Il y a donc le choix entre plusieurs voisinages lors du passage d'une solution à une autre, ce qui permet ainsi de s'échapper d'un optimum local. Le VNS et le VND sont deux méta-heuristiques basées sur la recherche locale qui sont en quelque sorte complémentaires l'une de l'autre et donc souvent utilisées en combinaison. Tandis que le VND essaie d'améliorer localement des solutions données en explorant et en basculant systématiquement entre différentes structures de voisinage, le VNS applique des mouvements aléatoires afin d'échapper aux optima locaux.

**Iterated Local Search ILS [82]** L'ILS est une recherche locale itérative dans laquelle la solution courante est perturbée afin de sortir d'un optimum local pour repartir vers la recherche d'un optimum local plus prometteur.

### 2.2.8.5 Algorithmes à base de population

Les algorithmes à base de population appelés aussi algorithmes évolutionnaires est une famille de méta-heuristiques dont le principe s'inspire de la théorie de l'évolution pour résoudre des problèmes divers.

**Algorithme génétique AG [60]** Ces algorithmes s'inspirent de l'évolution génétique des espèces. Ils copient de façon extrêmement simplifiée certains comportements des populations naturelles. Fondamentalement, un AG fonctionne sur une population finie de chromosomes ou de chaîne de bits. Le mécanisme de recherche se compose de trois phases différentes : l'évaluation de chaque chromosome, la sélection des chromosomes parents et l'application des opérateurs de mutation et de recombinaison aux chromosomes parents. De nouveaux chromosomes résultent de ces opérations de la génération suivante, et le processus est répété jusqu'à ce que les solutions cessent de s'améliorer.

**Algorithme mémétique [88]** Un algorithme mémétique est une hybridation entre l'algorithme génétique et l'algorithme de recherche locale. Il utilise le même processus de résolution que les algorithmes génétiques mais utilisent un opérateur de recherche locale après celui de mutation. L'intérêt de cette classe d'algorithmes est l'apport de la diversification de la partie génétique accompagnée par l'intensification de la recherche locale.

**Algorithme de colonies de fourmis [35]** La source inspirante de cette approche est le comportement des fourmis réelles qui arrivent à trouver les chemins les plus courts entre les sources de nourriture et leur nid. Même si une seule fourmi n'a que des capacités limitées, le comportement d'une colonie de fourmis entière est fortement structuré. Le moyen de communication de la fourmi est un composé chimique, connu sous le nom de phéromone. Une

fourmi en mouvement met différentes quantités de ces composés sur le sol, ainsi elle marque le chemin de ses mouvements.

### **2.3 État de l'art sur les problèmes de tournées de véhicules VRP dans le contexte HAD**

Les structures d'hospitalisation à domicile sont confrontées à des problèmes d'optimisation complexes à différents niveaux de décision. Les problèmes traités dans la littérature de l'HAD peuvent être distingués selon trois niveaux de décision correspondant à l'horizon de planification (long, moyen et court terme) [56] :

**Problèmes de niveau stratégique** Exemple : Le partitionnement géographique du territoire en sous-zones [14, 15].

**Problèmes de niveau tactique** Exemple : L'affectation des soignants aux sous zones [59].

**Problèmes de niveau opérationnel** Exemple : L'ordonnancement des activités des soignants et affectation des soignants aux patients [99].

Une quatrième catégorie est récemment reconnue, Il s'agit des problèmes de décision dynamique [56]. Il faut prendre en considération en temps réel tout changement ou imprévu dans le système. D'autres travaux ont également abordé les problèmes de niveau opérationnel avec des paramètres stochastiques. Nous renvoyons le lecteur aux articles les plus récents dans le domaine [72, 73, 104].

Nous nous intéressons particulièrement, dans cette thèse, au niveau de décision opérationnel. Il s'agit de la conception de tournées de véhicules (VRP) dans le contexte de l'HAD. Puisque le VRP et ses variantes sont largement étudiés dans la littérature, nous renvoyons le lecteur à ces deux récents travaux [19, 40].

Comme résumé dans le Tableau 2.1, nous examinons, seulement dans cette section, les problèmes VRP dans le contexte de l'hospitalisation à domicile. Ce Tableau met l'accent sur les contraintes de synchronisation et de fenêtres de temps (les deux contraintes à satisfaire selon les résultats de l'enquête menée auprès de la Mutualité Nord-Pas de Calais [25]).

### 2.3.1 Problèmes mono-objectif de tournées de véhicules VRP dans le contexte HAD

Le problème de la conception des tournées des soignants aux domiciles des patients a reçu une attention accrue au cours des dernières années, en raison de la grande importance de ces services pour le public [50]. Les articles suivants [50, 56, 103] ont présenté un état de l'art exhaustif des travaux qui ont abordé la problématique de tournées de véhicules dans le contexte de l'hospitalisation à domicile. Les travaux réalisés, diffèrent les uns des autres par rapport à la nature des objectifs optimisés, la nature des contraintes (souples/dures) ou la méthode de résolution.

Cependant, le but commun de tous ces travaux est de concevoir les tournées des soignants et de servir les patients à domicile. Les soignants doivent être affectés aux patients sur une certaine période allant d'un jour à plusieurs semaines. Cette décision doit être prise en fonction d'un objectif considéré (coût de déplacement des soignants, temps d'attente des soignants, préférences des soignants, équilibre de la charge de travail, coût des heures supplémentaires, nombre de visites non couvertes, etc.) et en respectant certaines contraintes (les compétences des soignants et les besoins en terme de soins des patients, la disponibilité des patients, la synchronisation des soignants, la continuité des soins signifiant qu'un seul soignant par catégorie est affecté à un patient, appelé la référence [17]).

Le premier système d'aide à la décision (DSS) conçu pour la planification quotidienne des soignants a été présenté par [10]. Leur DSS utilise une heuristique pour construire des routes pour les soignants à travers un système complet qui englobe la gestion de données, l'ordonancement, et le géocodage visuel interactif afin de visualiser les tournées des soignants sur le plan de la ville. La solution respecte les compétences des soignants et les besoins des patients. L'objectif est de minimiser la durée totale de déplacements des soignants.

Dans l'article [26], les auteurs traitent le problème de tournées des infirmiers comme une extension du VRPTW avec des dépôts multiples. L'objectif est de trouver la meilleure planification permettant de minimiser les coûts relatifs aux heures supplémentaires pour les infirmiers à temps plein et au travail des infirmiers à temps partiel. Pour la résolution de ce

problème, les auteurs ont proposé un programme linéaire en nombres entiers et une heuristique à deux phases.

Un problème similaire est traité dans l'article [16]. Les auteurs proposent une méthode hybride combinant la programmation linéaire, la programmation par contraintes et les méta-heuristiques (TS, SA). La solution proposée est dédiée au module d'optimisation d'un logiciel HAD appelé PARPAP en Allemagne. Les objectifs considérés sont la minimisation du temps total parcouru et de la somme des coûts des pénalités. Les fenêtres de temps et les compétences des soignants peuvent être considérés comme des contraintes dures, ou souples qui peuvent être violées au détriment d'une pénalité intégrée à la fonction-objectif. La charge de travail des soignants est également considérée.

Les auteurs dans [17] considèrent pour la première fois les contraintes de continuité des soins et proposent la programmation linéaire mixte pour le problème. Un soignant de référence est sélectionné pour chaque patient, sur une courte période de planification (maximum 15 jours), puis la tournée de chaque soignant est conçue. Plusieurs contraintes sont considérées, telles que la qualification des soignants, la disponibilité et les préférences des patients. La durée du traitement est considérée comme constante pour tous les patients.

Au Royaume-Uni, les auteurs [9] utilisent une méta-heuristique d'optimisation par essaim de particules pour résoudre le problème de tournées de véhicules dans le contexte HAD. L'objectif est la minimisation de la distance totale parcourue par les soignants, tout en respectant les contraintes de capacité et de fenêtres de temps. Chaque soignant commence et termine sa tournée chez lui plutôt que dans la structure HAD. Les heures supplémentaires des soignants ne sont pas autorisées. La méthode de résolution est testée sur des données réelles.

Les auteurs dans l'article [12] utilisent la programmation linéaire mixte pour planifier les visites des patients, tout en respectant leurs disponibilités (fenêtres de temps), les pauses repas pour le personnel et les visites partagées (synchronisation). L'objectif est de réduire le coût dû au temps de déplacement entre les patients.

Un cas réel est traité en Autriche par les auteurs [102]. Ils proposent une formulation mathématique et un algorithme de recherche de voisinage variable. La fonction-objectif minimise le

temps de déplacement des soignants et le niveau d'insatisfaction des patients et des soignants. Les contraintes considérées sont : les affectations appropriées d'infirmières aux patients en fonction des niveaux de qualification, des compétences linguistiques, d'affinités, et des réglementations sur le temps de travail, des fenêtres de temps difficiles et des pauses obligatoires. L'algorithme est capable de résoudre des cas réels comportant jusqu'à 512 visites à domicile et 75 infirmières.

Une approche hybride combinant méta-heuristiques et méthodes de programmation par contraintes est proposée par les auteurs [89] pour résoudre le problème de tournées des soignants hebdomadaire. Les auteurs ont développé différentes heuristiques d'amélioration de la solution. Les objectifs sont l'affinité du patient/soignant, le nombre de visites non programmées, le coût des heures supplémentaires et la distance à parcourir. Les contraintes considérées sont la disponibilité des patients et l'adéquation des compétences avec les besoins des patients.

Les auteurs [24] proposent un modèle basé sur la programmation linéaire mixte pour la planification hebdomadaire des visites. L'objectif est d'équilibrer la charge de travail des infirmières et de réduire leur temps d'attente entre les visites consécutives. Pour planifier plusieurs visites du même patient au cours de la semaine, les auteurs considèrent le concept de "pattern" dans leur modélisation. L'attribution des soins aux patients doit respecter la compatibilité de la qualification du soignant avec les besoins du patient.

Une autre variante du VRP dans le contexte HAD est traité par les auteurs [81]. Il s'agit du problème de tournées de véhicules avec livraison et ramassage avec fenêtres de temps. Le problème concerne la livraison de médicaments et de dispositifs médicaux de la pharmacie de l'HAD aux domiciles des patients, la livraison de médicaments spéciaux d'un hôpital aux patients, et la collecte d'échantillons biologiques, de médicaments inutilisés et de dispositifs médicaux chez les patients. Deux modèles basés sur la programmation linéaire à variables mixtes sont élaborés. De plus, un algorithme génétique (GA) et une méthode Tabu Search (TS) sont proposés. Ces approches sont testées sur des instances issues de la littérature.

### 2.3.1.1 La littérature des VRP avec les contraintes de synchronisation dans le contexte HAD : problèmes mono-objectif

Les contraintes de synchronisation apparaissent dans de nombreuses applications réelles comme l'industrie forestière [41] par exemple. Nous référons le lecteur à [36] pour une étude approfondie du VRP avec plusieurs types de contraintes de synchronisation.

Le premier travail traitant des contraintes de synchronisation dans le contexte de l'HAD est réalisé pour une HAD suédoise. Les auteurs [47] ont formulé le problème comme un "set partitioning problem". L'objectif est la minimisation du temps de transport. Les contraintes considérées, en plus de la synchronisation, sont : la disponibilité des patients (fenêtres de temps), les compétences, les pauses des soignants et les préférences des patients.

Les auteurs dans l'article [66] considèrent les tournées du personnel soignant comme une extension du mTSPTW avec des contraintes additionnelles spécifiques à l'HAD (la disponibilité des patients, les compétences des ressources humaines, les préférences du patient pour le personnel soignant et la synchronisation des soins multiples pour le même patient). Les auteurs proposent un programme linéaire en nombres entiers. L'objectif est de réduire les coûts des déplacements du personnel.

L'impact de la proportion des visites synchronisées est évalué et analysé par [34]. Les auteurs ont développé un modèle de programmation linéaire mixte pour le problème. L'objectif est la minimisation du temps d'attente total des soignants entre les visites.

Dans l'article [23], les auteurs présentent un modèle de programmation mathématique. Trois objectifs sont considérés : (i) minimiser le temps total de déplacement ; (ii) maximiser la somme des préférences des patients envers les soignants ; (iii) minimiser la différence entre la plus longue et la plus courte tournée. Les auteurs présentent également une heuristique pour résoudre les grandes instances et un algorithme de "Branch and Price" [22]. Les auteurs [4] proposent pour le même problème, un algorithme hybride basé sur le recuit simulé (SA-ILS). L'algorithme comporte un ensemble de méthodes d'amélioration locale pour traiter les divers objectifs du problème. Les expériences menées sur le benchmark [23] prouvent l'efficacité de leur approche par rapport aux méthodes existantes.

Certains travaux de la littérature HAD ont examiné les différentes dépendances temporelles qui peuvent exister entre les visites chez un même patient (chevauchement, ou différence minimale et différence maximale entre deux visites). Les auteurs [23, 93] intègrent également la contrainte de précédence. Le problème est modélisé dans [93] en tant que problème de partitionnement et les auteurs ont développé un algorithme "Branch and Price" pour le résoudre. Les objectifs considérés sont la minimisation du nombre de patients non visités, la maximisation des préférences des patients et la minimisation des coûts de déplacements.

Dans un travail récent, [7] propose un modèle basé sur la programmation linéaire mixte et une approche méta-heuristique d'hybridation GRASP\*ILS. Les deux objectifs considérés sont la minimisation du temps total de déplacement ajouté aux non-préférences des patients envers les soignants. Les auteurs [94] proposent une heuristique en deux étapes appelée "Caregivers Routing Heuristic" (CRH). L'objectif est de minimiser les temps d'attente des soignants. La première étape de la CRH consiste à construire les visites optimales des soignants sans contraintes de coordination et d'ordonnancement des patients.

### **2.3.2 La littérature des problèmes de conception de tournées de véhicules dans le contexte HAD : problèmes multi-objectif**

Les objectifs considérés dans les problèmes de tournées de véhicules dans le contexte de l'HAD sont multiples. Nous citons : le coût/distance du trajet des soignants, le temps d'attente du personnel, les préférences des patients envers les soignants, l'équilibre de la charge de travail, les coûts des heures supplémentaires, le nombre de visites non couvertes, etc. Malgré la nature multi-objectif du problème, la plupart des articles traitent de l'optimisation à objectif unique ou convertissent plusieurs objectifs en un seul revenant ainsi à un problème d'optimisation mono-objectif. Avec plus d'une fonction-objectif, il n'y a pas de solution optimale unique qui optimise simultanément toutes les fonctions objectifs, surtout si elles sont conflictuelles, ce qui est généralement le cas. Par conséquent, il est nécessaire d'utiliser les méthodes d'optimisation multi-objectif pour fournir au décideur des solutions alternatives qui assurent le compromis entre les différents objectifs. Nous renvoyons le lecteur à [64] pour plus de motivations et

Référence	Méthode	Contraintes					Objectifs						Horizon de planification	Benchmark	
		CS	CC	TW	SY	PR	CO	TC	WT	PF	PT	PS			WL
[10]	Heur	x		x				x						5	RG+HHCP
[26]	Exact&Heur	x		x			x							1	RG
[16]	Hybrid	x		x			x	x		x	x	x		1	RG
[17]	Exact	x	x	x						x			x	15	HHCP
[9]	Meta			x				x						1	HHCP
[12]	Exact	x		x	x			x						1	RG
[102]	Exact&Meta	x		x			x	x	x	x			x	1	HHCP
[89]	Meta	x	x	x			x	x						7	HHCP
[24]	Exact	x	x	x									x	7	RG+HHCP
[84]	Exact&Heur	x	x	x				x		x				7	HHCP
[18]	Meta	x		x				x		x				1	HHCP
[47]	Heur	x		x	x			x						1	HHCP
[66]	Exact	x		x				x						1	RG
[34]	Exact			x	x				x					1	RG
[22]	Exact			x	x	x		x		x			x	1	[23]
[23]	Exact&Heur			x	x			x		x			x	1	[23]
[4]	Meta			x	x			x		x			x	1	[23]
[93]	Exact			x	x	x		x		x				1	HHCP
[7]	Meta			x	x	x		x		x				1	Extension [23]
[94]	Heur			x	x	x		x	x					1	RG+HHCP

Tableau 2.1 Les problèmes de conception des tournées des soignants dans le contexte d’hospitalisation à domicile

CS : Caregivers’ Skills ; CC : Continuity of care ; TW : time Windows ; SY : Synchronization ; PR : Precedence ; CO : Caregivers’ Overtime ; TC : Traveled Cost ; WT : Waiting time ; PF : Preferences ; PT : penalties due to the violation of soft time windows constraints ; PS : penalties due to the violation of the soft skill matching constraint ; H : Planification’s Horizon ; WL : Workload balance ; RG : Randomly Generated ; Bench : Benchmark ; Heur : Heuristic ; Meta : metaheuristic ; HHCP : HHC Provider

d'utilisations potentielles de l'optimisation multi-objectif sur les problèmes de tournées de véhicules. Pour un aperçu de la recherche existante liée à l'optimisation multi-objectif appliquée aux problèmes de tournées de véhicules en général, nous renvoyons le lecteur à [63, 68].

Nous présentons dans ce qui suit les travaux récents traitant de l'optimisation multi-objectif dans le contexte de l'HAD :

Le problème rencontré par "Landelijke Thuiszorg", une organisation à but non lucratif des services de soins à domicile en Belgique [84], implique deux objectifs différents : la maximisation de la qualité du service et la minimisation totale de la distance parcourue. L'optimisation de ces objectifs est réalisée dans un ordre hiérarchique. Une formulation mathématique basée sur le problème de partitionnement est présentée et une méthode de résolution en deux étapes est proposée pour résoudre le problème.

Les auteurs [18] proposent une formulation basée sur la programmation linéaire mixte. Les contraintes sont les qualifications, le coût des heures supplémentaires des soignants, les frais de déplacement en fonction du mode de transport et de la disponibilité des patients. Les objectifs considérés sont les coûts de déplacement, les temps de déplacement et les préférences des patients pour les infirmières. Pour résoudre les grandes instances, une méta-heuristique est implémentée.

Des méthodes évolutionnaires basées sur le concept de non-dominance de Pareto sont proposées par [8] pour résoudre le problème bi-objectif de la littérature [23]. Les critères d'optimisation retenus sont la minimisation des coûts de déplacement des soignants et la maximisation des préférences des patients envers les soignants. Pour évaluer la performance des algorithmes, des tests expérimentaux ont été effectués sur 37 instances adaptées de celles proposées par [23]. les méthodes proposées résolvent efficacement le problème offrant au décideur un large choix de solutions de bonne qualité.

## 2.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons défini le contexte scientifique dans lequel s'inscrit notre thèse. Il s'agit de la conception des tournées du personnel soignant aux domiciles des patients. Notre problématique appartient à la famille des problèmes combinatoires de tournées de véhicules. Ce sont des problèmes d'une grande complexité. Nous avons présenté une vue d'ensemble sur ces problèmes et les méthodes de résolution qui leurs sont dédiées. Ensuite nous avons introduit les problèmes de tournées de véhicules dans le contexte de l'hospitalisation à domicile (ou des soins à domicile en général). Nous nous sommes intéressés particulièrement aux problèmes VRP avec synchronisation de ressources et fenêtres de temps (deux contraintes exprimées par la Mutualité Française Nord-Pas de Calais) ainsi qu'aux problèmes multi-objectif proposant plusieurs solutions de compromis au décideur. Nous allons présenter dans les chapitres suivants nos contributions dans la cadre de cette thèse. Le Tableau 2.2 récapitule le problème étudié dans chaque chapitre, les contraintes, les fonctions objectifs et les méthodes de résolution.

Chapitre	Contraintes				Objectifs				Benchmark	Résolution	Méthode	Publications
	CS	TW	SY	BR	TC	WT	PF	WL				
Chapitre 3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Extended [37]	Mono-objectif	Méthode exacte	[42, 43]
Chapitre 4		✓	✓		✓		✓	✓	[23]	Mono-objectif	RVND-ILS	[45, 46]
Chapitre 5		✓	✓		✓		✓		[23]	Bi-objectif	$\varepsilon$ -constraint et heuristic	[44]

Tableau 2.2 Contributions dans les chapitres 3, 4 et 5

CS : Caregivers' Skills ; TW : time Windows ; SY : Synchronization ; BR : breaks ; TC : Traveled Cost ; WT : Waiting time ; PF : Preferences ; ; WL : Workload balance ;

## CHAPITRE 3

### MODÉLISATION DE LA PLANIFICATION DES TOURNÉES DU PERSONNEL SOIGNANT AUX DOMICILES DES PATIENTS

#### 3.1 Introduction

La planification des tournées du personnel soignant dans les structures d'hospitalisation à domicile est un problème complexe [13], il appartient à la famille des problèmes combinatoires de tournées de véhicules. Nous avons introduit dans le chapitre précédent, la problématique traitée dans le cadre de cette thèse et nous avons présenté les travaux de la littérature qui traitent de la conception des tournées du personnel soignant aux domiciles des patients. Dans ce chapitre, nous proposons notre propre modélisation du problème, établie en nous basant sur les contraintes et besoins exprimés par la structure HAD (Mutualité Française Nord-Pas de Calais) et les résultats de l'enquête de satisfaction menée auprès de ses patients présentés dans le Chapitre 1.

Ce chapitre est organisé en quatre sections. La section 2 consiste à décrire le problème que nous avons considéré, en nous basant sur les contraintes et besoins exprimés par la Mutualité Française Nord-Pas de Calais, ainsi que le modèle mathématique associé. La section 3 présente les résultats numériques. Une conclusion est ensuite énoncée à la fin de ce chapitre.

#### 3.2 Présentation du problème

Nous considérons un ensemble de patients ayant besoin d'un ensemble de services (soins). Chaque service est caractérisé par une durée de soins, un nombre de ressources pour accomplir les soins, une compétence requise qui répond à la nature des soins, une date de début au plus tôt du service et une date de début au plus tard représentées par une fenêtre de temps, et

un poids représentant la situation clinique du patient. Les soignants travaillent à temps plein et sont caractérisés par une qualification. Toute ressource ayant une qualification «c» par exemple, ne peut visiter que les patients ayant besoin d'un niveau de compétence inférieur ou égal à «c». Le personnel de la santé doit attribuer les soins au patient dans la fenêtre de temps exprimée par celui-ci. Le temps qui s'écoule entre la date d'arrivée de la ressource au domicile du patient et la date de début au plus tôt des soins est communément appelé le temps d'attente. Chaque soignant commence et termine sa tournée dans la structure HAD et ne doit pas dépasser une charge de travail maximale. Il dispose d'une pause repas dans la journée. Chaque patient exprime ses affinités avec les soignants. Tous les patients doivent être soignés dans la journée.

Les contraintes considérées dans notre modélisation sont :

- La synchronisation des soignants ou visite partagée. Notons qu'un patient peut avoir besoin de plusieurs ressources (pas seulement deux) pour ses soins. Ces ressources doivent commencer le service au même moment,
- L'inclusion de la pause repas pour le personnel soignant,
- La prise en considération des compétences du personnel soignant, chaque patient ne peut être soigné que par la compétence adéquate qui répond à la nature de ses soins,
- La disponibilité des patients exprimée par des fenêtres de temps,
- La charge de travail maximale des ressources qu'elles ne doivent pas dépasser dans la journée.

Les objectifs considérés séparément sont :

- La minimisation du temps de trajet du personnel soignant,
- La répartition équilibrée de la charge de travail entre les ressources,
- La minimisation du temps d'attente maximal du personnel soignant,
- La maximisation des préférences des patients envers les soignants de leur choix.

### 3.3 Formulation mathématique du problème

Nous proposons un modèle mathématique basé sur la programmation linéaire mixte pour formaliser notre problème. Ce dernier appartient à la famille des problèmes de tournées de véhicules ou le problème de voyageurs de commerce multiples [66, 99]. Le problème est modélisé sur un graphe orienté  $G = (S, A)$  où  $A$  est l'ensemble des arcs et  $S^+$  est l'ensemble des nœuds représentant les services.

#### Notations et hypothèses

$K$  : L'ensemble du personnel soignant,

$m$  : Le nombre de personnel soignant,

$P$  : L'ensemble des services délivrés aux patients,

$p$  : Le nombre de patients,

$S = P \cup K$  : L'ensemble de services délivrés aux patients et les pauses déjeuner des ressources ( le nombre de pause repas étant égal au nombre de ressources humaines). Ces pauses repas sont considérés comme des services fictifs ou des patients fictifs,

$S^+$  : représente l'ensemble des services réels et fictifs ainsi que les points de départ et d'arrivée des ressources (structure HAD) représentés par des services fictifs  $\{s, e\}$ ,

$A'$  : l'ensemble des arcs définis par :  $A' = A \cup \{(s, i) : i \in S\} \cup \{(i, e) : i \in S\}$ ,

#### Indices

$r, k$  : indices du personnel soignant,

$i, j$  : indices des services réels et fictifs,

#### Paramètres

$[a_i, b_i]$  : Respectivement les dates de début au plus tôt et au plus tard des soins pour le service

$i$  avec :  $a_i \geq 0, b_i \geq 0, b_i \geq a_i$ ,

$d_i$  : La durée des soins estimée pour le service  $i$ ,

$c_{i,j}$  : La durée du trajet entre les services  $i$  et  $j$ ,

$nv_i$  : Le nombre de ressources nécessaires pour le service  $i$ ,

$HV$  : Une grande valeur,

$q_k$  : La qualification de la ressource  $k$ ,

$sk_i$  : Le niveau de qualification minimum requis pour le service  $i$ ,

$aff_{k,i}$  : La valeur booléenne qui représente l'affinité entre la ressource  $k$  et le patient  $i$  ( $aff_{k,i} \doteq 1$  si le patient  $i$  préfère la ressource  $k$ , sinon  $aff_{k,i} \doteq 0$ ),

$poids_i$  : Le poids permet de définir la priorité de chaque patient  $i$ , en affectant un poids important aux patients dont la situation clinique est critique,

$dr_k$  : La charge de travail réalisée par la ressource  $k$  dans la journée qui représente la durée des soins délivrés plus le temps de voyage entre les différents services,

$$dr_k = \sum_{i=0}^{p+m} \sum_{j=1}^{p+m+1} x_{ijk}(d_i + c_{ij}) \forall k \in K$$

$dMax$  : La charge de travail maximale autorisée dans la journée pour toutes les ressources,

$wl_k$  : L'opérabilité de la ressource  $k$  dans la journée calculée par la formule  $wl_k = dr_k \div dMax$ .

### Variables de décision

$\forall (i, j) \in A \forall k \in K$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{Si la ressource } k \text{ effectue le service } j \text{ directement après le service } i; \\ 0, & \text{Sinon.} \end{cases}$$

$t_{ik} \in [a_i, b_i]$  représente la date de début du service  $i$  par la ressource  $k$ .

### Modèle mathématique

La formulation du modèle mathématique basée sur la programmation linéaire mixte est la suivante :

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A'} c_{ij} x_{ijk} \quad (3.1)$$

$$\min \quad Wt \quad (3.2)$$

$$\max \quad Wl \quad (3.3)$$

$$\max \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A'} (poids_i \times aff_{k,i}) x_{ijk} \quad (3.4)$$

Avec :

$Wl$  : Le facteur d'opérabilité minimal du personnel soignant qu'on cherche à maximiser afin d'assurer une charge de travail équitable pour tout le personnel.

$Wt$  : Le temps d'attente total maximal des ressources qu'on cherche à minimiser.

Les objectifs considérés séparément sont : minimiser le temps de voyage du personnel soignant entre les services (réels et fictifs) (3.1), minimiser le temps d'attente cumulé maximal des ressources (3.2), maximiser le facteur d'opérabilité minimal de chaque ressource afin de garantir une charge de travail équitable (3.3) et maximiser les préférences des patients en leur affectant le personnel de leur choix (3.4).

## Contraintes

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in S^+} x_{ijk} = nv_j \quad \forall j \in S^+ \quad \forall i \neq j \quad (3.5)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in S^+} x_{ijk} = nv_i \quad \forall i \in S^+ \quad \forall i \neq j \quad (3.6)$$

$$\sum_{j \in S^+ \setminus \{s\}} x_{ijk} = \sum_{j \in S^+ \setminus \{e\}} x_{jik} \quad \forall k \in K \quad \forall i \in S \quad (3.7)$$

$$\sum_{j \in S^+} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad \forall i \in S^+ \quad \forall i \neq j \quad (3.8)$$

$$\sum_{i \in S^+} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall k \in K \quad \forall j \in S^+ \quad \forall i \neq j \quad (3.9)$$

$$\sum_{j \in S^+} x_{ejk} = 0 \quad \forall k \in K \quad (3.10)$$

$$\sum_{j \in P} x_{sjk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (3.11)$$

$$\sum_{i \in P} x_{iek} = 1 \quad \forall k \in K \quad (3.12)$$

$$a_i \leq t_{ik} \leq b_i \quad \forall i \in S^+ \quad \forall k \in K \quad (3.13)$$

$$t_{jk} \geq t_{ik} + d_i + c_{ij} - (1 - x_{ijk}) \times HV \quad \forall (i, j) \in A \quad \forall k \in K \quad (3.14)$$

$$t_{ik} = t_{ir} \quad \forall i \in P, nv_i \geq 2 \quad \forall k \in K \quad \forall r \in K \quad (3.15)$$

$$t_{ek} - dr_k \leq Wt \quad \forall k \in K \quad (3.16)$$

$$wl_k \geq Wl \quad \forall k \in K \quad (3.17)$$

$$x_{ijk} = x_{jik} = 0 \quad \forall k \in K \quad \forall (i, j) \in P, sk_i \geq q_k \quad (3.18)$$

$$\sum_{i=1}^p x_{p+k,i,k} + x_{p+k,e,k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (3.19)$$

$$\sum_{i=0}^p x_{i,p+k,k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (3.20)$$

$$t_{ik} \geq 0 \quad \forall k \in K \quad \forall i \in S^+ \quad (3.21)$$

$$dr_k \geq 0 \quad \forall k \in K \quad (3.22)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A' \quad \forall k \in K \quad (3.23)$$

Les contraintes (3.5) et (3.6) assurent que chaque patient soit visité par le nombre de ressources demandées pour la délivrance des soins. Cette modélisation permet de ne pas dupliquer les services ayant besoin de plusieurs ressources. (3.7) assure la conservation des flux, si une ressource entre dans le domicile d'un patient, elle doit en sortir.

(3.8) et (3.9) assurent que chaque patient soit visité au plus une fois par la même ressource.

(3.10), (3.11), et (3.12) garantissent que chaque ressource commence et termine sa tournée à la structure HAD.

(3.13) assure que le début de service de la ressource  $k$  chez le patient  $i$  respecte la fenêtre de temps  $[a_i, b_i]$  correspondant à la disponibilité du patient.

(3.14) assure la cohérence des instants de visite chez le patient  $i$ .

(3.15) assure que les ressources demandées dans le cas d'une visite partagée commencent le service au même moment.

(3.16) permet d'éviter des solutions avec un temps d'attente cumulé très grand pour les ressources. La différence entre la date d'arrivée de la ressource à la structure HAD et sa charge de travail ne devrait pas être très grande.

(3.17) assure que la charge de travail de chaque ressource soit supérieure au facteur d'opérabilité minimal qu'on cherche à maximiser dans la fonction-objectif. Cette contrainte évite d'avoir des solutions, où une ressource à une charge de travail moins importante par rapport aux autres et permet donc de garantir une charge de travail équitable pour tout le personnel.

(3.18) assure que chaque patient ne soit visité que par le soignant ayant la qualification nécessaire pour la réalisation de ses soins.

(3.19) et (3.20) assurent que chaque ressource ait une pause repas pendant la journée.

(3.21), (3.21) et (3.23) sont les contraintes d'intégrité des variables.

### 3.4 Étude expérimentale

Notre modèle mathématique est résolu avec le solveur ILOG CPLEX optimization Studio 12.7. Nous présentons dans cette section les expérimentations réalisées sur un ordinateur Intel® Core™i7-2600 CPU avec 8 Go de mémoire. La limite du temps est fixée à 3600s pour toutes les instances.

#### 3.4.1 Présentation des instances

Pour tester notre modèle, nous avons généré un ensemble d'instances basées sur les instances de Dumas et al. [37]. Nous utilisons la notation PxNy.z pour le nom des instances avec  $x$  le nombre de patients,  $y$  le nombre de ressources et  $z$  le numéro de l'instance. La durée des

services varie de 15min à 60min. Chaque patient a une affinité avec au moins deux ressources. Le poids affecté à chaque patient dépend de sa situation clinique et varie entre 0 (aucune priorité) et 10 (priorité maximale). La largeur des fenêtres de temps varie entre 90min à 180min. Les ressources humaines travaillent à temps plein (8h par jour) et sont caractérisées par une qualification allant de 1 (soins usuels) jusqu'à 5 (soins avancés). Les données générées suivent la loi uniforme.

### 3.4.2 Instance de simulation

Dans, le tableau 3.1, nous présentons les données relatives aux services. Chaque service  $j$  est caractérisé par une date de début au plus tôt  $a_j$ , une date de début au plus tard  $b_j$ , une durée  $d_j$ , un poids  $poids_j$ , une qualification requise  $q_j$  et le nombre de ressources nécessaires pour réaliser le service  $nv_j$ . Rappelons que la structure HAD et les pauses déjeuners sont considérées comme des services fictifs.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	P+1	P+2	P+3	HAD
a	0	60	120	140	360	140	60	300	400	240	200	240	0
b	1	120	180	250	450	250	120	360	580	400	400	400	480
d	0	30	15	45	30	60	30	45	15	60	60	60	0
nv	3	1	1	1	2	1	1	1	3	1	1	1	3
q	-	1	3	3	1	1	1	1	2	-	-	-	-
poids	10	1	1	10	0	0	2	9	9	10	10	10	10

Tableau 3.1 Données relatives aux services

L'affinité entre le personnel soignant et les patients est présentée dans le tableau 3.2 par une relation binaire (1 si affinité existe, 0 sinon).

	1	2	3	4	5	6	7	8
R1	1	1	1	0	1	1	1	0
R2	0	1	0	1	1	1	0	1
R3	1	0	1	1	0	0	1	1

Tableau 3.2 Affinité entre les patients et les ressources

Les compétences du personnel de la santé sont données par le tableau 3.3. La qualification

du personnel varie entre 1 (soins usuels) et 5 (soins avancés).

R1	R2	R3
4	3	5

Tableau 3.3 Qualifications du personnel soignant

Le trajet entre les différents services est donné par le tableau 3.4 .

	HAD	1	2	3	4	5	6	7	8	P+1	P+2	P+3	HAD
HAD	0	15	45	20	18	26	21	30	25	44	43	16	0
1	15	0	28	31	44	27	45	24	36	35	31	36	15
2	45	28	0	45	20	16	32	42	35	20	26	29	45
3	20	31	45	0	26	20	28	29	18	33	22	26	20
4	18	44	20	26	0	40	45	37	25	33	18	43	18
5	26	27	16	20	40	0	24	20	20	28	17	33	26
6	21	45	32	28	45	24	0	31	35	27	40	37	21
7	30	24	42	29	37	20	31	0	23	19	23	28	30
8	25	36	35	18	25	20	35	23	0	23	35	36	25
P1	44	35	20	33	33	28	27	19	23	0	26	43	44
P2	43	31	26	22	18	17	40	23	35	26	0	29	43
P3	16	36	29	26	43	33	37	28	36	43	29	0	16
HAD	0	15	45	20	18	26	21	30	25	44	43	16	0

Tableau 3.4 Matrice des distances

### 3.4.2.1 Résultats

Le tableau 3.5 présente nos résultats obtenus en optimisant chacune des quatre fonctions objectifs séparément. Ces résultats nous permettent d'observer le caractère conflictuel des fonctions objectifs.

Objectif considéré	3.1	3.2	3.3	3.4
3.1	362min	279min	0	3
3.2	391min	168min	0	29
3.3	416min	221min	0.54	25
3.4	418min	215min	0	29

Tableau 3.5 Valeurs des quatres fonctions objectifs pour chaque fonction-objectif optimisée

Le tableau 3.6 représente la solution donnée par le solveur CPLEX en minimisant le temps de déplacement total des ressources. Les lignes représentent les infirmiers, et les colonnes représentent les services. Nous présentons l'affectation des patients aux soignants et la date de début de service du personnel de la santé. Nous remarquons que chaque ressource dispose d'une pause repas, représentée par les services fictifs  $P + 1$ ,  $P + 2$  et  $P + 3$  correspondants respectivement aux ressources  $R1$ ,  $R2$  et  $R3$ . Le patient 8 est visité simultanément par trois soignants qui commencent le service à 440m.

	1	2	3	4	5	6	7	8	P+1	P+2	P+3	HAD
R1						60		440	240			480
R2			140				360	440			240	480
R3	60	120		385	151			440		277		480

Tableau 3.6 Temps d'arrivée en minutes et affectation du personnel soignant aux services pour la fonction-objectif minimisation du temps de déplacements.

### 3.4.3 Expérimentations et résultats

Les tableaux 3.9, 3.8, 3.7, 3.10 présentent respectivement les résultats obtenus de l'optimisation mono-objectif des quatre fonctions [3.1- 3.4] considérées dans notre modèle mathématique. Nous ne présentons que les résultats des instances pour lesquelles nous avons obtenus une solution dans 1h de temps de calcul.

Nous remarquons que le problème est difficile à résoudre, particulièrement quand il s'agit d'optimiser les fonctions objectifs de temps d'attente et d'équilibre de la charge de travail. Seulement quatre instances sont résolues à l'optimalité pour chacune des deux fonctions objectifs, comme le montrent les résultats des tableaux 3.7, 3.8.

Pour la fonction-objectif qui minimise le temps de déplacement, seulement 7 solutions optimales sont trouvées 3.9. Quand il s'agit de minimiser la fonction-objectif des préférences des patients, le programme résout 9 instances à l'optimalité 3.10.

Les résultats relatifs aux préférences des patients dépendent principalement des données. Chaque patient a un poids qui représente sa priorité. La meilleure solution est celle qui

maximise la somme des poids des patients visités par le personnel de leur choix. La variation des résultats d'une instance à une autre dépend de la taille de l'instance mais aussi de l'importance des poids affectés aux patients.

La valeur du facteur d'opérabilité minimal des ressources humaines varie en fonction de la charge de travail réalisée par les soignants dans la journée.

Le temps d'attente cumulé maximal réalisée par une ressource que l'on cherche à minimiser, ne dépend pas uniquement de la taille de l'instance 3.8, contrairement au temps total de déplacements, où le coût de la fonction-objectif augmente en fonction de la taille de l'instance. Le temps de déplacement est fortement lié au nombre de patients pris en charge et au nombre du personnel soignant 3.9.

Pour conclure, le problème est difficile à résoudre, quelques instances de petite taille sont résolues à l'optimalité. Pour les moyennes et grandes instances, le temps de calcul est relativement important.

Instance	Équilibre de la charge de travail	cpu
p10n2.001	0.54*	0,233634033
p10n2.003	0.62*	0,190243896
p16n4.001	0.6*	778,569565
p16n4.002	0.6*	2472,9844
p16n4.003	0.6	913,712465
p16n4.004	0.7	20943,3999
p16n4.005	0.6	748,141878

Tableau 3.7 Résultats des expérimentations pour la fonction-objectif équilibre de la charge de travail

\*Solution Optimale

### 3.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, un problème de planification quotidienne des tournées du personnel soignant chez les patients à domicile. Nous avons proposé un modèle basé sur la programmation linéaire mixte pour satisfaire (1) les patients (les fenêtres de temps de disponibilité aux domiciles, les préférences envers les soignants, la compétence adéquate au

Instance	Temps d'attente	cpu
P10n2.001	166*	8,81298096
p10n2.003	58*	1,57309497
p16n4.001	139*	280,593391
p16n4.002	163*	36000,0349
p16n4.003	72	763,660659
p16n4.004	339	19794,7325
p16n4.005	248	36000,024
p32n8.003	92	36000,2116
p32n8.004	207	36000,1494
p32n8.005	180	36000,2039

Tableau 3.8 Résultats des expérimentations pour la fonction-objectif temps d'attente

instance	Temps total de déplacement	cpu
p10n2.001	194*	0,15
p10n2.003	259*	0,214
p16n4.001	358*	8,229
p16n4.002	334*	6,88
p16n4.003	347*	3,61
p16n4.004	321*	4,04
p16n4.005	356*	3,90
p32n8.003	609	36000,19
p32n8.004	656	36000,19
p32n8.005	626	36000,21

Tableau 3.9 Résultats des expérimentations pour la fonction-objectif temps total de déplacements

besoin du patient), et (2) le personnel de la santé (pause repas, charge de travail équilibrée, temps d'attente minimal) tout en minimisant les coûts relatifs aux déplacements. Notre programme permet d'attribuer les soins à tous les patients et de leur affecter dans la mesure du possible le personnel de leur choix dont la qualification répond à leurs besoins. Le programme a prouvé sa performance en termes de temps de calcul sur les petites instances. Pour les grandes instances, le temps de calcul est important. Dans ce cas, une méthode approchée est nécessaire pour remédier à ce problème.

Instance	Préférences des patients	cpu
p10n2.001	47*	0,030822998
p10n2.003	57*	0,051325928
p16n4.001	112*	0,398532959
p16n4.002	120*	0,697459961
p16n4.003	186*	0,339436035
p16n4.004	100*	4,86733301
p16n4.005	152*	4,60947119
p32n8.003	225*	3,073229
p32n8.004	220*	4283,66771
p32n8.005	265	4278,37732

Tableau 3.10 Résultats des expérimentations pour la fonction-objectif des préférences des patients envers les soignants

## CHAPITRE 4

### RÉSOLUTION APPROCHÉE DU PROBLÈME DE TOURNÉES DE VÉHICULES AVEC LES CONTRAINTES DE FENÊTRES DE TEMPS ET DE SYNCHRONISATION DANS LE CONTEXTE DE L'HAD

#### 4.1 Introduction

Les structures d'hospitalisation à domicile (HAD) sont en pleine croissance en France. De ce fait, elles doivent être parfaitement organisées afin d'assurer la qualité, la permanence et la continuité des soins pour les patients, et de respecter la charge de travail des soignants, tout en réduisant les coûts relatifs aux processus des soins. Nous nous intéressons dans cette thèse à la problématique de la conception des tournées du personnel soignant aux domiciles des patients. Il s'agit d'un problème de tournées de véhicules VRP. Nous rappelons que notre problème initial est le suivant :

Nous considérons un ensemble de patients ayant besoin d'un ensemble de services (soins). Chaque service est caractérisé par une durée de soins, un nombre de ressources demandées pour accomplir les soins, une compétence requise, une date de début au plus tôt et une date de début au plus tard du service. Les ressources humaines travaillent à temps plein et sont caractérisées par une qualification allant de 1 (soins usuels) jusqu'à 5 (soins avancés). Le personnel soignant commence et termine sa tournée dans la structure HAD et ne doit pas dépasser une charge de travail maximale dans la journée. Il doit attribuer les soins aux patients et disposer d'une pause repas en respectant les fenêtres de temps. Le temps d'attente d'une ressource est le temps qui s'écoule entre la date d'arrivée de la ressource au domicile du patient et la date de début au plus tôt des soins. Tous les patients doivent être soignés dans la journée. Le modèle proposé inclut les quatre objectifs suivants : (1) Minimiser le temps de voyage entre les domiciles des patients, (2) Minimiser le temps d'attente du personnel

soignant, (3) Maximiser la satisfaction des patients en leur permettant d’être visités par les ressources de leur choix, (4) Maximiser le facteur d’opérabilité minimal de chaque ressource afin d’assurer une répartition équilibrée de la charge de travail du personnel de la santé. Les contraintes considérées sont donc les suivantes :

- La disponibilité des patients exprimée par des fenêtres de temps,
- Les visites partagées : un patient peut avoir besoin de plusieurs ressources pour ses soins,
- L’inclusion de la pause repas pour le personnel soignant,
- La prise en considération des compétences du personnel soignant, chaque patient ne peut être soigné que par la compétence adéquate à son besoin.

Dans le chapitre 3, nous avons présenté un outil d’aide à la décision basé sur la programmation linéaire mixte afin d’établir une planification quotidienne des soins à domicile. Nous proposons dans ce chapitre une méthode approchée qui constitue une alternative très intéressante pour traiter les instances de moyenne et grande taille.

Pour prouver la performance de notre méthode approchée, nous avons relâché certaines contraintes de notre problème. Nous commençons par prendre en considération uniquement les contraintes de fenêtres de temps et de synchronisation, pour réduire notre problème à celui présenté par Bredstrom et Rönnqvist [22, 23] et pouvoir se comparer avec les travaux existants dans la littérature sur cette variante [4, 22, 23].

Dans la littérature, ce problème est appelé VRPTWSyn en tant que problème de tournées de véhicules avec fenêtres de temps et contraintes de synchronisation [3], ou VRPTWSV en tant que problème de tournées de véhicules avec fenêtres de temps et visites partagées [99]. Nous choisissons le VRPTWSyn pour désigner le problème considéré.

Le VRPTWSyn est une extension de VRPTW, avec en plus des contraintes de synchronisation. Comme le VRPTW est un problème NP-difficile [33], VRPTWSyn est également un problème NP-difficile.

Nous proposons dans ce chapitre, un algorithme basé sur la méta-heuristique ILS (Iterated local Search) couplé avec le RVND (Random Variable Neighborhood Descent), une variante de la méta-heuristique VND (Variable Neighborhood Descent). Notre méthode intègre quelques techniques de la recherche locale issues de la littérature [20] (Déplacement, Échange, etc.) que nous avons adaptées aux contraintes de synchronisation pour éviter le cas du "cross synchronization" [4].

En se comparant avec les méthodes proposées dans la littérature [4, 23], notre algorithme est en mesure de produire des solutions de bonne qualité avec un temps de calcul raisonnable. Une étude de la performance de nos opérateurs de la recherche locale a été menée afin de les évaluer en termes de temps de calcul et d'amélioration de la solution. Les résultats numériques sont présentés dans la section 4.5. Une conclusion de notre travail est ensuite donnée à la fin de ce chapitre.

## 4.2 Présentation du problème

Nous rappelons que nous avons réduit notre problème initiale au problème VRPTWSyn présenté par Bredstrom et Rönnqvist [23]. La définition du problème appliqué au contexte de l'hospitalisation à domicile, consiste à concevoir la tournée de véhicule de chaque soignant afin de desservir un ensemble de patients dispersés géographiquement en respectant leurs disponibilités représentée par une fenêtre de temps. Le soignant doit attendre s'il arrive chez le patient avant l'ouverture de la fenêtre de temps, et les arrivées tardives sont interdites. Toutes les routes commencent et se terminent dans la structure HAD et doivent respecter les contraintes de synchronisation pour certaines visites. Par exemple, la synchronisation de deux visites est nécessaire lorsqu'un patient a besoin d'être porté à son lit [93], deux soignants sont alors nécessaires en même temps. De plus, les heures supplémentaires des soignants ne sont pas permises et chaque patient peut exprimer ses préférences concernant le soignant par qui il souhaite être visité.

Nous considérons un ensemble de patients ayant besoin d'un ensemble de services (soins). Chaque service est caractérisé par une durée de soins, un nombre de ressources nécessaires pour accomplir les soins dans des fenêtres de temps spécifique. Chaque fenêtre de temps est caractérisée par une date de début au plus tôt et une date de début au plus tard du service. Le personnel soignant commence et termine sa tournée dans la structure HAD et ne doit pas dépasser une charge de travail maximale dans la journée.

Les contraintes considérées dans notre nouvelle modélisation sont :

- La synchronisation des visites (visites partagées) : un patient peut avoir besoin de deux ressources,
- La disponibilité des patients exprimée par des fenêtres de temps.

Les objectifs considérés sont :

- Minimiser le temps de trajet des soignants entre les domiciles des patients,
- Satisfaire les préférences des patients envers les soignants.
- Assurer une répartition équilibrée de la charge de travail des soignants.

### 4.3 Formulation mathématique du problème

Le problème étudié peut être formulé sur un graphe orienté  $G(V, A)$  où  $A$  est l'ensemble des arcs et  $V = V^- \cup \{s, e\}$  est l'ensemble de sommets modélisant les services. Pour des raisons de modélisation,  $\{s, e\}$  sont considérés comme de services fictifs qui représentent la structure HAD, le point de départ et d'arrivée de chaque soignant.

L'ensemble des soignants est noté par  $K = \{1..m\}$  où  $m$  est le nombre de soignants disponibles. Pour chaque service  $i \in V$ , la durée de soins est définie par  $d_i$  ( $d_s = d_e = 0$ ) et la fenêtre de temps est définie par  $[a_i, b_i]$  tel que :  $a_i$  et  $b_i$  spécifient respectivement l'heure de début au plus tôt et au plus tard du service  $a_i \geq 0, b_i \geq 0$ . Les services fictifs représentant les points de départ et d'arrivée de chaque soignant  $k$  sont également associés à des fenêtres de temps  $[a_{sk}, b_{sk}] = [a_{ek}, b_{ek}]$ .

$C = (c_{ij})$  est la matrice de temps de trajets associée à  $A$ . Le temps de trajet entre deux services  $(i, j) \in A$  est représenté par le paramètre  $c_{i,j}$ .

Nous utilisons l'ensemble  $(i, j) \in P^{syn} / (i, j) \in V \times V$  pour désigner les visites synchronisées.  $i$  et  $j$  sont les nœuds représentant le même patient qui a besoin, pour ses soins, d'être visité simultanément par deux soignants différents. Toutes les données concernant ce service sont identiques pour les deux nœuds  $i$  et  $j$ . Dans la solution finale,  $i$  et  $j$  doivent être servis en même temps par deux soignants distincts.

Chaque patient exprime ses préférences par rapport aux soignants,  $p_{i,k}$  définit la préférence négative de l'affectation du soignant  $k$  au service  $i$ .

$w$  est la différence entre la plus longue et la plus courte tournée.

### Variables de décision

La formulation du problème utilise les deux types de variables suivants :

$$\forall (i, j) \in A \forall k \in K$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{Si la ressource } k \text{ visite le patient } j \text{ directement après le patient } i; \\ 0, & \text{Sinon.} \end{cases}$$

$t_{ik} \in [a_i, b_i]$  représente la date de début du service  $i$  par la ressource  $k$ .

### Modèle mathématique

La formulation du modèle mathématique comme définie par les auteurs Bredström and Rönnqvist [23] est la suivante :

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ijk} \tag{4.1}$$

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} p_{ik} x_{ijk} \quad (4.2)$$

$$\min w \quad (4.3)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j: (i,j) \in A} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in V^- \quad (4.4)$$

$$\sum_{j: (s,j) \in A} x_{sjk} = \sum_{j: (j,e) \in A} x_{jek} = 1 \quad \forall k \in K \quad (4.5)$$

$$\sum_{j: (i,j) \in A} x_{ijk} - \sum_{j: (j,i) \in A} x_{jik} = 0 \quad \forall i \in V^- \quad \forall k \in K \quad (4.6)$$

$$t_{ik} + (c_{ij} + d_i) x_{ijk} \leq t_{jk} + b_i (1 - x_{ijk}) \quad \forall (i,j) \in A \quad \forall k \in K \quad (4.7)$$

$$a_i \sum_{j: (i,j) \in A} x_{ijk} \leq t_{ik} \leq b_i \sum_{j: (i,j) \in A} x_{ijk} \quad \forall i \in V^- \quad \forall k \in K \quad (4.8)$$

$$a_{ik} \leq t_{ik} \leq b_{ik} \quad \forall i \in \{s, e\} \quad \forall k \in K \quad (4.9)$$

$$\sum_{k \in K} t_{ik} = \sum_{k \in K} t_{jk} \quad \forall [i, j] \in P^{syn} \quad (4.10)$$

$$\sum_{j: (i,j) \in A} d_i x_{ijk} - \sum_{j: (j,i) \in A} d_i x_{ijl} \leq w \quad \forall k \in K \quad \forall l \in K \setminus \{k\} \quad (4.11)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall (i,j) \in A \quad \forall k \in K \quad (4.12)$$

$$t_{ik} \geq 0 \quad \forall i \in V \quad \forall k \in K \quad (4.13)$$

$$w \geq 0 \quad (4.14)$$

Trois objectifs sont considérés séparément : (4.1) minimisant le temps total des tournées des soignants : la somme du temps de trajet entre la structure HAD au premier patient, temps de

trajet entre les patients successifs et du dernier patient à la structure HAD ; (4.2) maximisant la somme des préférences des patients pour les soignants de leur choix ; pour harmoniser les trois fonctions objectifs, cet objectif est transformé en une minimisation de la somme des préférences négatives ; (4.3) minimisant la différence entre la plus longue et la plus courte tournée des soignants afin de garantir un équilibre de la charge de travail entre les soignants.

Les contraintes (4.4) assurent que chaque patient soit servi par un seul soignant. Les contraintes (4.5) garantissent que chaque soignant commence et termine sa tournée au sein de la structure HAD. Les contraintes (4.6) assurent la conservation des flux ; Si un soignant entre chez un patient, il doit le quitter. Les contraintes (4.7), (4.8) et (4.9) assurent que l'heure de début de service du soignant respecte la fenêtre de temps des soins du patient. Les équations (4.10) garantissent que les visites synchronisées commencent simultanément. Les contraintes (4.11) sont les contraintes de l'équilibre de la charge de travail entre les différents soignants. Elles mesurent la différence entre les temps de service les plus longs et les plus courts parmi les soignants. Cette différence est minimisée si l'objectif considéré dans le problème est de minimiser  $w$ . Les contraintes (4.12), (4.13) et (4.14) sont des contraintes d'intégrité des variables.

#### 4.4 Méthode de résolution

Dans cette section, nous décrivons notre méthode de résolution pour le VRPTWSyn. Nous proposons l'algorithme RVND-ILS tel que présenté dans l'Algorithme 1. C'est une méta-heuristique de recherche locale itérative (ILS) qui utilise une variante de "Variable Neighborhood Descent" appelée "Random Variable Neighborhood Descent" comme une phase de recherche locale.

---



---

 Algorithm 1 L'algorithme ILS [82]
 

---

```

1:  $s^0 = \text{Generer\_une\_solution\_initiale}()$ 
2:  $s^* = \text{RechercheLocal\_RVND}(s^0)$ 
3: répéter
4:    $s' = \text{Perturbation}(s^*)$ 
5:    $s^{*'} = \text{RechercheLocale\_RVND}(s')$ 
6:    $s^* = \text{Critere\_dacceptation}(s^*, s^{*'})$ 
7: jusqu'à (Condition d'arrêt remplie)
  
```

---

La méta-heuristique ILS [82] est simple, facile à mettre en œuvre, robuste et très efficace. L'idée essentielle de l'ILS réside dans la focalisation de la recherche, non pas sur l'ensemble des solutions mais sur un sous-espace plus petit défini par les solutions localement optimales [82].

L'algorithme commence la recherche locale avec une solution initiale générée avec une heuristique constructive `Generer_une_solution_initiale ()`. La solution générée est ensuite améliorée via la procédure `RechercheLocale_RVND ()`. La solution obtenue est le point de départ des itérations ILS. L'ILS est exécuté itérativement jusqu'à ce qu'un nombre fixe d'itérations soit atteint; ce nombre est basé sur la taille de l'instance. Les itérations ILS sont basées sur la construction d'une séquence de solutions localement optimales en : (a) perturbant la solution minimale locale actuelle, et (b) appliquant la procédure de recherche locale `RVNDLocalSearch ()` à la solution perturbée. La solution actuelle est évaluée à la fin de chaque itération avec la procédure `Critere_dacceptation ()`, si elle améliore la meilleure solution trouvée, elle sera utilisée comme le début de l'itération suivante. Nous avons utilisé une variante de la procédure VND comme recherche locale; Il s'agit d'un ordre aléatoire des opérateurs, connu sous RVND. L'algorithme RVND s'arrête lorsque toutes les structures de voisinage définies échouent à améliorer la solution courante. Plus de détails sur les procédures : `Generer_une_solution_initiale ()`, `RechercheLocale_RVND ()` et `Perturbation ()` sont donnés dans la Section 4.4.1, Section 4.4.2 et la Section 4.4.3.

#### 4.4.1 Heuristique constructive de la solution initiale

La solution initiale est générée à partir d'une heuristique constructive basée sur l'algorithme de la meilleure insertion "best insertion heuristic" [97].

L'heuristique d'insertion vise à sélectionner les patients dont les coûts d'insertion dans une tournée minimisent la fonction-objectif. L'heuristique constructive est adaptée pour obtenir des solutions réalisables en respectant les contraintes de fenêtres de temps et de synchronisation.

Notre solution initiale est construite en deux étapes. Tout d'abord, nous construisons une solution partielle où seuls les couples de services synchronisés sont insérés. Nous construisons un nombre fixe de tournées correspondant au nombre de soignants disponibles, puis nous insérons les visites synchronisées dans des positions aléatoires après avoir vérifié la faisabilité des fenêtres de temps. Cette décision est prise pour obtenir une solution diversifiée à chaque exécution de la méthode pour la même instance. Dans la deuxième phase, nous insérons des patients non encore insérés dans la solution partielle en utilisant l'heuristique de la meilleure insertion comme montré dans l'algorithme 2. La procédure d'insertion au moindre coût (selon la fonction-objectif) est répétée jusqu'à ce que tous les patients soient insérés dans la solution. Nous rappelons que la procédure d'insertion considère la faisabilité des fenêtres de temps et des contraintes de synchronisation.

#### 4.4.2 Random Variable Neighborhood Descent RVND

"Random Variable Neighborhood Descent" est une variante de la méta-heuristique VND (Variable Neighbourhood Descent). Le VND consiste à explorer l'espace des solutions via un changement systématique entre les structures de voisinage  $O(op_1, op_2, \dots, op_n)$ , n'acceptant que des solutions améliorant la solution courante et retournant au premier voisinage lorsqu'une meilleure solution est trouvée. Le RVND utilise un ordre aléatoire des voisinages. Comme indiqué dans l'algorithme 3, à chaque fois qu'un opérateur de recherche locale échoue à améliorer la solution actuelle, il est éliminé et l'algorithme 3 choisit un autre opérateur de recherche

---

 Algorithm 2 *Generer\_une\_solution\_initiale()*

```

1: entrées :
2:  $V$  : ensemble de patients non servis
3:  $S$  : solution vide ou partielle (ensemble de routes)
4: sortie : Solution initiale  $S^0$ 
5:  $S = S^0$ 
6: Tant que  $V$  n'est pas vide faire
7:   calculer tous les coûts des insertions possibles pour chaque  $v \in V$  pour chaque position
   dans  $S$ 
8:   trier toutes les insertions
9:    $Insertion(v', position)$  l'insertion la moins coûteuse est conservée
10:  si  $Insertion(v', position)$  est réalisable alors
11:    le patient  $v'$  est inséré dans la position  $(v', position)$ 
12:     $S$  est mise à jour
13:     $V \setminus \{v'\}$ 
14:  sinon
15:    Tant que  $Insertion(v, position)$  n'est pas réalisable faire
16:      obtenir la prochaine insertion moins coûteuse  $Insertion(v'', position'')$ 
17:    fin Tant que
18:  fin si
19: fin Tant que

```

---

locale aléatoirement. Sinon, l'opérateur est gardé et un autre opérateur de recherche est choisi aléatoirement parmi toutes les structures de voisinage. L'algorithme RVND s'arrête si aucun des opérateurs ne peut améliorer la meilleure solution actuelle. Nous utilisons la meilleure stratégie d'amélioration pour toutes les structures de voisinage définies. Nous utilisons **Coût (S)** pour désigner le processus de calcul de la valeur de la fonction-objectif d'une solution  $S$  en fonction de l'objectif considéré dans l'optimisation.

---



---

Algorithm 3 L'algorithme "Random Variable Neighborhood Descent"

```

1: Initialiser  $O(op_1, op_2, \dots, op_n)$ 
2:  $U^* = \text{Coût}(S)$ 
3: répéter
4:    $S' = O_k(S)$  / k aléatoire  $\sim 1..n$ 
5:   si  $\text{Coût}(S') < U^*$  alors
6:      $S = S'$ 
7:     Initialiser  $O$  to  $(op_1, op_2, \dots, op_n)$ ;
8:   sinon
9:      $O \setminus O_k$ ;
10:  fin si
11: jusqu'à ( $O$  est vide)

```

---

Chaque structure de voisinage représente un ensemble de solutions pouvant être obtenues à partir de la solution actuelle en appliquant certains opérateurs spécifiés. Nous proposons cinq opérateurs, adaptés de la littérature, pour gérer les contraintes de synchronisation de notre problème.

Ces opérateurs sont utilisés pour les trois objectifs. Pour l'objectif de minimisation de temps de trajet total, ces opérateurs peuvent être appliqués sur la même tournée ou sur des tournées différentes. Mais, pour les objectifs des préférences des patients et d'équilibre de la charge de travail, les opérateurs sont appliqués sur des tournées différentes, sinon la valeur de la fonction-objectif ne changera pas. En raison des contraintes de synchronisation, toute modification sur une tournée où une visite synchronisée existe, peut entraîner des changements sur d'autres tournées.

- (a) **Opérateur d'échange** : La solution voisine est obtenue en échangeant deux patients appartenant à deux tournées (Figure 4.1).
- (b) **Opérateur d'insertion aléatoire** : La solution voisine est obtenue en supprimant un patient d'une tournée et en le réinsérant aléatoirement dans la même tournée ou dans une tournée différente (Figure 4.2).
- (c) **Opérateur de la meilleure insertion** : Cet opérateur fonctionne de la même façon que le précédent, sauf que l'insertion du patient supprimé se fait de manière à minimiser

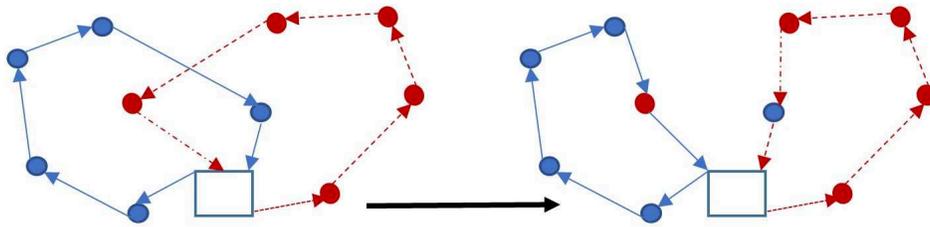


Figure 4.1 Opérateur d'échange

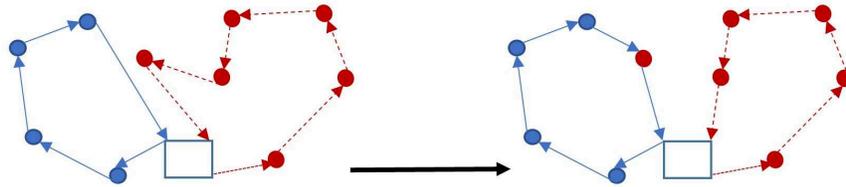


Figure 4.2 Opérateur d'insertion aléatoire

le coût de la solution.

- (d) **Opérateur des meilleures multiples insertions** : La solution voisine est obtenue en supprimant plusieurs patients et en les réinsérant dans les meilleurs positions minimisant le coût de la solution (Figure 4.3).

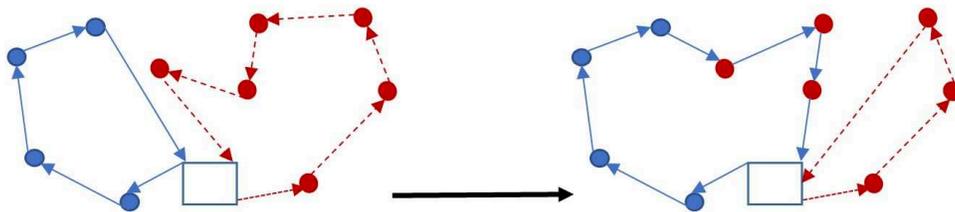


Figure 4.3 Opérateur des meilleures multiples insertions

- (e) **2-opt\*** : La solution voisine est obtenue en supprimant une arête de deux tournées différentes de la solution courante et on reconnectant le début de chacune avec la fin de l'autre.(Figure 4.4).

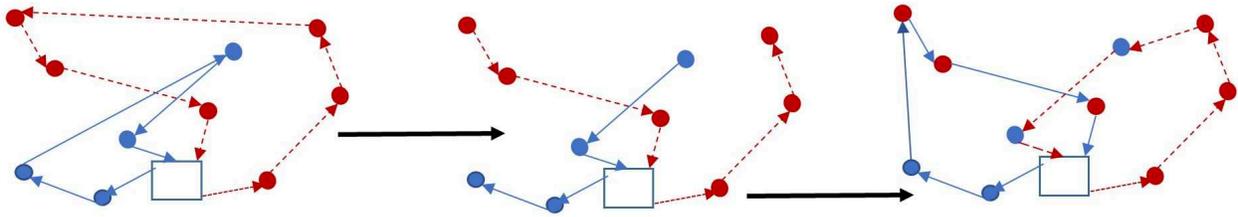


Figure 4.4 2opt\*

### 4.4.3 Perturbation de la solution

La méta-heuristique ILS s'échappe des optima locaux en appliquant une perturbation à la solution courante. La perturbation correspond à des mouvements aléatoires dans un voisinage d'ordre plus important que les voisinages de la recherche locale. Le rôle de la procédure de perturbation consiste à passer d'une solution à une autre en explorant un voisinage plus vaste.

Dans notre méthode de résolution, perturber la meilleure solution courante consiste à appliquer plusieurs opérateurs d'insertion aléatoire, où un voisin d'une solution  $S$  est obtenu en retirant  $r$  patients de la solution et en les réinsérant dans des positions aléatoires.  $r$  est un paramètre configuré en fonction de la taille de l'instance. Notons que si  $r$  est trop grand, l'ILS peut se comporter comme un redémarrage aléatoire, de sorte que de meilleures solutions ne seront trouvées qu'avec une très faible probabilité. D'un autre côté, si le paramètre  $r$  est trop petit, la recherche locale retombera souvent dans l'optimum local que l'on vient de visiter et l'exploration de l'espace de recherche sera très limitée.

## 4.5 Résultats Numériques

Dans cette section, nous présentons les résultats numériques pour l'algorithme 1.

### 4.5.1 Instances de simulation

Les instances utilisées dans nos expériences sont fournies par [23]. L'indice de référence comporte trois catégories basées sur le nombre de patients (20, 50, 80). Chaque instance a 3 types de largeur de fenêtres de temps : S (petite), M (moyenne) et L (grande). Environ 10% des visites sont synchronisées.

### 4.5.2 Expérimentations

Notre algorithme est codé avec Java et les expérimentations sont conduites sur un ordinateur Intel<sup>®</sup> Core<sup>™</sup> i7- 4710hq CPU 2,50w GHz et 8 Go de Ram.

La méthode RVND-ILS est exécutée 30 fois pour chaque instance. Le nombre d'itérations d'ILS de chaque exécution est basé sur le nombre de patients  $n$  de l'instance et un paramètre  $k$  ( $k = 40$ ).

Les résultats dans les tableaux 4.1, 4.2 et 4.3 montrent la performance de notre algorithme en optimisant respectivement les objectifs du temps total de trajet, les préférences des patients et l'équilibre de la charge de travail. Pour chaque instance, les tableaux montrent : la meilleure solution trouvée parmi toutes les exécutions ; la valeur moyenne ; l'écart-type ; et le temps de calcul moyen. Nos résultats sont comparés avec les meilleurs résultats trouvés dans la littérature.

L'algorithme RVND-ILS trouve toutes les meilleurs solutions de la littérature dans un temps de calcul très court, à l'exception de l'instance 8M lorsque l'objectif des préférences est considéré. De plus, le temps de calcul est également amélioré pour toutes les moyennes et grandes instances. Notre algorithme améliore les résultats de la littérature pour 22 cas.

Par exemple, lorsque l'objectif de temps de trajet est considéré, la solution est améliorée sur trois instances 7L, 10S et 10L comme indiqué dans le tableau 4.1.

Pour l'objectif des préférences comme indiqué dans le tableau 4.2, nous avons amélioré la qualité de la solution de trois instances 9S, 9M et 9L.

Pour l'équilibre de la charge de travail, nous avons amélioré la qualité de la solution sur

16 instances parmi 30 (instances moyennes et grandes) avec des temps de calcul très courts par rapport aux autres méthodes. Notre algorithme RVND-ILS a prouvé son efficacité par rapport aux autres méthodes de la littérature.

### 4.5.3 Analyse de la performance des opérateurs de la recherche locale

Le but de notre étude est d'examiner l'efficacité des opérateurs étudiés. Le temps CPU moyen pour l'exécution de chaque opérateur est calculé pour chaque fonction-objectif; de plus, chaque opérateur a un compteur  $A$  qui est augmenté à chaque fois que l'opérateur améliore une solution donnée et un compteur  $B$  pour le nombre total de fois que l'opérateur est invoqué. Le ratio de  $A$  sur  $B$  représente le taux de réussite de chaque opérateur.

Nous exécutons chaque instance 30 fois pour chaque fonction-objectif. La Figure 4.5 montre la moyenne des taux de succès enregistrés et le temps CPU de chaque opérateur. Pour les objectifs de temps de voyage et des préférences, l'opérateur de déplacement multiple (Multiple Move) est celui qui améliore le plus de fois mais il consomme plus de temps de calcul. Nous observons que la meilleure structure de voisinage est la **Meilleure Insertion** (Move Best Insertion). Elle a un taux de réussite significatif dans un temps d'exécution raisonnable.

## 4.6 Conclusion

Nous avons proposé une nouvelle approche pour étudier le VRPTWSyn appelée RVND-ILS. Il s'agit de la méta-heuristique ILS couplée à RVND (variante de la méta-heuristique VND) . Le RVND est utilisé dans la phase de la recherche locale de l'ILS. Il utilise un ordre aléatoire de voisinage pour l'exploration des solutions voisines de la solution courante. La solution initiale est construite en se basant sur l'heuristique de la meilleure insertion. Nous avons développé de nombreux opérateurs de la recherche locale. La méthode proposée RVND-ILS fournit toutes les meilleures solutions connues, dans un temps de calcul très court, sauf dans le cas où l'objectif des préférences est minimisé.

Une étude des opérateurs proposés a été menée pour évaluer et analyser l'efficacité des opé-

Data	<i>Best</i>	MIP		H		BP1		BP2		SA		RVND-ILS				
		Sol	CPU	Sol	CPU	Sol	CPU	Sol	CPU	Sol	CPU	Sol	Max	Avrg	St Dev	CPU
1S	3.55*	3.55	3.43	3.55	120.03	3.55	1.96	3.55	1.12	3.55	0.02	3.55	3.55	3.55	0.00	0.12
1M	3.55*	3.55	14.48	3.55	120.25	3.55	221.93	3.55	3.69	3.55	0.02	3.55	3.55	3.55	0.00	0.18
1L	3.39*	3.39	76.71	3.39	120.48	3.39	107.41	3.39	11.91	3.39	0.03	3.39	3.39	3.39	0.00	0.19
2S	4.27*	4.27	0.22	4.27	120.07	4.27	3.28	4.27	0.56	4.27	0.02	4.27	4.27	4.27	0.00	0.15
2M	3.58*	3.58	25.97	3.58	120.11	3.58	8.12	3.58	3.2	3.58	0.03	3.58	3.58	3.58	0.00	0.15
2L	3.42*	3.42	183.1	3.42	120.95	3.42	2.72	3.42	7.41	3.42	0.03	3.42	3.42	3.42	0.00	0.14
3S	3.63*	3.63	1.79	3.63	120.26	3.63	14.17	3.63	3.84	3.63	0.02	3.63	3.63	3.63	0.00	0.12
3M	3.33*	3.33	21.24	3.33	120.19	3.33	17.57	3.33	4.31	3.33	0.03	3.33	3.33	3.33	0.00	0.15
3L	3.29*	3.29	96.47	3.29	120.6	3.29	42.78	3.29	1.44	3.29	0.02	3.29	3.29	3.29	0.00	0.16
4S	6.14*	6.14	30.9	6.14	120.6	6.14	14.02	6.14	1.54	6.14	0.02	6.14	6.16	6.14	0.00	0.34
4M	5.67*	5.67	1380	5.67	120.15	5.67	27.53	5.67	2.55	5.67	0.05	5.67	5.67	5.67	0.00	0.09
4L	5.13*	5.13	3600	5.3	120.04	5.13	9.74	5.13	7.69	5.13	0.09	5.13	5.17	5.14	0.01	0.1
5S	3.93*	3.93	6.99	3.93	120.13	3.93	2.84	3.93	2.9	3.93	0.03	3.93	3.93	3.93	0.00	0.33
5M	3.53*	3.53	6.2	3.53	120.09	3.53	57.01	3.53	9.1	3.53	0.03	3.53	3.53	3.53	0.00	0.1
5L	3.34*	3.34	225.2	3.34	120.85	3.34	9.11	3.34	5.15	3.34	0.03	3.34	3.34	3.34	0.00	0.15
6S	8.14*	8.14	3600	8.14	600.94	8.14	3600	8.14	197	8.14	13.97	8.14	8.14	8.14	0.00	8.2
6M	7.7	8.14	3600	11.63	609.58	7.71	3600	7.7	3600	7.7	26.68	7.70	7.78	7.72	0.01	8.68
6L	7.14*	-	3600	-	624.06	7.14	3279	7.14	3600	7.14	15.86	7.14	7.21	7.15	0.02	8.19
7S	8.39*	-	3600	8.97	603.97	8.39	14.72	8.39	169	8.39	15.08	8.39	8.45	8.39	0.01	7.34
7M	7.48	12.66	3600	-	648.02	7.67	3600	7.67	3600	7.48	18.34	7.48	7.60	7.49	0.03	7.41
7L	6.86	12.66	3600	-	645.33	6.88	3600	6.88	3600	6.88	15.92	6.86	6.90	6.89	0.01	8.48
8S	9.54*	-	3600	-	657.03	9.54	931	9.54	850	9.54	25.13	9.54	10.29	9.79	0.20	20.13
8M	8.54*	-	3600	-	632.61	8.54	3600	8.54	3490	8.54	15.01	8.54	8.82	8.63	0.09	10.85
8L	8	-	3600	-	618.63	8.62	3600	8.11	3600	8	24.51	8	8.21	8.08	0.06	8.31
9S	11.93	-	3600	-	626.26	-	3600	12.21	3600	11.93	150.52	11.93	12.81	12.30	0.16	63
9M	10.92	-	3600	-	612.19	11.74	3600	11.04	3600	10.92	292.17	10.92	11.27	11.09	0.10	68
9L	10.49	-	3600	-	607.36	11.11	3600	10.89	3600	10.49	207.17	10.49	10.75	10.62	0.06	72
10S	8.55	-	3600	-	604.46	-	3600	9.13	3600	8.6	16.1	8.55	8.68	8.60	0.03	33
10M	7.62	-	3600	-	705.2	8.54	3600	8.1	3600	7.62	52.75	7.62	7.88	7.78	0.05	61
10L	7.36	-	3600	-	631.39	-	3600	-	3600	7.75	51.89	7.36	7.50	7.41	0.04	39
Average										6.30	31.39	6.28				14.20

Tableau 4.1 Comparaison des solutions et des temps de calcul pour la fonction-objectif temps de trajet total (4.1)

Data	<i>Best</i>	MIP		H		BP		SA		RVND-ILS				
		Sol	CPU	Sol	CPU	Sol	CPU	Sol	CPU	Sol	Max	Avrg	St Dev	CPU
1S	-114.03	-114.03	1.05	-114.03	3600	-114.03	1.27	-114.03	0.03	-114.03	-114.03	-114.03	0.00	0.17
1M	-117.8	-117.8	1.04	-117.8	3600	-117.8	1.68	-117.8	0.02	-117.80	-117.80	-117.80	0.00	0.16
1L	-118.51	-118.51	0.52	-118.51	3600	-118.51	2.55	-118.51	0.04	-118.51	-118.51	-118.51	0.00	0.16
2S	-92.09	-92.09	0.58	-92.09	3600	-92.09	0.6	-92.09	0.05	-92.09	-92.09	-92.09	0.00	0.15
2M	-104.81	-104.81	32.94	-104.81	3600	-104.81	2.3	-104.81	0.04	-104.81	-104.81	-104.81	0.00	0.16
2L	-107.64	-107.64	427.74	-107.64	3600	-107.64	6.44	-107.64	0.38	-107.64	-104.97	-107.20	1.00	0.17
3S	-99.49	-99.49	0.95	-99.49	3600	-99.49	1.66	-99.49	0.02	-99.49	-90.05	-95.28	4.44	0.14
3M	-106.59	-106.59	2.79	-106.59	3600	-106.59	2.01	-106.59	0.07	-106.59	-102.02	-106.44	0.82	0.15
3L	-107.87	-107.87	1.95	-107.87	3600	-107.87	2.63	-107.87	0.14	-107.87	-104.72	-106.29	1.58	0.15
4S	-100	-100	2.22	-100	3600	-100	1.72	-100	0.03	-100.00	-85.71	-97.02	3.75	0.18
4M	-106.72	-106.72	68.26	-106.72	3600	-106.72	2.36	-106.72	0.07	-106.72	-87.48	-100.51	4.10	0.13
4L	-109.27	-109.27	170.25	-109.27	3600	-109.27	5.04	-109.27	0.13	-109.27	-97.87	-104.62	2.53	0.12
5S	-76.29	-76.29	0.26	-76.29	3600	-76.29	0.64	-76.29	0.02	-76.29	-65.79	-74.72	3.61	0.13
5M	-76.29	-76.29	1.08	-76.29	3600	-76.29	1.28	-76.29	0.03	-76.29	-75.37	-76.01	0.39	0.14
5L	-84.21	-84.21	16.33	-84.21	3600	-84.21	2.21	-84.21	0.04	-84.21	-83.42	-84.13	0.24	0.15
6S	-370.06	-370.06	1452.76	-370.06	3600	-370.06	150.63	-370.06	0.7	-370.06	-362.49	-366.74	2.17	2.85
6M	-379.88	-372.4	3600	-374.257	3600	-379.88	247.88	-379.88	25.26	-379.37	-369.79	-375.93	2.24	2.95
6L	-387.2	-	3600	-368.876	3600	-387.2	474.15	-387.2	16.33	-387.20	-380.56	-384.80	1.79	12.14
7S	-401.11	-	3600	-296.725	3600	-401.11	291.29	-401.11	0.58	-401.11	-395.16	-399.56	2.41	10.62
7M	-406.17	-	3600	-368.565	3600	-406.17	86.7	-406.17	6.48	-406.17	-401.44	-404.70	1.74	11.71
7L	-407.48	-	3600	-355.716	3600	-407.48	710.62	-407.48	2.53	-407.48	-404.35	-406.50	0.90	11.75
8S	-380.76	-	3600	-	3600	-380.76	135.39	-380.76	26.12	-380.76	-296.28	-344.48	19.67	50.00
8M	-403.57	-	3600	-	3600	-403.57	290.77	-403.57	59.34	-402.47	-375.06	-395.01	6.55	44.00
8L	-407.48	-	3600	-	3600	-407.48	362.18	-407.48	20.51	-407.48	-404.81	-406.27	0.56	10.96
9S	-605.89	-	3600	-	3600	-552.65	3600	-581.12	117.4	-605.89	-523.56	-568.80	18.65	46.48
9M	-657.63	-	3600	-	3600	-463.82	3600	-656.5	10.9	-657.63	-621.79	-639.81	7.65	35.22
9L	-669.80	-	3600	-	3600	-663.47	3600	-666.5	17.81	-669.80	-649.98	-663.55	4.32	60.13
10S	-675.81	-	3600	-	3600	-675.81	3600	-675.81	162.42	-675.81	-672.68	-673.97	1.16	92.50
10M	-686.75	-	3600	-	3600	-685.31	3600	-686.75	150.63	-686.75	-683.35	-685.34	1.12	187.50
10L	-691.48	-	3600	-445.027	3600	-691.34	3600	-691.48	270.26	-691.48	-689.91	-690.64	0.60	141.06
Avrg								-300.783	29.6127	-301.70				24.07

Tableau 4.2 Comparaison des solutions et des temps de calcul pour la fonction-objectif des préférences (4.2)

Data	<i>Best</i>	MIP		H		SA		RVND-ILS				
		Sol	CPU	Sol	CPU	Sol	CPU	Sol	Max	Avrg	St Dev	CPU
1S	0*	0	444.1	0.03	3600	0	0.3	0.00	0.10	0.04	0.02	0.08
1M	0*	0	0.014	0	3600	0	0.45	0.00	0.09	0.04	0.02	0.02
1L	0*	0	0.16	0	3600	0	0.61	0.00	0.10	0.04	0.02	0.28
2S	0.01	0.04	3600	0.01	3600	0.01	0.3	0.01	0.09	0.05	0.02	0.28
2M	0.01	0.04	3600	0.01	3600	0.01	0.6	0.01	0.05	0.04	0.01	0.23
2L	0.01	-	3600	0.01	3600	0.01	0.81	0.01	0.06	0.03	0.01	0.14
3S	0.01	0.06	3600	0.01	3600	0.01	0.49	0.01	0.13	0.06	0.03	0.03
3M	0.01	0.06	3600	0.01	3600	0.01	0.65	0.01	0.08	0.03	0.02	0.13
3L	0.01	0.06	3600	0.01	3600	0.01	0.7	0.01	0.06	0.03	0.02	0.11
4S	0.06	0.13	3600	0.07	3600	0.07	0.61	0.06	0.29	0.14	0.07	0.02
4M	0.02	0.08	3600	0.02	3600	0.02	0.73	0.02	0.18	0.06	0.04	0.00
4L	0.02	0.08	3600	0.02	3600	0.02	0.46	0.02	0.06	0.04	0.02	0.03
5S	0.01	0.08	3600	0.01	3600	0.01	0.39	0.01	0.09	0.05	0.02	0.03
5M	0.01	0.08	3600	0.01	3600	0.01	0.69	0.01	0.11	0.05	0.02	0.00
5L	0.01	0.06	3600	0.01	3600	0.01	1.13	0.01	0.10	0.03	0.02	0.00
6S	0.05	-	3600	0.7	3600	0.11	2.35	0.05	0.21	0.11	0.04	0.75
6M	0.04	-	3600	0.56	3600	0.07	18.32	0.04	0.21	0.12	0.04	0.48
6L	0.04	-	3600	1.75	3600	0.12	0.57	0.04	0.21	0.11	0.04	2.39
7S	0.07	-	3600	1.59	3600	0.18	1.04	0.07	0.24	0.15	0.04	0.72
7M	0.07	-	3600	-	3600	0.15	0.97	0.07	0.25	0.13	0.04	1.20
7L	0.04	0.77	3600	-	3600	0.14	0.84	0.04	0.24	0.12	0.04	1.64
8S	0.12	-	3600	-	3600	0.36	1.36	0.12	0.75	0.30	0.13	1.22
8M	0.09	-	3600	-	3600	0.33	0.84	0.09	0.43	0.19	0.08	0.72
8L	0.05	-	3600	-	3600	0.32	1.19	0.05	0.27	0.13	0.05	4.55
9S	0.18	-	3600	-	3600	0.45	4.09	0.18	0.78	0.39	0.16	1.58
9M	0.14	-	3600	-	3600	0.23	3.43	0.14	0.36	0.22	0.06	2.59
9L	0.09	-	3600	-	3600	0.46	3.35	0.09	0.40	0.18	0.07	5.77
10S	0.11	-	3600	-	3600	0.22	3.57	0.11	0.36	0.19	0.06	2.47
10M	0.08	-	3600	-	3600	0.28	5.2	0.08	0.27	0.17	0.04	12.92
10L	0.10	-	3600	-	3600	0.25	6.22	0.10	0.27	0.17	0.04	13.64
Average								0.13	2.08	0.05		1.80

Tableau 4.3 Comparaison des solutions et des temps de calcul pour la fonction-objectif équilibre de la charge de travail (4.3)

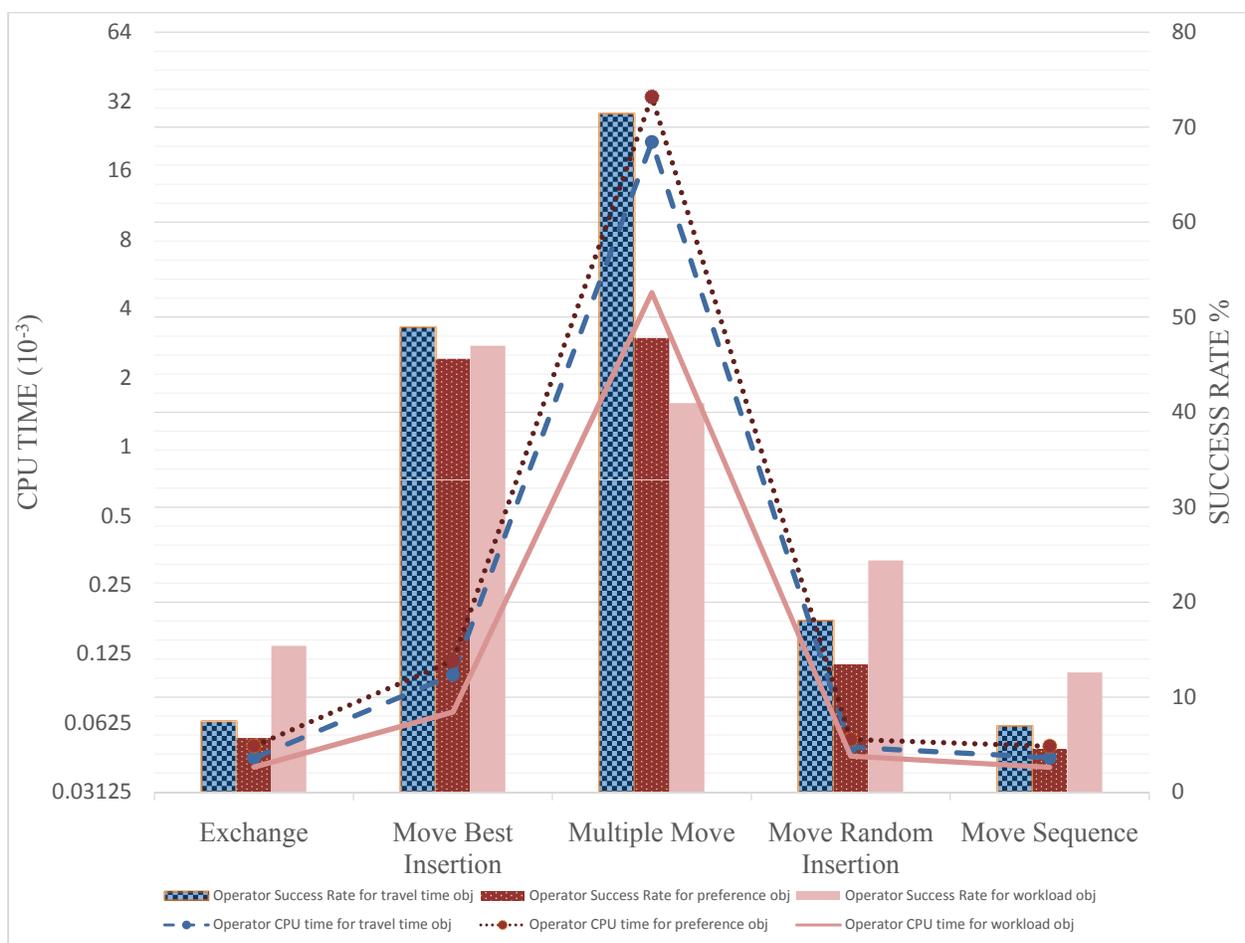


Figure 4.5 Évaluation de la performance des opérateurs pour les trois fonctions objectifs

rateurs. En guise de perspective de ce travail, une recherche locale dynamique basée sur la meilleure structure de voisinage pour chaque instance est envisagée.

Dans le chapitre suivant, nous prendrons en considération la nature multi-objectif du problème et nous proposons des approches de résolution, offrant au décideur, de multiples solutions de compromis.

## CHAPITRE 5

### RÉSOLUTION BI-OBJECTIF DU PROBLÈME DE TOURNÉES DE VÉHICULES AVEC LES CONTRAINTES DE FENÊTRES DE TEMPS ET DE SYNCHRONISATION (VRPTW<sub>SYN</sub>) DANS L'HAD

#### 5.1 Introduction

Nous avons proposé dans le chapitre précédent, un algorithme basé sur la méta-heuristique ILS (Iterated Local Search) couplé avec le RVND (Random Variable Neighborhood Descent) une variante de la méta-heuristique VND (Variable Neighborhood Descent) pour le problème de tournées de véhicules avec les contraintes de fenêtre de temps et de synchronisation VRPTW<sub>Syn</sub>. Trois objectifs sont considérés : (1) minimiser le temps de voyage entre les domiciles des patients, (2) maximiser les préférences des patients envers les soignants de leur choix, (3) minimiser l'écart entre la plus longue et la plus courte tournée afin de garantir une charge de travail équitable.

Les objectifs considérés dans la littérature sont très variés, nous citons le coût/distance des déplacements des soignants, le temps d'attente des soignants, les préférences des patients envers les soignants, l'équilibre de la charge de travail, les coûts des heures supplémentaires, le nombre de visites non couvertes, etc. Malgré la nature multi-objectif du problème, la plupart des travaux de la littérature qui traitent les problèmes de tournées de véhicules en HAD, considèrent les objectifs séparément ou convertissent le problème multi-objectif en un problème mono-objectif, en faisant une agrégation de l'ensemble des fonctions objectifs par exemple.

Si on considère plusieurs fonctions objectifs, il n'y a pas de solution optimale unique qui optimise simultanément toutes les fonctions, surtout si les objectifs sont conflictuels, ce qui est généralement le cas. Par conséquent, il est nécessaire d'utiliser les méthodes de résolution de

l'optimisation multi-objectif pour fournir au décideur des solutions alternatives qui assurent le compromis entre toutes les fonctions objectifs. Le domaine de l'optimisation multi-objectif trouve ses racines dans les travaux de Edgeworth [48] et Pareto [92] dans le contexte de la recherche économique au 19ème siècle. Nous renvoyons le lecteur à [64] pour les motivations et utilisations potentielles de l'optimisation multi-objectif sur les problèmes de tournées des véhicules.

Les méthodes multi-objectif sont classées à priori, interactives et à posteriori. Cette classification est basée sur l'étape de décision dans laquelle le décideur exprime ses préférences vis-à-vis des objectifs. Pour un aperçu de la recherche existante liée à l'optimisation multi-objectif appliquée aux problèmes de tournées de véhicules, nous renvoyons le lecteur à [63, 68]. Nous nous intéressons dans ce chapitre, aux méthodes à posteriori. Le décideur est impliqué après le processus de recherche de solutions. Ces méthodes fournissent au décideur toutes les solutions qui ne peuvent pas être améliorées pour une fonction-objectif sans détériorer la qualité d'au moins une des autres fonctions objectifs. Le décideur choisit à la fin une seule solution à implémenter. Les solutions générées par ces méthodes sont appelées solutions Pareto-Optimales ou efficaces/non dominées et forment un Front de Pareto.

Nous nous limitons à la résolution bi-objectif de deux fonctions conflictuelles suivantes (i) minimiser le temps total des déplacements de tous les soignants, (ii) répondre aux préférences des patients concernant les soignants. Pour résoudre le problème, nous proposons une approche de résolution exacte et approchée pour le problème de tournées de véhicules bi-objectif VRPTWSyn dans le contexte de l'HAD. Nous utilisons l'approche  $\varepsilon$ -constraint pour obtenir le Front de Pareto représentatif défini dans la section 5.2. Notre approche exacte calcule les solutions efficaces pour les petites instances. Comme le VRPTWSyn est un problème NP-difficile, l'optimisation bi-objectif du problème VRPTWSyn est beaucoup plus difficile. Par conséquent, nous proposons une heuristique donnant des solutions relativement proches aux solutions Pareto-Optimales.

Ce chapitre est organisé en cinq sections. Dans la Section 2, nous décrivons le problème d'optimisation bi-objectif et présentons quelques définitions qui seront utiles pour lire la suite du

manuscrit. Dans la Section 3, nous présentons nos méthodes de résolution,  $\varepsilon$ -constraint et l'algorithme RVND-ILS bi-objectif. Les résultats numériques sont présentés dans la Section 4. Une conclusion de notre travail est ensuite énoncée à la fin de ce chapitre.

## 5.2 Problème VRPTWSyn bi-objectif

### 5.2.1 Intérêt de l'étude

A notre connaissance, il n'y a qu'un seul travail [18] traitant l'optimisation bi-objectif appliquée au problème de tournées de véhicules dans le contexte de l'hospitalisation à domicile, proposant à la fois des approches de résolution exacte et (méta)-heuristique.

Les auteurs de [18] ont proposé une formulation basée sur la programmation en nombre mixtes. Les contraintes sont les qualifications, le coût des heures supplémentaires des soignants, les frais de déplacement en fonction du mode de transport et de la disponibilité des patients. Les objectifs considérés sont les coûts de déplacement, les temps de déplacement et les préférences des patients pour les soignants. Pour résoudre les grandes instances, une méta-heuristique est implémentée. L'algorithme incorpore une heuristique de recherche de voisinage dans le cadre d'une recherche local multidirectionnelle.

Dans ce chapitre, nous étudions une variante du problème de tournées de véhicules, différente de [18] par la formulation de certaines fonctions objectifs et de certaines contraintes. Les contraintes de synchronisation ne sont pas abordées dans [18], elles sont considérées comme très importantes pour notre problème suite aux résultats de l'enquête de satisfaction des patients menée auprès de la Mutualité Française Nord-Pas de Calais.

### 5.2.2 Présentation du problème

Nous rappelons que le problème VRPTWSyn consiste à concevoir la tournée du véhicule de chaque soignant afin de desservir un ensemble de patients géographiquement dispersés en

respectant leur disponibilité représentée par une fenêtre de temps. Le soignant doit attendre s'il arrive chez le patient avant l'ouverture de la fenêtre de temps, mais les arrivées tardives sont interdites. Toutes les tournées commencent et se terminent dans le centre HAD et doivent respecter les contraintes de synchronisation pour certaines visites. Par exemple, la synchronisation de deux visites est nécessaire lorsqu'un patient a besoin d'être porté à/de son lit [93], deux soignants sont alors nécessaires. De plus, les heures supplémentaires pour les soignants ne sont pas permises et chaque patient peut exprimer ses préférences concernant le soignant par qui il souhaite être visité. Deux objectifs sont considérés : (i) minimisation du temps total parcouru : somme de la distance du centre HAD au premier patient, de la distance entre les patients successifs et du dernier patient au centre HAD ; (ii) maximisation de la somme des préférences des patients pour les soignants de leur choix ; pour uniformiser les deux objectifs, ce dernier objectif est transformé en une minimisation de la somme des préférences négatives. Ce problème est appelé bi-objectif VRPTWSyn "problème de tournées de véhicules avec les fenêtres de temps et les contraintes de synchronisation".

### 5.2.3 Formulation mathématique du problème bi-objectif VRPTWSyn

Le problème étudié peut être formulé sur un graphe orienté  $G = (V, A)$  où  $A$  est l'ensemble des arcs et  $V = V^- \cup \{s, e\}$  est l'ensemble des nœuds. Chaque nœud de  $V^-$  représente un patient ayant besoin de soins (services). Pour des raisons algorithmiques de modélisation,  $\{s, e\}$  sont considérés comme des services fictifs qui définissent les points de départ et d'arrivée (structure HAD) de la tournée de chaque soignant.

L'ensemble des soignants est noté par  $K = \{1..m\}$  où  $m$  est le nombre de soignants disponibles. Pour chaque service  $i \in V$ , la durée de soins est définie par  $d_i$  ( $d_s = d_e = 0$ ) et la fenêtre de temps est définie par  $[a_i, b_i]$  tel que :  $a_i$  et  $b_i$  spécifient respectivement l'heure de début au plus tôt et au plus tard du service  $a_i \geq 0, b_i \geq 0$ . Les points de départ et d'arrivée sont également associés à une fenêtre de temps  $[a_s, b_s] = [a_e, b_e]$ .  $C = (c_{ij})$  est la matrice de temps de trajets associée à  $A$ . Le temps de trajet entre deux services  $(i, j) \in A$  est représenté par le paramètre  $c_{i,j}$ .

Nous utilisons l'ensemble  $(i, j) \in P^{syn} / (i, j) \in V \times V$  pour désigner les visites synchronisées.  $i$  et  $j$  sont les nœuds représentant le même patient qui a besoin, pour son soin, d'être visité simultanément par deux soignants différents. Toutes les données concernant ce service sont identiques pour les deux nœuds  $i$  et  $j$ . Dans la solution finale,  $i$  et  $j$  doivent être servis en même temps par deux soignants distincts.

Chaque patient exprime ses préférences vis à vis des soignants,  $p_{i,k}$  définit la préférence négative de l'affectation du soignant  $k$  au service  $i$ .

### Variables de décision

La formulation du problème utilise les variables de décision suivantes :

$$\forall (i, j) \in A \forall k \in K$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{Si la ressource } k \text{ visite le patient } j \text{ directement après le patient } i; \\ 0, & \text{Sinon.} \end{cases}$$

$t_{ik} \in [a_i, b_i]$  représente la date de début du service  $i$  par la ressource  $k$ .

### Formulation du problème bi-objectif VRPTWSyn

Comme dans les travaux de [4, 23], nous avons étudié dans le chapitre précédent les trois objectifs énoncés dans le modèle Bredström et Rönnqvist [23] séparément. En revanche, dans ce chapitre, nous nous concentrons uniquement sur les deux objectifs suivants :  $f_1$  (5.1) : minimise le temps total parcouru par les soignants ;  $f_2$  (5.2) : maximise les préférences des patients pour les soignants de leur choix. Nous rappelons que pour uniformiser les deux objectifs, le deuxième objectif est transformé en une minimisation de la somme des préférences négatives.

Le problème bi-objectif VRPTWSyn est formulé comme suit :

$$f_1(y) = \min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} x_{ijk} \quad (5.1)$$

$$f_2(y) = \min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} p_{ik} x_{ijk} \quad (5.2)$$

$$Bi - objectif VRPTWSyn = \begin{cases} Min(F(y)) = (f_1(y), f_2(y)) \\ y \in S \end{cases} \quad (5.3)$$

Sous les contraintes (4.4)-(4.14).

$y = (y_1, y_2)$  est le vecteur des variables de décision,  $S$  est l'ensemble des solutions réalisables.  $F(y)$  est le vecteur objectif. L'ensemble  $O = F(S)$  correspond aux images des solutions réalisables dans l'espace des objectifs et  $a = (a_1, a_2)$  est le point de l'espace des objectifs correspondant à la solution  $y$  avec  $a_1 = f_1(y)$ ,  $a_2 = f_2(y)$ .

Le but est d'optimiser simultanément deux fonctions objectifs conflictuelles  $f_1(y)$  et  $f_2(y)$ . Il n'y a pas de solution unique qui soit "optimale" pour les deux objectifs en même temps. Le concept d'optimalité pour un problème d'optimisation multi(bi)-objectif est remplacé par l'optimalité de Pareto [38] définie par la dominance au sens de Pareto [92].

Les solutions optimales ou efficaces d'un problème d'optimisation bi-objectif sont celles qui ne peuvent être améliorées pour une fonction-objectif sans détériorer leur performance sur l'autre. Connues dans la littérature comme des solutions Pareto-Optimales ou efficaces, leurs images dans l'espace des objectifs sont appelées non-dominées et forment un Front de Pareto.

#### 5.2.4 Relation de dominance et efficacité

Pour un problème d'optimisation bi-objectif, les concepts de dominance sont décrits comme [62, 92] :

**Definition 5.2.1.**  $a$  et  $b$  sont deux solutions du problème bi-objectif VRPTWSyn :

$$a \in S, b \in S$$

La solution  $a$  **domine** au sens de Pareto une solution  $b$  si et seulement si :

$$f_1(a) < f_1(b), f_2(a) \leq f_2(b) \text{ ou } f_1(a) \leq f_1(b), f_2(a) < f_2(b) \quad (5.4)$$

La notion de dominance entre deux solutions peut être définie de forte ou de faible dominance. Deux solutions sont incomparables s'il n'existe pas de relation de dominance entre elles .

**Definition 5.2.2.** la solution  $a$  **domine fortement** la solution  $b$  si et seulement si :

$$f_1(a) < f_1(b), f_2(a) < f_2(b) \quad (5.5)$$

**Definition 5.2.3.** la solution  $a$  **domine faiblement** la solution  $b$  si et seulement si :

$$f_1(a) < f_1(b), f_2(a) = f_2(b) \text{ ou } f_1(a) = f_1(b), f_2(a) < f_2(b) \quad (5.6)$$

Les concepts de l'optimalité au sens Pareto (efficacité) sont définis comme suit :

**Definition 5.2.4.** la solution  $a \in S$  est (fortement) **Pareto Optimal** ou (fortement) **efficace**, si  $\nexists b \in S$ , tel que  $b$  **domine**  $a$ , L'image de la solution  $F(a)$  dans l'espace des objectifs est **non-dominée**.

**Definition 5.2.5.** La solution  $a$  est **Pareto-Optimale faible** ou a **faiblement efficace**, si  $\nexists b \in S$  tel que  $b$  **domine fortement**  $a$  (Definition 5.2.2 ).

Contrairement aux solutions (strictement) efficaces, certaines solutions faiblement efficaces peuvent ne pas intéresser le décideur, puisqu'elles peuvent être faiblement dominées par d'autres solutions efficaces.

**Definition 5.2.6.** L'ensemble **Pareto-Optimal** ou l'ensemble **efficace** est formé par les solutions **Pareto-Optimales / efficaces**.

**Definition 5.2.7.** L'ensemble **Pareto-Optimal faible** ou l'ensemble **faiblement efficace** est formé de solutions **Pareto-Optimales faibles/ faiblement efficaces**.

**Definition 5.2.8.** Le **Front de Pareto** est l'image de toutes les solutions **Pareto-Optimales** dans l'espace des objectifs.

Les Définitions 5.2.5, 5.2.6 et 5.2.7 suggèrent qu'un ensemble Pareto-Optimal faible inclut également l'ensemble Pareto-Optimal. En d'autres termes, la cardinalité de l'ensemble faiblement efficace est supérieure ou égale à la cardinalité de l'ensemble efficace d'un problème donné.

### 5.3 Méthodes de résolution du problème bi-objectif VRPTWSyn

Les méthodes de résolution multi-objectif sont classées comme des méthodes à priori, interactives et à posteriori. Cette classification est basée sur l'étape de décision dans laquelle le décideur exprime ses préférences vis-à-vis d'un ou plusieurs objectifs.

Nous nous intéressons aux méthodes à posteriori. Notre choix est motivé par le fait que nous ne pouvons pas préférer une solution à une autre. Toutes les solutions Pareto-Optimales pour le problème VRPTWSyn bi-objectif sont considérées importantes d'une façon égale. Ainsi, les méthodes de résolution présentées dans cette section fournissent au décideur l'ensemble efficace/ Pareto-Optimal. Basé sur sa connaissance du problème et ses préférences, le décideur choisira la meilleure solution de "compromis".

Comme pour les problèmes combinatoires mono-objectif, les méthodes de résolution des problèmes multi-objectif peuvent être divisées en deux catégories : méthodes exactes et méthodes approchées. Pour résoudre notre problème, nous implémentons une méthode de résolution exacte basée sur l'approche  $\varepsilon$ -constraint. Comme le problème VRPTWSyn à deux objectifs est NP-difficile, la méthode  $\varepsilon$ -constraint consomme du temps et de la mémoire pour les moyennes et grandes instances. Par conséquent, nous concevons une heuristique générant une approximation de l'ensemble efficace appelé ensemble potentiellement efficace [62] dans un temps CPU raisonnable.

Nous présentons dans cette section, deux implémentations différentes de la méthode  $\varepsilon$ -constraint et l'heuristique proposée pour les grandes instances.

### 5.3.1 La méthode $\varepsilon$ -constraint

La méthode  $\varepsilon$ -constraint a été proposée par [58], c'est l'une des méthodes les plus utilisées pour les problèmes d'optimisation multi-objectif. Dans cette méthode, l'une des fonctions objectifs est optimisée tandis que les objectifs restants sont convertis en contraintes supplémentaires en spécifiant des bornes supérieures appropriées sur leurs valeurs.

Si nous considérons  $f_2(y)$  donnée par (5.2) la fonction-objectif à minimiser, nous obtenons la formulation  $\varepsilon$ -constraint suivante (5.7) pour le problème d'optimisation bi-objectif VRPTW-Syn :

$$\begin{aligned} & \text{Min } f_2(y) \\ & \text{sous les contraintes : } \quad f_1(y) \leq \varepsilon_i \\ & \quad y \in S \\ & \quad \varepsilon_i = up_i - eps \quad , eps \text{ est une petite valeur : } eps = 10^{-4} \end{aligned}$$

$up_i$  : La borne supérieure de l'objectif  $f_1(y)$  pour le problème mono objectif à l'itération

$$i = 1..iMax \tag{5.7}$$

L'ensemble Pareto-Optimal ou efficace peut être généré en résolvant un certain nombre  $iMax$  de sous-problèmes mono-objectifs 5.7, utilisant une modification systématique de la borne supérieure sur la contrainte de la deuxième fonction-objectif  $up_i$ . La valeur de  $eps$  doit être très petite, sinon des solutions efficaces peuvent ne pas être explorées. Les bornes supérieures  $up_i$  ne sont pas connues avant le processus d'optimisation. Elles doivent être proprement définies et calculées. L'intervalle de variation des bornes supérieures de la fonction  $f_1(y)$  par exemple, varie entre  $z_1^{min}$  and  $z_1^{max}$  tel que :  $z^{min} = (z_1^{min}, z_2^{min})$  est la solution de  $\min f_1(y)$  et  $z^{max} = (z_1^{max}, z_2^{max})$  est la solution de  $\max f_1(y)$ .

### 5.3.2 Implémentation conventionnelle de la méthode $\varepsilon$ -constraint

Une illustration de l'implémentation conventionnelle de la méthode  $\varepsilon$ -constraint pour un problème d'optimisation bi-objectif est donnée dans la Figure 5.1. L'implémentation conventionnelle de la méthode  $\varepsilon$ -constraint génère un ensemble faiblement efficace (voir Définition 5.2.7). En effet, en présence de plusieurs solutions optimales pour le sous problème mono-objectif (5.7), la solution retournée par le solveur CPLEX n'est pas garantie être une solution strictement Pareto-Optimale du problème bi-objectif. Elle peut être faiblement dominée par une autre solution Pareto-Optimale.

Cependant, les solutions Pareto-Optimales faibles ne sont généralement pas appréciées dans les problèmes d'optimisation multi-objectif. Après avoir exécuté l'implémentation de  $\varepsilon$ -constraint conventionnelle, nous filtrons l'ensemble faiblement efficace  $S$ , pour exclure les solutions dominées et ne garder que les solutions Pareto-Optimal/efficaces formant l'ensemble  $S'$ .

### 5.3.3 Implémentation améliorée de la méthode $\varepsilon$ -constraint

Nous avons effectué une deuxième implémentation de  $\varepsilon$ -constraint en utilisant l'optimisation lexicographique. Pour chaque itération  $i$ , nous optimisons d'abord (5.7) puis, parmi les différentes solutions obtenues, nous optimisons la deuxième fonction-objectif  $f_1(y)$  comme indiqué dans (5.8) afin de garantir l'obtention des solutions efficaces.

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } f_1(y) \\
 & \text{sous les contraintes : } \quad f_2(y) = y_2^* \\
 & \quad y \in S \\
 & y_i^* = (y_1^*, y_2^*) \text{ est la solution de (5.7) à l'itération } i \qquad (5.8)
 \end{aligned}$$

Pour accélérer la résolution du programme linéaire en nombres mixtes (5.8) avec le solveur CPLEX, nous utilisons le démarrage avancé (démarrage MIP) [61]. Nous fournissons au pro-

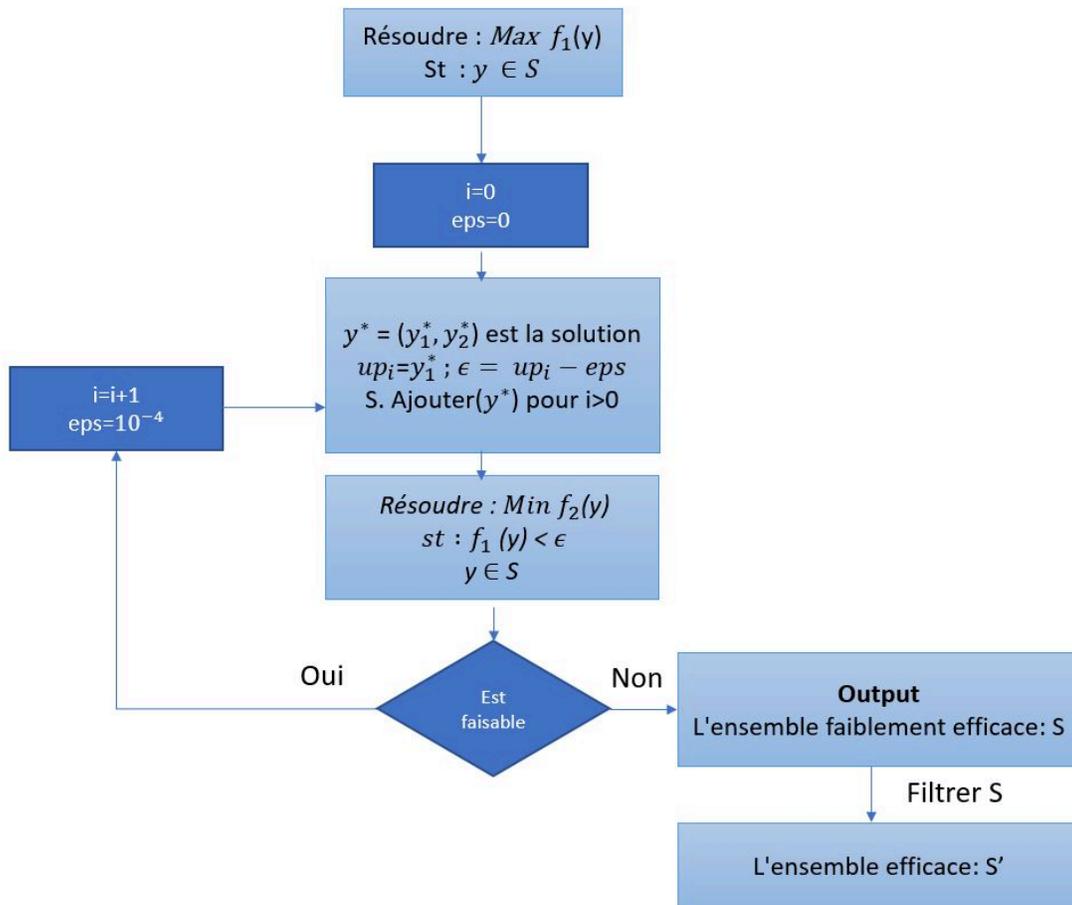


Figure 5.1 Implémentation conventionnelle de la méthode  $\epsilon$ -constraint

gramme, des données constituées de paires de variables et de valeurs relatives à la solution du problème (5.7) de la même itération (*Model.ajouterSolutionDépart()*). Ces données aident le solveur CPLEX à commencer la recherche d'une solution initiale et d'ignorer rapidement l'exploration inutile d'un sous espace de recherche.

Par exemple, la résolution du problème (5.8) peut être accélérée en fournissant au solveur les données relatives à la solution  $y_i^* = (y_1^*, y_2^*)$ . Concrètement, l'optimisation lexicographique de la méthode  $\varepsilon$ -constraint est effectuée comme expliqué dans l'algorithme 4.

---



---

Algorithm 4 L'implémentation améliorée de la méthode  $\varepsilon$ -Constraint

- 1: Entrées
  - 2:  $z^{min} = \min f_1(y)$  ,  $z^{min} = (z_1^{min}, z_2^{min})$
  - 3:  $z^{max} = \max f_1(y)$  ,  $z^{max} = (z_1^{max}, z_2^{max})$
  - 4: Sortie
  - 5:  $S$  : Ensemble efficace ou potentiellement efficace
  - 6: Initialiser  $\varepsilon = z_1^{max}$
  - 7: **répéter**
  - 8:    $y^* = \text{Min } f_2(y)$ , st  $f_1(y) \leq \varepsilon$ , *Model.ajouterSolutionDépart*( $z^{min}$ )
  - 9:   if ( $y^* \neq \text{nul}$ ) ,  $y^* = (y_1^*, y_2^*)$
  - 10:    $y^{**} = \text{Min } f_1(y)$ , st  $f_2(y) = y_2^*$  , *Model.ajouterSolutionDépart*( $y^*$ )
  - 11:   *S.ajouter*( $y^{**}$ )
  - 12:    $\varepsilon = y_1^{**} - \mathbf{eps}$
  - 13: **jusqu'à**  $\varepsilon < z_1^{min}$
- 

### 5.3.4 Algorithme bi-objectif RVND-ILS

Dans cette section, nous décrivons notre algorithme bi-objectif RVND-ILS implémenté pour le problème bi-objectif VRPTWSyn tel que résumé dans l'Algorithme 5. Il est basé sur la méta-heuristique de recherche locale itérative (ILS) [82] qui utilise une méthode de recherche locale RVND (Random Variable Neighborhood Descent) comme phase de recherche locale.

L'algorithme fonctionne en construisant d'abord une solution initiale à partir d'une heuristique constructive *Generer\_une\_solution\_initiale* (), basée sur l'heuristique de la meilleure insertion [97]. L'heuristique d'insertion vise à sélectionner les patients dont les coûts d'insertion dans une tournée minimisent la fonction-objectif considérée. L'heuristique constructive

est adaptée pour obtenir des solutions réalisables en respectant les fenêtres de temps et les contraintes de synchronisation. La solution initiale est raffinée à l'aide d'une stratégie de recherche locale  $RechercheLocale\_RVND\_f_i(S)$ , elle consiste à explorer l'espace de solution par un basculement aléatoire entre les structures de voisinage acceptant, seulement les solutions améliorant la solution courante. Nous utilisons  $RechercheLocale\_RVND\_f_i(S)$  pour désigner le processus de recherche locale utilisant RVND en fonction de la fonction-objectif  $i$  ( $f_1$  ou  $f_2$ ) considérée dans l'optimisation.

L'algorithme est exécuté de manière itérative jusqu'à ce qu'un nombre fixe d'itérations soit atteint. Ce nombre est basé sur la taille de l'instance. Chaque itération comprend une perturbation de la solution actuelle, l'application de la recherche locale à la solution perturbée selon les deux fonctions objectifs, et une décision d'acceptation pour décider si les deux solutions courantes obtenues sont potentiellement efficaces ou le contraire.

Les deux solutions courantes sont évaluées  $CritereDacceptation()$  à la fin de chaque itération conformément à la définition de l'optimalité au sens Pareto comme décrit dans la Définition 5.2.2. L'ensemble des solutions potentiellement efficaces est mis à jour à chaque fois qu'une solution potentiellement efficace est trouvée.

---



---

#### Algorithm 5 L'algorithme bi-objectif RVND-ILS

- 1: Entrée : Données
  - 2: Sortie :
  - 3:  $S$  : L'ensemble des solutions potentiellement efficaces
  - 4:  $s^0 = Generer\_une\_solution\_initiale()$
  - 5:  $s_1^* = RechercheLocale\_RVND\_f_1(s^0)$
  - 6:  $s_2^* = RechercheLocale\_RVND\_f_2(s^0)$
  - 7:  $S = \{s_1^*, s_2^*\}$
  - 8: **répéter**
  - 9:   choisir aléatoirement  $s$  à partir de  $S$
  - 10:    $s' = Perturbation(s)$
  - 11:    $s_1^{*'} = RechercheLocale\_RVND\_f_1(s')$
  - 12:    $s_2^{*'} = RechercheLocale\_RVND\_f_2(s')$
  - 13:    $CritereDacceptation(s_1^{*'}, s_2^{*'}, S)$
  - 14:    $MAJ(S)$
  - 15: **jusqu'à** (Condition d'arrêt remplie)
-

## 5.4 Expérimentations

Dans cette section, nous présentons les résultats des expérimentations pour les deux implémentations de la méthode  $\varepsilon$ -constraint et l'algorithme bi-objectif RVND-ILS.

Pour évaluer les résultats de nos algorithmes, nous avons utilisé la métrique de l'hypervolume [105]. L'hypervolume d'un ensemble non dominé est la taille de l'espace couvert par les solutions de l'ensemble comme le montre la Figure 5.2. Pour calculer l'hypervolume, la normalisation des valeurs des fonctions objectifs est requise entre 0 et 1 et un point de référence est considéré (1,1).

Quant à la comparaison entre deux ensembles, l'objectif de cette technique est de trouver l'ensemble de solutions efficaces sinon potentiellement efficaces, qui maximise la valeur de l'hypervolume 5.2

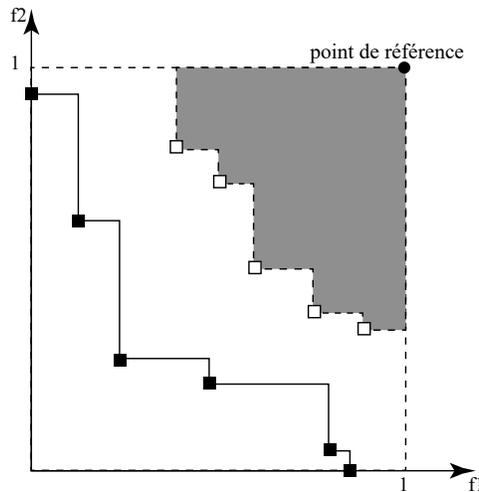


Figure 5.2 Exemple d'hypervolume pour deux ensembles de solutions

Nos algorithmes sont codés en Java. Les implémentations de la méthode  $\varepsilon$ -constraint sont codées en utilisant l'API java CPLEX. Le benchmark est effectué sur un ordinateur ayant la configuration suivante : processeur : Intel R Xeon R E5-2630 v3 (x2) ; Mémoire : 10 Go, 2133MT, partagée entre les cœurs d'un nœud.

### 5.4.1 Instances de test

Les instances utilisées dans nos expériences sont fournies par [23]. L'indice de référence comporte trois catégories basées sur le nombre de patients (20, 50, 80). Chaque instance a 3 types de largeur de fenêtres de temps : S (petite), M (moyenne) et L (grande). Environ 10% des visites sont synchronisées.

### 5.4.2 Résultats de la méthode $\varepsilon$ -Constraint

Nous présentons les résultats des deux implémentations de la méthode  $\varepsilon$ -constraint dans la Table 5.1. Pour chaque implémentation, la Table 5.1 présente : la valeur de l'hypervolume pour les solutions de borne supérieure  $H_{UP}$ , le temps CPU en secondes(s), la cardinalité de l'ensemble généré S (solutions faiblement dominées)  $\#GS$ , et la cardinalité des solutions non dominées  $\#NDS$  constituant l'ensemble S', après avoir filtré les solutions générées  $GS$  en ne conservant que les solutions non dominées décrites dans la Définition 5.2.4.

Toutes les petites instances sont résolues à l'optimalité pour les deux implémentations. L'implémentation conventionnelle de  $\varepsilon$ -constraint consomme plus de temps (1402 sec en moyenne) comparée à l'implémentation améliorée de la méthode  $\varepsilon$ -constraint (577 sec). Cela est dû à la stratégie de recherche effectuée par la première implémentation. En fait, de nombreuses itérations du problème (5.7) peuvent générer une solution qui peut être dominée par une autre, ce n'est pas une solution Pareto-Optimale garantie. Contrairement à l'implémentation améliorée où l'on est sûr de générer que les solutions Pareto-Optimales ( $|GS| = |NDS|$ ), l'implémentation conventionnelle de la méthode  $\varepsilon$ -constraint génère un ensemble faiblement efficace ( $|GS| > |NDS|$ ). L'utilisation du démarrage MIP [61] de CPLEX a également permis de réduire le temps de résolution de la méthode.

En nous basant sur sa performance, nous avons sélectionné l'implémentation améliorée de  $\varepsilon$ -constraint pour tenter de résoudre les grandes instances. En raison des problèmes de mémoire rencontrés, nous avons fixé une limite de temps de 2h pour chaque problème mono-objectif (5.7) et (5.8). Selon la Table 5.2, l'algorithme trouve des bornes supérieures pour

Data	implémentation Conventiennelle de $\varepsilon$ -Constraint				implementation amélioré de $\varepsilon$ -Constraint			
	$H_{UP}$	CPU	#GS	#NDS	$H_{UB}$	CPU	#GS	#NDS
1S	0,74	69,09	33,00	25,00	0,74	53,82	25,00	25,00
1M	0,71	660,70	40,00	32,00	0,71	499,11	32,00	32,00
1L	0,68	2365,33	42,00	29,00	0,68	1240,88	29,00	29,00
2S	0,62	29,58	51,00	42,00	0,62	51,35	42,00	42,00
2M	0,84	554,22	35,00	27,00	0,84	281,21	27,00	27,00
2L	0,78	8744,54	36,00	24,00	0,78	3014,32	24,00	24,00
3S	0,77	26,61	20,00	16,00	0,77	20,90	16,00	16,00
3M	0,71	386,91	43,00	31,00	0,71	201,12	32,00	31,00
3L	0,71	956,44	47,00	34,00	0,71	390,58	35,00	34,00
4S	0,82	94,02	25,00	18,00	0,82	117,56	18,00	18,00
4M	0,80	2491,32	21,00	15,00	0,80	855,73	15,00	15,00
5S	0,78	64,41	28,00	22,00	0,78	38,02	22,00	22,00
5M	0,75	346,40	40,00	32,00	0,75	240,54	32,00	32,00
5L	0,78	2839,86	57,00	35,00	0,78	1071,79	35,00	35,00
Average		1402,10				576,92		

Tableau 5.1 Comparaison de la performance de l'implémentation conventionnelle et améliorée de la méthode  $\varepsilon$ -Constraint pour les petites instances

trois instances et ne peut résoudre à l’optimalité au sens Pareto aucune des grandes instances (mais certaines des solutions pourraient être Pareto-Optimales).  $GS$  est l’ensemble des solutions générées, ce ne sont pas toutes des solutions Pareto-Optimales garanties.  $NDS$  est la cardinalité des solutions non dominées.

Data	Implémentation améliorée de la méthode $\varepsilon$ -Constraint			
	$H_{UB}$	CPU	#GS	#NDS
6S	0,8122	430783,86	151	140
7S	0,7852	1231591,77	141	100
8S	0,7927	742878,04	70	23

Tableau 5.2 Implémentation améliorée de la méthode  $\varepsilon$ -Constraint pour les grandes instances

### 5.4.3 Résultats de l’algorithme bi-objectif RVND-ILS comparés aux résultats de l’implémentation améliorée de $\varepsilon$ -constraint

La méthode bi-objectif RVND-ILS est exécutée 30 fois pour chaque instance; le nombre d’itérations dans chaque exécution est basé sur le nombre de patients  $n$  de l’instance et un paramètre  $k$  défini comme  $k = 40$ . Pour le RVND-ILS bi-objectif, la Table 5.3 montre respectivement la valeur la plus mauvaise de l’hypervolume, la meilleure et la moyenne parmi les 30 exécutions pour chaque instance ( $Worst_H$ ,  $Best_H$  et  $Avg_H$ ). L’écart type  $stdev$  et le temps de calcul moyen  $CPU$  sont également calculés. Pour évaluer le Front de Pareto approximatif généré par le RVND-ILS bi-objectif, nous comparons la valeur hypervolume moyenne de l’heuristique avec la valeur hypervolume de  $\varepsilon$ -constraint en utilisant l’un des indicateurs les plus populaires qui est l’indicateur hypervolume, autrement dit S-métrique ( $I_{H_{UB}} = Avg_H / H_{UB}$ ) [106]. En moyenne, RVND-ILS bi-objectif est capable de produire de bons résultats dans des temps de calcul très courts par rapport à  $\varepsilon$ -constraint. Les Figures 5.3 et 5.4 illustrent le Front de Pareto des méthodes heuristiques et exactes pour les instances 1S et 6S. Contrairement à 1S, l’instance 6S n’est pas résolue à l’optimalité pour toutes les solutions.

Data	$\varepsilon$ -Constraint				Heuristic					H indicator	
	#GS	#NDS	CPU	$H_{UB}$	$Worst_H$	$Best_H$	$Avg_H$	$stdev$	$\#ES_{avrg}$	CPU	$I_{HRef}$
1S	25,00	25,00	53,82	0,74	0,64	0,72	0,69	0,02	16,90	11,24	0,94
1M	32,00	32,00	499,11	0,71	0,52	0,66	0,61	0,03	17,73	9,86	0,86
1L	29,00	29,00	1240,88	0,68	0,47	0,58	0,54	0,02	17,13	10,24	0,80
2S	42,00	42,00	51,35	0,62	0,45	0,55	0,51	0,02	16,67	8,94	0,83
2M	27,00	27,00	281,21	0,84	0,77	0,83	0,81	0,01	15,57	10,16	0,96
2L	24,00	24,00	3014,32	0,78	0,70	0,76	0,73	0,02	12,73	10,19	0,94
3S	16,00	16,00	20,90	0,77	0,69	0,77	0,75	0,02	12,67	9,23	0,97
3M	31,00	31,00	201,12	0,71	0,59	0,67	0,63	0,02	17,67	9,93	0,89
3L	34,00	34,00	390,58	0,71	0,57	0,65	0,61	0,02	16,60	10,11	0,86
4S	18,00	18,00	117,56	0,82	0,75	0,82	0,79	0,02	15,27	7,88	0,96
4M	15,00	15,00	855,73	0,80	0,71	0,79	0,77	0,02	12,33	8,96	0,96
4L	21,00	21,00	42973,63	0,86	0,78	0,84	0,82	0,01	15,97	8,11	0,96
5S	22,00	22,00	38,02	0,78	0,72	0,78	0,75	0,01	13,03	8,18	0,96
5M	32,00	32,00	240,54	0,75	0,64	0,70	0,67	0,02	17,00	8,65	0,90
5L	35,00	35,00	1071,79	0,78	0,62	0,73	0,68	0,03	17,37	9,91	0,87
6S	151,00	140,00	430783,86	0,81	0,75	0,79	0,77	0,01	70,77	20,12	0,95
6M	-	-	-	-	0,85	0,87	0,86	0,00	64,87	20,85	-
6L	-	-	-	-	0,74	0,79	0,76	0,02	63,37	20,89	-
7S	141,00	100,00	1231591,77	0,79	0,75	0,76	0,75	0,00	71,13	25,20	0,96
7M	-	-	-	-	0,69	0,78	0,71	0,03	70,10	18,56	-
7L	-	-	-	-	0,71	0,79	0,74	0,02	64,30	20,63	-
8S	70,00	23,00	742878,04	0,79	0,62	0,75	0,71	0,03	68,63	30,58	0,89
8M	-	-	-	-	0,62	0,86	0,75	0,09	69,07	23,50	-
8L	-	-	-	-	0,80	0,84	0,82	0,01	57,20	30,86	-
9S	-	-	-	-	0,75	0,86	0,81	0,03	92,00	300,52	-
9M	-	-	-	-	0,77	0,84	0,81	0,02	98,30	436,85	-
9L	-	-	-	-	0,78	0,83	0,81	0,02	92,20	380,25	-
10S	-	-	-	-	0,77	0,83	0,80	0,01	80,27	50,23	-
10M	-	-	-	-	0,72	0,77	0,75	0,01	76,13	86,90	-
10L	-	-	-	-	0,67	0,75	0,71	0,02	74,27	123,69	-

Tableau 5.3 Résultats de l'implémentation de  $\varepsilon$ -constraint et l'algorithme bi-objectif RVND-ILS

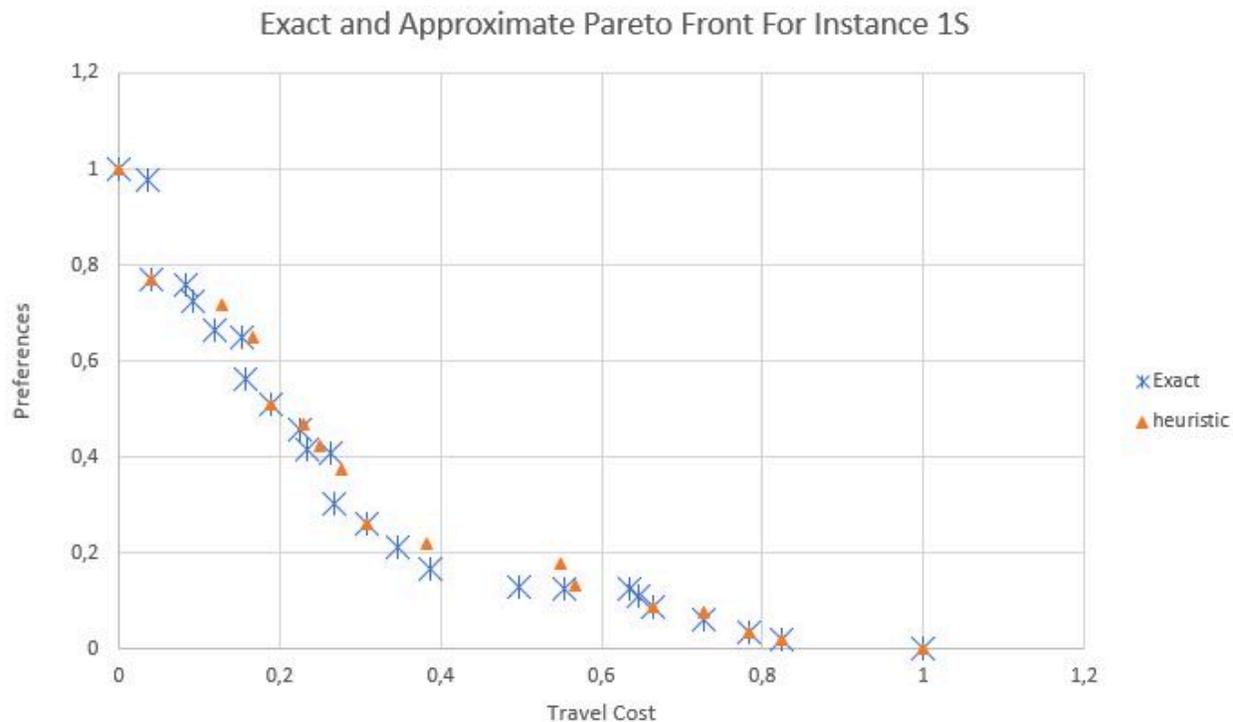


Figure 5.3 Exemple d'un Front de Pareto exact et approximatif pour l'instance 1s

## 5.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, un problème de tournées de véhicules bi-objectif avec des contraintes de fenêtres de temps et de synchronisation abordé dans le contexte de l'hospitalisation à domicile. Deux objectifs conflictuels sont considérés : (i) minimiser le coût total du voyage de tous les soignants, (ii) répondre aux préférences des patients concernant les soignants. Il n'y a pas de solution optimale unique qui optimise simultanément les deux fonctions objectifs.

Le concept d'optimalité est remplacé par l'optimalité au sens Pareto. Les solutions d'un problème d'optimisation multi-objectif sont connues dans la littérature comme étant des solutions Pareto-Optimales ou efficaces. Toutes les solutions Pareto-Optimales pour le problème VRPTWSyn bi-objectif sont d'une importance égale. Ainsi, les méthodes de résolution présentées dans cette thèse visent à fournir au décideur le Front de Pareto. Basé sur sa connaissance du problème et de ses préférences, le décideur choisira la meilleure solution qui lui convient.

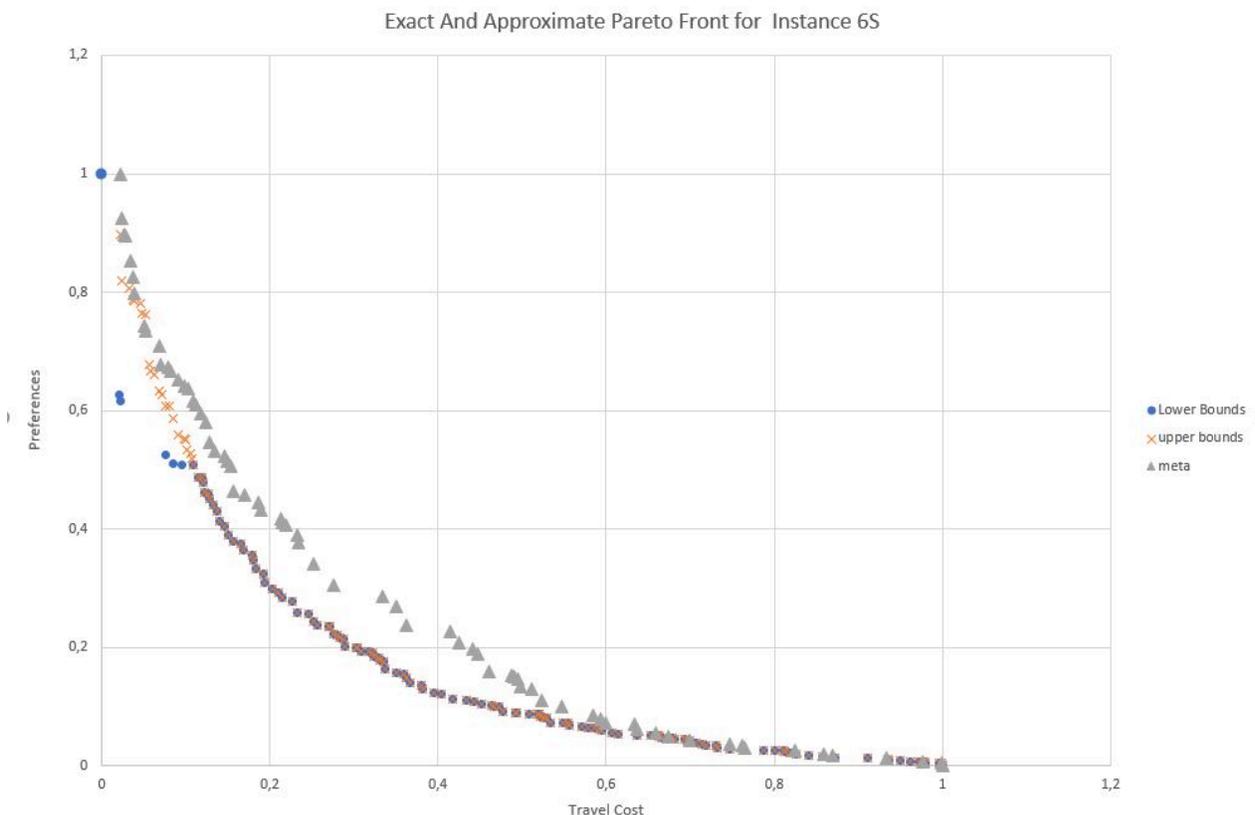


Figure 5.4 Exemple d'un Front de Pareto exact et approximatif pour l'instance 6s

Nous avons implémenté deux versions de la méthode  $\varepsilon$ -constraint exacte. Pour les petites instances, les deux implémentations sont capables de générer toutes les solutions Pareto-Optimales. Une comparaison est faite en terme de temps CPU, pour sélectionner la meilleure implémentation qui fonctionne bien sur notre problème. Comme le problème est NP-difficile,  $\varepsilon$ -constraint consomme du temps et de la mémoire. Pour les grandes instances, la méthode est capable de trouver une approximation du front Pareto pour seulement trois instances parmi 15. Par conséquent, nous avons développé un algorithme RVND-ILS bi-objectif. Pour évaluer, la qualité des solutions de l'heuristique, nous avons utilisé la métrique hypervolume. Une comparaison est présentée avec des solutions exactes ( $\varepsilon$ -constraint) pour quelques instances. Les expérimentations conduites sur les instances de la littérature, montrent que l'algorithme bi-objectif RVND-ILS proposé est capable de générer des solutions potentiellement efficaces dans des temps de calcul très courts par rapport à  $\varepsilon$ -constraint.

## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans ce travail de thèse, nous nous sommes intéressés au problème d'optimisation de la planification des tournées du personnel soignant aux domiciles des patients, dans le contexte de l'Hospitalisation À Domicile (HAD).

Dans un premier temps nous avons centré notre étude sur la modélisation et la programmation du problème de planification quotidienne des tournées du personnel soignant, en nous basant sur les attentes exprimées par les patients de la structure HAD "la Mutualité Française Nord-Pas de Calais". Nous avons proposé un modèle mathématique basé sur la programmation linéaire mixte pour satisfaire (1) les patients (les fenêtres de temps de disponibilité aux domiciles, les préférences d'une ressource, la compétence adéquate au besoin du patient), et (2) le personnel de la santé (pause repas, charge de travail équilibrée, temps d'attente minimal) tout en minimisant les coûts relatifs aux déplacements. Notre programme prend en considération les visites partagées (synchronisation de soins) et permet d'attribuer les soins à tous les patients. Le programme a prouvé sa performance en termes de temps de calcul sur les petites instances. Pour les grandes instances, le temps de calcul est important.

Afin de remédier au problème de temps de calcul, nous avons proposé une approche de résolution appelée RVND-ILS. Pour pouvoir se comparer avec les travaux de la littérature [4, 22, 23], nous avons relâché certaines contraintes de notre problème. Les objectifs considérés sont : (i) Minimiser le temps de trajet des soignants entre les domiciles des patients ; (ii) Maximiser les préférences des patients concernant les soignants ; (iii) Assurer une répartition équilibrée de la charge de travail du personnel de la santé. En ce qui concerne les contraintes, nous avons pris en considération uniquement les fenêtres de temps et la synchronisation.

Le problème étudié est un problème de tournées de véhicules avec fenêtres de temps et contraintes de synchronisation (VRPTWSyn). La méthode proposée utilise le RVND (variante de la méta-heuristique VND) dans la phase de la recherche locale de l'ILS (Iterated Local Search). le RVND utilise un ordre aléatoire de voisinage pour l'exploration des solu-

tions voisines de la solution courante. La solution initiale est construite en se basant sur l'heuristique de la meilleure insertion. Nous avons développé de nombreux opérateurs de la recherche locale. La méthode proposée (RVND-ILS) fournit toutes les meilleures solutions connues, dans un temps de calcul très court, sauf dans le cas où l'objectif de préférence est minimisé. Une étude des opérateurs proposés a été menée pour évaluer et analyser l'efficacité des opérateurs.

Si on considère plusieurs fonctions objectifs, il n'y a pas de solution optimale unique qui optimise simultanément toutes les fonctions, surtout si les objectifs sont conflictuels, ce qui est généralement le cas. Par conséquent, il est nécessaire d'utiliser les méthodes de résolution de l'optimisation multi-objectif pour fournir au décideur des solutions alternatives qui assurent le compromis entre toutes les fonctions objectifs. Dans ce contexte, nous nous sommes intéressés au problème de tournées de véhicules bi-objectif avec des contraintes de fenêtres de temps et de synchronisation dans le contexte de l'HAD. Deux objectifs conflictuels sont considérés : (i) minimiser le coût total du voyage de tous les soignants, (ii) répondre aux préférences des patients concernant les soignants. Le concept d'optimalité est remplacé par l'optimalité au sens Pareto. Ainsi, les méthodes de résolution présentées dans cette thèse visent à fournir au décideur le Front de Pareto. En se basant sur sa connaissance du problème et ses préférences, le décideur choisira la meilleure solution qui lui convient.

Nous avons implémenté deux versions de la méthode  $\varepsilon$ -constraint exacte. Pour les petites instances, les deux implémentations sont capables de générer toutes les solutions Pareto-Optimales. Une comparaison est faite en terme de temps CPU, pour sélectionner la meilleure implémentation qui fonctionne bien sur notre problème. Comme le problème est NP-difficile,  $\varepsilon$ -constraint consomme du temps et de la mémoire. Pour les grandes instances, la méthode est capable de trouver une approximation du Front de Pareto pour seulement trois instances parmi 15. Par conséquent, nous avons proposé un algorithme RVND-ILS bi-objectif. Pour évaluer, la qualité des solutions de l'heuristique, nous avons utilisé la métrique Hypervolume. Une comparaison est présentée avec des solutions exactes ( $\varepsilon$ -constraint) pour quelques instances. Les expérimentations conduites sur les instances de la littérature, montrent que

l'algorithme bi-objectif RVND-ILS proposé est capable de générer des solutions efficaces dans des temps de calcul très courts par rapport à  $\varepsilon$ -constraint .

Les travaux traités dans le cadre de cette thèse ont donné lieu à six articles présentés en conférences nationales et internationales. Nous avons également deux articles en cours d'évaluation dans deux revues internationales.

L'étude de l'ensemble des problèmes traités dans cette thèse peut amener aux perspectives suivantes :

- Le test de l'ensemble des méthodes de résolution développées dans cette thèse, sur des instances réelles issues de l'HAD Mutualité Française Nord Pas de Calais.
- L'étude de l'impact des contraintes de synchronisation sur la résolution exacte de notre problème initial présenté dans le Chapitre 3.
- L'amélioration de la méta-heuristique RVND-ILS proposée dans le Chapitre 4 pour le problème mono-objectif VRPTWSyn en réalisant une recherche locale dynamique basée sur les performances des opérateurs de voisinage.
- L'adaptation de la méta-heuristique RVND-ILS à notre problème initial, abordé dans le Chapitre 3. Nous envisageons d'ajouter les contraintes de qualification et de pause déjeuner et de considérer également la fonction-objectif qui minimise le temps d'attente des ressources.
- La validation de la performance de l'heuristique développée pour le problème bi-objectif VRPTWSyn dans le Chapitre 5. En effet, la comparaison des résultats de l'heuristique doit être effectuée avec les bornes inférieurs des solutions. Nous envisageons de continuer notre recherche dans ce sens, afin de calculer les bornes inférieurs des solutions pour les grandes instances.
- Prise en considération d'autres contraintes temporelles comme celles de la précédence et se comparer avec les travaux de la littérature [7].
- La résolution multi-objectif en prenant en considération le troisième objectif qui concerne l'équilibre de la charge de travail. Nous souhaitons développer également d'autres méthodes évolutionnaires basées sur le concept de non-dominance pour résoudre le problème.

- La planification des tournées sur un horizon étendu.
- La prise en considération de l'incertitude relative aux temps de trajets et de services.

Nous envisageons de développer une approche de résolution stochastique et robuste.

## RÉFÉRENCES

- [1] Agence régionale de santé ars. En ligne : <https://www.ars.sante.fr/>
- [2] Ministère des Affaires sociales et de la Santé, “Guide méthodologique de production de l’hospitalisation, Bulletin officiel de production des recueils d’informations standardisés de l’hospitalisation à domicile”, Rapp. tech., 2017.
- [3] S. Afifi, D. C. Dang, et M. Aziz, “A simulated annealing algorithm for the vehicle routing problem with time windows and synchronization constraints”, dans *Proc. of LION-7*, série Lecture Notes in Computer Science, vol. 7997, 2013, pp. 259–265.
- [4] S. Afifi, D. C. Dang, et A. Moukrim, “Heuristic Solutions for the Vehicle Routing Problem with Time Windows and Synchronized Visits”, *Optimization Letters*, 2015.
- [5] A. Afrite, L. Com-Ruelle, Z. OR, et T. Renaud, “L’hospitalisation à domicile, une alternative économique pour les soins de suite et de réadaptation”, Rapp. tech. 119, 2007.
- [6] A. Afrite, M. Chaleix, L. Com-ruelle, et H. Valdelièvre, “L’hospitalisation à domicile, une prise en charge qui s’adresse à tous les patients. Exploitation des données du PMSI 2006”, Rapp. tech. 140, 2009.
- [7] S. R. Ait Haddadene, N. Labadie, et C. Prodhon, “A GRASP ILS for the vehicle routing problem with time windows, synchronization and precedence constraints”, *Expert Systems with Applications*, vol. 66, pp. 1339–1351, 2016.
- [8] S. R. Ait Haddadene, N. Labadie, et C. Prodhon, “Nsgaii enhanced with a local search for the vehicle routing problem with time windows and synchronization constraints”, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 12, pp. 1198 – 1203, 2016, 8th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2016.

- [9] C. Akjiratikarl, P. Yenradee, et P. R. Drake, “PSO-based algorithm for home care worker scheduling in the UK”, *Computers and Industrial Engineering*, vol. 53, no. 4, pp. 559–583, 2007.
- [10] S. V. Begur, D. M. Miller, et J. R. Weaver, “An integrated spatial DSS for scheduling and routing home-health-care nurses”, *Interfaces*, vol. 27, no. 4, pp. 35–48, 1997.
- [11] T. Bektas, “The multiple traveling salesman problem : An overview of formulations and solution procedures”, *Omega*, vol. 34, no. 3, pp. 209–219, 2006.
- [12] R. Ben Bachouch, M. Fakhfakh, A. Guinet, et S. Hajri-gabouj, “Planification de la tournée des infirmiers dans une structure de soins à domicile”, *Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers (GISEH)*, 2008.
- [13] E. Benzarti, E. Sahin, et Y. Dallery, “Facteurs de complexité auxquels la gestion des opérations doit faire face dans les établissements d’hospitalisation a domicile”, dans *Conférence Francophone Gestion et Ingénierie des SystèmEs Hospitaliers, Giseh*, 2009, clermont-Ferrand, France 2-4 septembre 2010.
- [14] E. Benzarti, E. Sahin, et Y. Dallery, “Modelling Approaches for the Home Health Care Districting Problem”, *MOSIM, 8ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation*, pp. 1–10, 2010.
- [15] E. Benzarti, E. Sahin, et Y. Dallery, “Operations management applied to home care services : Analysis of the districting problem”, *Decision Support Systems*, vol. 55, no. 2, pp. 587–598, 2013.
- [16] S. Bertels et T. Fahle, “A hybrid setup for a hybrid scenario : Combining heuristics for the home health care problem”, *Computers and Operations Research*, vol. 33, no. 10, pp. 2866–2890, 2006.
- [17] V. Borsani, A. Matta, G. Beschi, et F. Sommaruga, “A Home Care Scheduling Model For Human Resources”, *International Conference on Service Systems and Service*

- Management*, pp. 449–454, 2006.
- [18] K. Braekers, R. F. Hartl, S. N. Parragh, et F. Tricoire, “A bi-objective home care scheduling problem : Analyzing the trade-off between costs and client inconvenience”, *European Journal of Operational Research*, vol. 248, no. 2, pp. 428–443, 2016.
- [19] K. Braekers, K. Ramaekers, et I. Van Nieuwenhuysse, “The vehicle routing problem : State of the art classification and review”, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 99, pp. 300–313, sep 2016.
- [20] O. Bräysy et M. Gendreau, “Vehicle Routing Problem with Time Windows , Part I : Route Construction and Local Search Algorithms”, *Transportation Science*, vol. 39, no. July 2015, pp. 104–118, 2005.
- [21] O. Bräysy et M. Gendreau, “Vehicle Routing Problem with Time Windows, Part II : Metaheuristics”, *Transportation Science*, vol. 39, no. 1, pp. 119–139, feb 2005.
- [22] D. Bredstrom et M. Ronnqvist, “A Branch and Price Algorithm for the Combined Vehicle Routing and Scheduling Problem With Synchronization Constraints”, *SSRN Electronic Journal*, 2007.
- [23] D. Bredström et M. Rönnqvist, “Combined vehicle routing and scheduling with temporal precedence and synchronization constraints”, *European Journal of Operational Research*, vol. 191, no. 1, pp. 19–31, 2008.
- [24] P. Cappanera et M. G. Scutellà, “Joint Assignment, Scheduling, and Routing Models to Home Care Optimization : A Pattern-Based Approach”, *Transportation Science*, 2014.
- [25] C. Carra, J. Varlet, A. Sohaïb, H. Allaoui, G. Goncalves, et L. En-Nahli, “Satisfaction des usagers en HAD et relations de service”, université d’Artois, Rapp. tech., 2017.
- [26] E. Cheng et J. L. Rich, “A Home Health Care Routing and Scheduling Problem”, Rice University, Rapp. tech., 1998.

- [27] N. Christofides, A. Mingozzi, et P. Toth, “Exact algorithms for the vehicle routing problem, based on spanning tree and shortest path relaxations”, *Mathematical Programming*, vol. 20, no. 1, pp. 255–282, Dec 1981.
- [28] G. Clarke et J. W. Wright, “Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points”, *Oper. Res.*, vol. 12, no. 4, pp. 568–581, Août 1964.
- [29] J.-F. Cordeau, M. Gendreau, G. Laporte, J.-Y. Potvin, et F. Semet, “A guide to vehicle routing heuristics”, *Journal of the Operational Research Society*, vol. 53, no. 5, pp. 512–522, May 2002.
- [30] J.-F. Cordeau, G. Laporte, M. W. P. Savelsbergh, et D. Vigo, “Chapter 6 Vehicle Routing”, *Transportation*, vol. 14, no. 06, pp. 367–428, 2007.
- [31] G. Dantzig, R. Fulkerson, et S. Johnson, “Solution of a large-scale traveling-salesman problem”, *Journal of the Operations Research Society of America*, vol. 2, no. 4, pp. 393–410, 1954.
- [32] G. B. Dantzig et J. H. Ramser, “The Truck Dispatching Problem”, *Management Science*, vol. 6, no. 1, pp. 80–91, 1959.
- [33] M. Desrochers, J. K. Lenstra, M. Savelsbergh, et F. Soumis, *Vehicle routing with time windows : Optimization and approximation*. Vehicle Routing : Methods and Studies, Jan. 1988, pp. 65–84.
- [34] M. Di Mascolo, M.-L. Espinouse, et C. E. Ozkan, *Synchronization Between Human Resources in Home Health Care Context*. Springer International Publishing, 2014, pp. 73–86.
- [35] M. Dorigo, G. D. Caro, et L. M. Gambardella, “Ant algorithms for discrete optimization”, *Artificial Life*, vol. 5, no. 2, pp. 137–172, 1999.
- [36] M. Drexler, “Synchronization in Vehicle Routing—A Survey of VRPs with Multiple Syn-

- chronization Constraints”, *Transportation Science*, vol. 46, no. 3, pp. 297–316, 2012.
- [37] Y. Dumas, J. Desrosiers, E. Gelinas, et M. M. Solomon, “An optimal algorithm for the traveling salesman problem with time windows”, *Operations Research*, vol. 43, no. 2, pp. 367–371, 1995.
- [38] M. Ehrgott, *Multicriteria Optimization*. Springer Berlin, 2005, vol. 2.
- [39] S. Eilon, C. Watson-Gandy, N. Christofides, et R. de Neufville, “Distribution management-mathematical modelling and practical analysis”, *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, vol. 21, pp. 589 – 589, 12 1974.
- [40] B. Eksioglu, A. Volkan, et A. Reisman, “Computers & Industrial Engineering The vehicle routing problem : A taxonomic review”, *Computers & Industrial Engineering*, vol. 57, no. 4, pp. 1472–1483, 2009.
- [41] N. El Hachemi, M. Gendreau, et L. M. Rousseau, “A heuristic to solve the synchronized log-truck scheduling problem”, *Computers and Operations Research*, vol. 40, no. 3, pp. 666–673, 2013.
- [42] L. En-Nahli, I. Nouaouri, et H. Allaoui, “La planification quotidienne dans une structure d’hospitalisation à domicile avec prise en considération du facteur humain ”, dans *MOSIM, 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation*, Nancy, France, Nov. 2014.
- [43] L. En-nahli, I. Nouaouri, et H. Allaoui, “The home health care routing and scheduling with patients preferences”, dans *Operational Research Applied to Health Services ORAHS*, Lisbon, Portugal, juillet 2014.
- [44] L. En-nahli, H. Allaoui, et I. Nouaouri, “A multi-objective modelling to human resource assignment and routing problem for home health care services”, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 3, pp. 698 – 703, 2015, 15th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing.

- [45] L. En-nahli, S. Affi, H. Allaoui, et I. Nouaouri, “Local search analysis for a vehicle routing problem with synchronization and time windows constraints in home health care services”, *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 12, pp. 1210 – 1215, 2016, 8th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control MIM 2016.
- [46] L. En-nahli, H. Allaoui, et I. Nouaouri, “Heuristique pour le Problème de Conception des Tournées du Personnel Soignant avec Contraintes Multiples dans les Structures d ’ Hospitalisation à Domicile”, *La société française de Recherche Opérationnelle et d’Aide à la Décision, ROADEF Compiègne, France*, no. 1, pp. 4–5, 2016.
- [47] P. Egeborn, P. Flisberg, et M. Ronnqvist, “Laps Care-an operational system for staff planning of home care”, *European Journal of Operational Research*, vol. 171, no. 3, pp. 962–976, 2006.
- [48] F. Y. Edgeworth, *Mathematical physics : an essay on the application of mathematics to the moral sciences*. P. Keagan, London, 1881.
- [49] Fédération nationale des établissements d’hospitalisation à domicile (FNEHAD), “L’hospitalisation à domicile (HAD) en 2016, FNEHAD rapport d’activité 2016-2017.” Rapp. tech., 2017.
- [50] C. Fikar et P. Hirsch, “Home Health Care Routing and Scheduling : A Review”, *Computers & Operations Research*, vol. 77, pp. 86–95, 2016.
- [51] M. L. Fisher et R. Jaikumar, “A generalized assignment heuristic for vehicle routing”, *Networks*, vol. 11, no. 2, pp. 109–124, 1981.
- [52] M. Gendreau, A. Hertz, et G. Laporte, “A tabu search heuristic for the vehicle routing problem”, *Management Science*, vol. 40, no. 10, pp. 1276–1290, 1994.
- [53] B. E. Gillett et L. R. Miller, “A heuristic algorithm for the vehicle-dispatch problem”, *Operations Research*, vol. 22, no. 2, pp. 340–349, 1974.

- [54] F. Glover, “Future paths for integer programming and links to artificial intelligence”, *Computers & Operations Research*, vol. 13, no. 5, pp. 533 – 549, 1986, applications of Integer Programming.
- [55] B. Golden, S. Raghavan, et E. Wasil, *The vehicle routing problem : latest advances and new challenges*. New York ; London : Springer, 2008, formerly CIP.
- [56] E. V. Gutiérrez et C. J. Vidal, “Home Health Care Logistics Management Problems : Framework and Research Perspectives”, *International conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 2012.
- [57] G. Gutin et A. Punnen, *The traveling salesman problem and its variations*. Springer US, 2007.
- [58] Y. Haimès YV, L. Lasdon LS, et D. Wismer DA, “On a bicriterion formulation of the problems of integrated system identification and system optimization”, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. SMC-1, no. 3, pp. 296–297, 7 1971.
- [59] A. Hertz et N. Lahrichi, “Client assignment algorithms for home care services”, Département de mathématiques et de génie industriel, Ecole Polytechnique de Montréal, Rapp. tech., 2006.
- [60] J. Holland, *Adaptation in natural and artificial systems : an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. University of Michigan Press, 1975.
- [61] IBM, *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio CPLEX User’s Manual*, 2014.
- [62] N. Jozefowicz, “Optimisation combinatoire multi-objectif : des méthodes aux problèmes de la Terre à (presque) la Lune”, Habilitation à diriger des recherches, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), Déc. 2013.
- [63] N. Jozefowicz, F. Semet, et E.-G. Talbi, “Multi objective vehicle routing problems”,

- European Journal of Operational Research*, vol. 189, no. 2, pp. 293–309, sep 2008.
- [64] N. Jozefowicz, F. Semet, et E. Talbi, *From Single-Objective to Multi Objective Vehicle Routing Problems : Motivations, Case Studies, and Methods*. Boston, MA : Springer US, 2008, pp. 445–471.
- [65] B. Kallehauge, “Formulations and exact algorithms for the vehicle routing problem with time windows”, *Computers and Operations Research*, vol. 35, no. 7, pp. 2307–2330, 2008.
- [66] Y. Kergosien, C. Lenté, et J.-c. Billaut, “Home health care problem”, *Multidisciplinary International Conference on Scheduling : Theory and Applications (MISTA)*, 2009.
- [67] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, et M. P. Vecchi, “Optimization by simulated annealing”, *Science*, vol. 220, no. 4598, pp. 671–680, 1983.
- [68] N. Labadie et C. Prodhon, *A Survey on Multi-criteria Analysis in Logistics : Focus on Vehicle Routing Problems*. London : Springer London, 2014, pp. 3–29.
- [69] N. Labadie, C. Prins, et C. Prodhon, *Metaheuristics for Vehicle Routing Problems*. John Wiley and Sons, 2016.
- [70] R. Lahyani, M. Khemakhem, et F. Semet, “Rich vehicle routing problems : From a taxonomy to a definition”, *European Journal of Operational Research*, vol. 241, no. 1, pp. 1–14, 2015.
- [71] A. H. Land et A. G. Doig, “An automatic method for solving discrete programming problems”, *ECONOMETRICA*, vol. 28, no. 3, pp. 497–520, 1960.
- [72] E. Lanzarone et A. Matta, “Robust nurse-to-patient assignment in home care services to minimize overtimes under continuity of care”, *Operations Research for Health Care*, vol. 3, no. 2, pp. 48–58, 2014.

- [73] E. Lanzarone, A. Matta, et G. Scaccabarozzi, “A patient stochastic model to support human resource planning in home care”, *Production Planning & Control*, vol. 21, no. 1, 2010.
- [74] G. Laporte, “The vehicle routing problem : an overview of exact and approximated algorithms”, *European Journal of Operation Research*, vol. 3, pp. 345–358, 1992.
- [75] G. Laporte, M. Gendreau, J.-Y. Potvin, et F. Semet, “Classical heuristics for the vehicle routing problem”, *International Transactions in Operational Research*, vol. 7, pp. 285 – 300, 09 2000.
- [76] G. Laporte, “The traveling salesman problem : an overview of exact and approximate algorithms”, *European Journal of Operational Research*, vol. 59, pp. 231–47–231–47, 1992.
- [77] G. Laporte et Y. Nobert, “A cutting planes algorithm for the m-salesmen problem”, *Journal of the Operational Research Society*, vol. 31, no. 11, pp. 1017–1023, Nov 1980.
- [78] Laporte, Gilbert, “Fifty years of vehicle routing”, *Transportation Science*, vol. 43, no. 4, pp. 408–416, 2009.
- [79] B. E. L. Lawler, J. K. Lenstra, A. H. G. R. Kan, et D. B. Shmoys, “The Traveling Salesman Problem : A Guided Tour of Combinatorial Optimization”, pp. 1–2, 1985.
- [80] J. K. Lenstra et A. H. G. R. Kan, “Complexity of vehicle routing and scheduling problems”, *Networks*, vol. 11, no. 2, pp. 221–227, 1981.
- [81] R. Liu, X. Xie, V. Augusto, et C. Rodriguez, “Heuristic algorithms for a vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup and time windows in home health care”, *European Journal of Operational Research*, vol. 230, no. 3, pp. 475–486, 2013.
- [82] H. R. Lourenço, H. R. Lourenço, O. C. Martin, et T. Stützle, “Iterated Local Search : Framework and Applications Iterated Local Search”, *International Series in Operations*

- Research & Management Science*, vol. 146, pp. 363–397, 2010.
- [83] R. Matai, M. L. Mittal, et S. Singh, “Traveling salesman problem : an overview of applications, formulations, and solution approaches”, dans *Traveling Salesman Problem*, D. Davendra, éd. Rijeka : IntechOpen, 2010, ch. 1.
- [84] P. A. Maya Duque, M. Castro, K. S? ?rensen, et P. Goos, “Home care service planning: the case of Landelijke Thuiszorg”, *European Journal of Operational Research*, vol. 243, no. 1, pp. 292–301, 2015.
- [85] C. E. Miller, A. W. Tucker, et R. A. Zemlin, “Integer programming formulation of traveling salesman problems”, *J. ACM*, vol. 7, no. 4, pp. 326–329, Oct. 1960.
- [86] Ministère des Affaires sociales, de la Santé et des Droits des Femmes, “Plan nationale 2015-2018 pour le développement des soins palliatifs et l’accompagnement en fin de vie des soins palliatifs ”, Rapp. tech., 2015.
- [87] N. Mladenović et P. Hansen, “Variable neighborhood search”, *Computers & Operations Research*, vol. 24, no. 11, pp. 1097 – 1100, 1997.
- [88] P. Moscato, “On evolution, search, optimization, genetic algorithms and martial arts : Towards memetic algorithms”, Caltech Concurrent Computation Program, Rapp. tech., 1989.
- [89] S. Nickel, M. Schroder, et J. Steeg, “Mid-term and short-term planning support for home health care services”, *European Journal of Operational Research*, vol. 219, no. 3, pp. 574–587, 2012.
- [90] I. Osman et G. Laporte, “Metaheuristics : A bibliography”, *Annals of Operational Research*, vol. 63, pp. 513–628, 10 1996.
- [91] M. Padberg et G. Rinaldi, “Optimization of a 532-city symmetric traveling salesman problem by branch and cut”, *Operations Research Letters*, vol. 6, no. 1, pp. 1 – 7, 1987.

- [92] V. Pareto, *Cours d'économie politique*, 1986.
- [93] M. S. Rasmussen, T. Justesen, A. Dohn, et J. Larsen, “The Home Care Crew Scheduling Problem : Preference-based visit clustering and temporal dependencies”, *European Journal of Operational Research*, vol. 219, no. 3, pp. 598–610, 2012.
- [94] R. Redjem et E. Marcon, “Operations management in the home care services : a heuristic for the caregivers’ routing problem”, *Flexible Services and Manufacturing Journal*, vol. 28, no. 1-2, pp. 280–303, 2016.
- [95] G. Reinelt, “The Traveling Salesman : Computational Solutions for TSP Applications , Lecture Notes in Computer Science ”, 1994.
- [96] F. Sanz et E. Gómez, “The vehicle routing problem with limited vehicle capacities”, *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, vol. 3, pp. 260–268, 09 2013.
- [97] M. M. Solomon, “Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints”, *Operations Research*, vol. 35, no. 2, pp. 254–265, 1987.
- [98] E. Talbi, *Metaheuristics : From Design to Implementation*, série Wiley Series on Parallel and Distributed Computing. Wiley Publishing, 2009.
- [99] K. Thomsen, “Optimization on Home Care”, Thèse de doctorat, Technical University of Denmark, 2006.
- [100] P. Toth et D. Vigo, *The Vehicle Routing Problem*, P. Toth et D. Vigo, édés. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002.
- [101] P. Toth, D. Vigo, P. Toth, et D. Vigo, *Vehicle Routing : Problems, Methods, and Applications, Second Edition*. Philadelphia, PA, USA : Society for Industrial and Applied Mathematics, 2014.

- [102] A. Trautsamwieser et P. Hirsch, “Optimization of daily scheduling for home health care services”, *Journal of Applied Operational Research*, vol. 3, no. 3, pp. 124–136, 2011.
- [103] S. Yalcindag, A. Matta, et E. Sahin, “Human resource scheduling and routing problem in home health care context : a literature review”, dans *Proceedings of 37th Conference on Operational Research Applied to Health Services, Cardiff*, 2011.
- [104] B. Yuan, R. Liu, et Z. Jiang, “A branch-and-price algorithm for the home health care scheduling and routing problem with stochastic service times and skill requirements”, *International Journal of Production Research*, vol. 53, no. 24, pp. 7450–7464, 2015.
- [105] E. Zitzler et L. Thiele, “Multiobjective evolutionary algorithms : a comparative case study and the strength Pareto approach”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 3, no. 4, pp. 257–271, 1999.
- [106] E. Zitzler, D. Brockhoff, et L. Thiele, “The hypervolume indicator revisited : On the design of pareto-compliant indicators via weighted integration”, dans *Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, S. Obayashi, K. Deb, C. Poloni, T. Hiroyasu, et T. Murata, édés. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2007, pp. 862–876.