



HAL
open science

Considération de la dimension humaine dans l'optimisation de tournées de soins et services à domicile soumises à des perturbations

Clea Martinez

► **To cite this version:**

Clea Martinez. Considération de la dimension humaine dans l'optimisation de tournées de soins et services à domicile soumises à des perturbations. Ordinateur et société [cs.CY]. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2020. Français. NNT : 2020GRALI060 . tel-03124120

HAL Id: tel-03124120

<https://theses.hal.science/tel-03124120>

Submitted on 28 Jan 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Génie Industriel**

Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Cléa MARTINEZ

Thèse dirigée par **Maria DI MASCOLO**
et codirigée par **Marie-Laure ESPINOUSE**

préparée au sein de **G-SCOP : Grenoble - Sciences pour la
Conception, l'Optimisation et la Production**
dans l'**École Doctorale I-MEP2 : Ingénierie – Matériaux,
Mécanique, Environnement, Énergétique, Procédés,
Production**

Considération de la dimension humaine dans l'optimisation de tournées de soins et services à domicile soumises à des perturbations

Thèse soutenue publiquement le **02 Novembre 2020**,
devant le jury composé de :

Mme Myriam PREISSMANN

Directrice de Recherche CNRS, G-SCOP, Présidente

M. Hamid ALLAOUI

Professeur Université d'Artois, LGI2A, Rapporteur

Mme Sylvie NORRE

Professeur Université Clermont-Auvergne, LIMOS, Rapportrice

M. Franck FONTANILI

Maitre-Assistant, IMT Albi, CGI, Examineur

M. Thibaud MONTEIRO

Professeur INSA Lyon, DISP, Examineur

M. Amour SOUKHAL

Professeur Université de Tours, LIFAT, Examineur

Mme Maria DI MASCOLO

Directrice de recherche CNRS, G-SCOP, Directrice de thèse

Mme Marie-Laure ESPINOUSE

Professeur Université Grenoble Alpes, G-SCOP, Co-directrice de thèse

M. Jérôme RADUREAU

Dirigeant de Adomni-Quemera, Invité



Remerciements

Une thèse est à la fois un cheminement solitaire et une formidable aventure collective. Je tiens donc à adresser quelques mots à toutes les personnes sans qui ces pages n'existeraient pas.

Je souhaite tout d'abord remercier Maria Di Mascolo et Marie-Laure Espinouse qui ont dirigé ces travaux, et m'ont accompagnée pendant ces trois années. Merci pour votre confiance et vos conseils, pour m'avoir laissé explorer mes idées parfois farfelues, pour m'avoir accordé du temps quand il filait à toute vitesse.

Ensuite, j'adresse mes remerciements à tous les membres de mon jury, à commencer par mes rapporteurs Sylvie Norre et Hamid Allaoui pour leurs précieuses remarques sur mon manuscrit. Merci à Myriam Preissmann d'avoir présidé mon jury et accepté avec le sourire tous les rebondissements de dernière minute. Merci à Franck Fontanili, Thibaud Monteiro et Ameur Soukhal pour leur bienveillance et la pertinence de nos échanges durant la soutenance. Merci enfin à Jérôme Radureau et toute l'équipe d'Adomni-Quemera pour m'avoir chaleureusement accueillie et fourni un formidable terrain d'expérimentation pour mes travaux.

Merci à tous les personnels des services informatique et administratif qui nous rendent la vie plus facile et qui font de G-SCOP un endroit où il est agréable de travailler. Merci Pierre pour m'avoir réconciliée avec l'analyse, et pour m'avoir permis d'enseigner en toute sérénité.

Quand le moral est en baisse, il est bon de pouvoir toquer aux bureaux d'à côté pour se remotiver. Merci à tous les collègues avec qui j'ai partagé un café, une coinche, un footing, ou même un tour en hélico. L'énumération est dangereuse, mais je me lance, au risque d'oublier quelques noms : merci à Nico, Katyanne, Margaux, Valentin, Pascal, Lucie, Tom, Cédric P., Cédric E., Lucas, Cléopée, Florian, Clément, Maud, Astor, Akram et tous les squatteurs de la cafet'.

Merci Victor pour ta présence, tout simplement.

Merci aux ouvriers de l'amphi Barbillon pour leur accompagnement sonore lors de ma soutenance et surtout pour leur incroyable sens du timing.

J'adresse également une pensée à mes acolytes Alizée, Lise, Mathilde et Myriam. Mes années d'études ont passé si vite avec vous que repartir pour trois ans de plus ne m'a pas paru insensé à l'époque. Merci de m'avoir supportée (dans tous les sens du terme) et de continuer à le faire, votre amitié est précieuse.

Enfin, comment terminer sans un mot pour ma famille, auprès de laquelle je trouve toujours le réconfort dont j'ai besoin. Merci à Tom et Célia, sans qui la vie aurait été bien plus ennuyeuse. Merci à mes grand-mères Anita et Odette, qui ont surmonté les barrières de la technologie pour assister à ma soutenance.

Mes tous derniers remerciements vont évidemment à mes parents, toujours présents et impliqués, qui se sont improvisés relecteurs et correcteurs dans la dernière ligne droite. Papa, Maman, je n'aurai jamais assez de mots pour exprimer toute ma gratitude. Merci pour votre soutien inconditionnel et votre infinie patience, je vous aime.

Table des matières

Remerciements	3
Résumé	9
Abstract	11
1 Introduction	13
1.1 Organisation du manuscrit	15
1.2 Contexte démographique	16
1.3 Le système de santé, médico-social et social en France	17
1.3.1 Les différents acteurs de la santé publique	17
1.3.2 Les alternatives à l'hospitalisation	18
1.4 Focus sur le soin et service à domicile en France	19
1.4.1 Services d'aides et soins à domicile	19
1.4.2 Importance de la dimension humaine dans le soin et service à domicile	20
1.5 Différences entre soin et service à domicile	21
2 État de l'art	23
2.1 Introduction	24
2.2 Introduction aux problèmes de tournées de véhicules	25
2.2.1 Problèmes de tournées de véhicules	25
2.3 Les problèmes de tournées de soins et services à domicile	26
2.3.1 Critères d'optimisation	27
2.3.2 Contraintes	30
2.3.3 Approches de résolution	34
2.3.4 Cas d'études et outils d'aide à la décision	36
2.4 Réoptimisation, aspects dynamiques et incertitudes	37
2.4.1 Motivation	38
2.4.2 Différents types d'incertitudes/perturbations considérées	38
2.4.3 Approches	40
2.4.4 Modélisation	41
2.4.5 Objectifs	42
2.4.6 Discussion sur les incertitudes	42

2.5	Positionnement de nos travaux	43
3	Planification de tournées avec optimisation de la continuité de soins	45
3.1	Introduction	46
3.2	Les variantes du VRP dans la littérature	46
3.2.1	Tournées de véhicules et variantes	46
3.2.2	Positionnement	47
3.3	Continuité de soins : définitions et indicateurs	48
3.4	Description du problème	50
3.5	Méthode de résolution	51
3.5.1	Heuristique à horizon glissant	51
3.5.2	Construction d'une solution initiale pour le problème journalier	52
3.5.3	Formulation mathématique pour le problème journalier (HHCRSP1)	53
3.5.4	Modèle global (HHCRSP-G)	55
3.6	Expérimentations	56
3.6.1	Caractéristiques des instances	56
3.6.2	Résultats expérimentaux	57
3.7	Conclusion	58
4	Réoptimisation stratégique des tournées de soins	61
4.1	Introduction	62
4.2	Modèles et méthodes pour les tournées de véhicules	63
4.2.1	Modèles mathématiques pour le Vehicle Routing Problem (VRP)	63
4.2.2	Problèmes statiques et dynamiques	64
4.2.3	Méthodes de décomposition	64
4.2.4	Positionnement	65
4.3	Description du problème	66
4.3.1	Exemple	67
4.3.2	Contraintes	68
4.3.3	Objectifs	70
4.4	Formulation mathématique	71
4.5	Méthode de résolution : SRO	75
4.5.1	Génération de graphes	75
4.5.2	Génération de tournées	78
4.5.3	Sélection de tournées	83
4.5.4	Retour sur la prise en compte des contraintes	86
4.6	Expérimentations	87
4.6.1	Instances	87
4.6.2	Résultats numériques	88
4.6.3	Analyse des résultats	89
4.7	Conclusion et perspectives	91

5 Réoptimisation opérationnelle des tournées de soins	95
5.1 Introduction et motivation	96
5.2 Méthodes multi-objectif pour l'optimisation	97
5.2.1 Positionnement de nos travaux	98
5.3 Description du problème	99
5.3.1 Contraintes	99
5.3.2 Objectifs	100
5.3.3 Exemple illustratif	101
5.4 Formulation mathématique	102
5.5 Méthode de résolution : ORO	105
5.5.1 Génération de graphes	106
5.5.2 Génération de tournées	111
5.5.3 Réparation de tournées	114
5.5.4 Sélection de tournées	117
5.6 Expérimentations	122
5.6.1 Génération et classification des instances	122
5.6.2 Résultats numériques	123
5.6.3 Analyse des résultats	124
5.7 Conclusion	128
6 Cas d'étude : Adomni-Quemera, une entreprise de services à domicile en Nord-Isère	133
6.1 Préambule	134
6.2 Présentation d'Adomni-Quemera	135
6.2.1 Élaboration manuelle des plannings	135
6.2.2 Automatisation de la planification	136
6.3 Description des problèmes	137
6.3.1 Caractéristiques générales	137
6.3.2 Contraintes additionnelles	137
6.3.3 Objectifs pour la réoptimisation stratégique	140
6.4 Adaptation des méthodes SRO et ORO	140
6.4.1 Prise en compte des nouvelles contraintes	140
6.4.2 Prise en compte des nouveaux objectifs	143
6.4.3 Adaptation pour passer à l'échelle	143
6.5 Interface et traitement des données	144
6.5.1 Construction de la base de données	144
6.5.2 Utilisation de l'interface	145
6.5.3 Processus de replanification	148
6.5.4 Maintenance	150
6.6 Expérimentations	150
6.6.1 Expérimentations pour le problème stratégique	150
6.6.2 Expérimentations pour le problème opérationnel	153
6.7 Discussion	158

Conclusion générale et perspectives	161
Liste des acronymes	166
Liste des figures	169
Liste des tableaux	171
Liste des publications	173
Bibliographie	175
Annexes	193
A Compléments bibliographiques	193

Résumé

Avec le vieillissement des populations occidentales et la volonté de désengorger les différentes structures médicales et paramédicales, le secteur des soins et des services à domicile est en pleine expansion et fait l'objet de nombreux travaux de recherche. De nouveaux problèmes organisationnels se posent pour les structures de soins et de services à domicile, qui doivent adapter leur fonctionnement interne afin de faire face à une demande croissante. Le processus de planification des tournées de soins et services, actuellement majoritairement réalisé à la main, représente donc un enjeu majeur et doit être automatisé. De plus, du fait de l'instabilité de l'état de santé des patients d'une part, et des conditions de travail peu gratifiantes pour les intervenants d'autre part, le secteur est soumis à un fort turnover. Ce phénomène perturbe le bon déroulement des plannings qui nécessitent alors des ajustements ou parfois même des réoptimisations complètes. Cela impacte directement la satisfaction des patients, qui constitue un élément-clé dans nos travaux. Pour limiter ce roulement, il convient de privilégier également la satisfaction des intervenants lors de la création des tournées. Nous portons un intérêt particulier à ce dernier aspect, peu étudié dans la littérature.

Tout d'abord, nous étudions un problème de planification classique pour préserver la continuité de soins, qui revêt un aspect primordial dans les travaux de santé publique. Puis, nous proposons une méthode exacte pour réoptimiser les tournées de soins lorsque les départs et arrivées de patients ont rendu les plannings obsolètes. Ensuite, nous proposons une heuristique adaptée à une réoptimisation journalière des tournées pour faire face à l'absentéisme des intervenants. Enfin, nous réalisons une preuve de concept pour un cas réel en adaptant les méthodes développées dans le cadre de cette thèse. Nous mettons en évidence et analysons les écueils rencontrés pour passer d'une preuve de concept à une mise en pratique de notre approche.

Mots-clés : optimisation dans le secteur du soin et du service à domicile, satisfaction des intervenants et des patients, planification de tournées, approches mono et multi-objectif, étude de cas, programmation linéaire

Abstract

Due to the aging of western populations and the will of decreasing the number of admissions in hospitals and nursing homes, the Home Health Care (HHC) sector expanded in the last decades, as well as the research in this field. HHC agencies face new management issues. They have to modify their inner workings to deal with increasing demands. The routing and scheduling process, mostly done by hand, must be automated to become faster and more efficient. What's more, the continuous changes within the pool of patients and in the staff make it difficult to plan the tours of the workers. As a result, it is unlikely to complete a schedule without undergoing some adjustments, or a full re-optimization. It directly impacts the satisfaction of the patients, which is one of our main concerns. To limit the turnover, the satisfaction of careworkers must also be encouraged in the routing and scheduling process. We are specifically interested in this last aspect, which received little attention in the literature.

Firstly, we study a classic routing and scheduling problem with an unusual objective of preserving the continuity of care, which is a crucial topic in public health problems. Secondly, we suggest an exact method to re-optimize the planning whenever the variations within the pool of patients and careworkers made the current planning obsolete. Then, we develop a heuristic to address the punctual absences of careworkers. Finally, we present a case study. We highlight and analyze the difficulties of applying theoretical methods to real problems.

Keywords : optimization in home health care context, satisfaction of caregivers and patients, routing and scheduling, mono and multi-objective approaches, case study, linear programming

Chapitre 1

Introduction

Sommaire

1.1	Organisation du manuscrit	15
1.2	Contexte démographique	16
1.3	Le système de santé, médico-social et social en France . . .	17
1.3.1	Les différents acteurs de la santé publique	17
1.3.2	Les alternatives à l'hospitalisation	18
1.4	Focus sur le soin et service à domicile en France	19
1.4.1	Services d'aides et soins à domicile	19
1.4.2	Importance de la dimension humaine dans le soin et service à domicile	20
1.5	Différences entre soin et service à domicile	21

Dans ce chapitre, nous introduisons les différents problèmes traités dans cette thèse, et le contexte dans lequel ils s'inscrivent.

La prise en charge à domicile permet à des personnes fragiles de recevoir des soins ou des services chez elle. Cela leur permet de garder un certain confort et de retarder voire d'éviter leur admission dans des structures médicales ou paramédicales souvent engorgées. Avec le vieillissement des populations occidentales, le secteur des soins et des services à domicile est en pleine expansion, et les structures adaptées doivent faire face à une demande croissante qui pose de nouveaux problèmes organisationnels.

La planification des tournées de soins et services est souvent confiée à des employés expérimentés et réalisée à la main, ce qui représente une tâche extrêmement chronophage et difficile à mettre en œuvre pour des problèmes à grande échelle. Il apparaît donc nécessaire d'établir des méthodes pour automatiser et optimiser le processus de planification, afin de gagner en efficacité et en adaptabilité face aux aléas du terrain.

À cause de l'évolution constante de l'état de santé des bénéficiaires et par conséquent de leurs besoins, les plannings doivent être régulièrement renouvelés. De plus, les conditions de travail peu gratifiantes et particulièrement stressantes causent un fort roulement du personnel, ce qui perturbe également le bon déroulement des plannings. Dans ce cas, reprendre la planification des tournées de zéro ne constitue pas toujours une solution adaptée dans un contexte où l'aspect humain est primordial. En effet, les patients intègrent souvent ces structures pour de longues durées, et ont besoin d'une certaine continuité afin d'établir une relation de confiance avec les intervenants qui leur fournissent soins et services. Il s'agit donc d'affecter un nombre réduit d'intervenants à un même patient. Cette continuité concourt à assurer une bonne qualité de service et constitue un facteur majeur de la satisfaction des patients.

L'instabilité des plannings peut également être limitée par la prise en compte des intérêts des intervenants, et l'amélioration de leurs conditions de travail. Que ce soit du point de vue du patient ou de l'intervenant, l'intégration de la dimension humaine dans la conception des tournées de soins est déterminante pour le bon fonctionnement d'une structure.

Certaines perturbations comme les départs de patients en maison de retraite, les départs à la retraite ou les recrutements d'intervenants peuvent être anticipées et intégrées au processus de planification au niveau stratégique. Au contraire, d'autres aléas surviennent de manière impromptue (urgence, arrêt-maladie d'un intervenant, annulation de dernière minute, etc.) et leur gestion intervient plutôt au niveau opérationnel.

Dans cette thèse, nous abordons des problèmes de (re)planification de tournées de soins à différents niveaux décisionnels. Nous nous attachons à identifier des critères de satisfaction des intervenants et des patients afin de caractériser la notion de "tourné satisfaisante", et l'intégrer à des algorithmes de réoptimisation de plannings soumis à des perturbations.

1.1 Organisation du manuscrit

Ce manuscrit est composé de 6 chapitres.

Dans ce premier chapitre, nous donnons quelques éléments généraux sur l'évolution démographique de la population française, et le fonctionnement du système de santé français afin de mieux comprendre le contexte dans lequel s'inscrivent les travaux de cette thèse.

Le chapitre 2 dresse un état de l'art des problèmes de tournées de soins et de services dans la littérature. Nous proposons une classification non-exhaustive des variantes étudiées en fonction des objectifs considérés, des contraintes prises en compte et des méthodes mises en œuvre pour proposer des solutions. Nous nous attardons également sur la prise en compte des incertitudes et aspects dynamiques inhérents au domaine. Enfin, nous clarifions le positionnement de la recherche présentée dans cette thèse par rapport aux travaux existants dans la littérature.

Dans le chapitre 3, nous nous intéressons à un problème classique de planification de tournées de soins avec fenêtre de temps, dans lequel notre objectif est toutefois original, puisque nous mettons la conservation de la continuité de soin au premier plan. Cet aspect, souvent ignoré ou considéré comme une contrainte dans la littérature, représente pourtant un enjeu majeur dans la satisfaction des patients, et est un élément clé des travaux de recherche en santé publique. Nous proposons une méthode heuristique à horizon glissant, mêlant algorithme constructif et programmation linéaire pour résoudre un problème de planification hebdomadaire.

Le chapitre 4 aborde un problème de réoptimisation stratégique pour pallier les inévitables changements de personnel et de patientèle. Il s'agit de proposer des plannings hebdomadaires efficaces tout en gardant une continuité avec les plannings en cours d'exécution au moment de la replanification. Nous considérons des contraintes de continuité, à la fois humaines et temporelles. Nous proposons une méthode exacte se basant sur une décomposition du problème en deux phases et capable de résoudre des instances de taille réelle.

Dans le chapitre 5, nous étudions un autre problème de replanification au niveau opérationnel. Il s'agit de réoptimiser les plannings journaliers en cas d'absence inopinée du personnel. Nous proposons une adaptation heuristique de la méthode présentée dans le chapitre précédent pour répondre aux enjeux du terrain. Nous introduisons de la flexibilité dans les horaires des services, étudions une continuité de soins partielle, et adoptons une approche multi-objectif. Nous testons notre méthode sur des instances adaptées de la littérature.

Le chapitre 6 dresse le bilan de la collaboration établie avec Adomni-Quemera, une

entreprise de services à domicile officiant en Isère. Nous détaillons les problèmes auxquels l'entreprise est confrontée, et qui ont en partie inspiré les problèmes considérés dans cette thèse. Nous faisons un état des différences notoires entre terrain et théorie, et nous introduisons la preuve de concept développée pour répondre à leurs besoins. Nous finissons par une réflexion autour des écueils rencontrés lors de la mise en test de notre preuve de concept.

Ce manuscrit s'achève enfin par une conclusion dans laquelle nous récapitulons l'ensemble des travaux réalisés. Nous proposons également différentes pistes de recherche que nos travaux ont pu mettre en perspective.

1.2 Contexte démographique

Le vieillissement démographique peut se définir comme l'accroissement du pourcentage de personnes âgées de plus de 60 ans dans la population. D'après l'[Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques \(INSEE\)](#), ce vieillissement s'est accéléré en France ces dernières années. En 2000, les plus de 60 ans représentaient 20.4 % de la population française, contre 22.6 % en 2010, et 25.6 % en 2018¹. Les projections de population réalisées par l'[INSEE](#) montrent que le phénomène va prendre de l'ampleur dans les années à venir (cf Figure 1.1). Ce vieillissement semble à la fois résulter de l'augmentation de l'espérance de vie, mais aussi de l'inversion de la pyramide des âges liée à la dénatalité. C'est également une des conséquences de l'explosion démographique d'après-guerre : le baby-boom provoque aujourd'hui un papy-boom dans les pays développés.

Le secteur économique est fortement impacté par cette évolution démographique qui provoque un changement dans la consommation, avec une hausse dans certains secteurs comme la santé, les loisirs ou les services, et une baisse dans d'autres secteurs comme le transport ou les biens d'équipement. L'économie des seniors, ou silver economy, désigne l'ensemble des marchés à destination des personnes de plus de 60 ans. Le secteur de la santé est particulièrement touché par l'essor de la silver economy : en Europe, les seniors représentent 40 % des dépenses de santé². De plus en plus d'entreprises profitent de l'explosion de la génération des "papy-boomers" pour transformer leur offre et s'adapter à ces nouveaux consommateurs, dont le niveau de vie médian est supérieur de près de 9 % de celui de l'ensemble des français². L'autonomie étant un des piliers de la silver economy et le marché des [Établissements d'Hébergement pour Personnes Âgées et Dépendantes \(EHPAD\)](#) étant saturé, la prise en charge à domicile se démocratise et séduit de plus en plus les seniors car elle permet de maintenir un certain confort pour

1. Evolution de la population - Bilan démographique 2019 de l'INSEE <https://www.insee.fr/fr/statistiques/1892117?sommaire=1912926>

2. Article du Monde, Les seniors un eldorado économique à conquérir, 2019 https://www.lemonde.fr/economie/article/2019/11/19/les-seniors-un-eldorado-economique-a-conquerir_6019657_3234.html

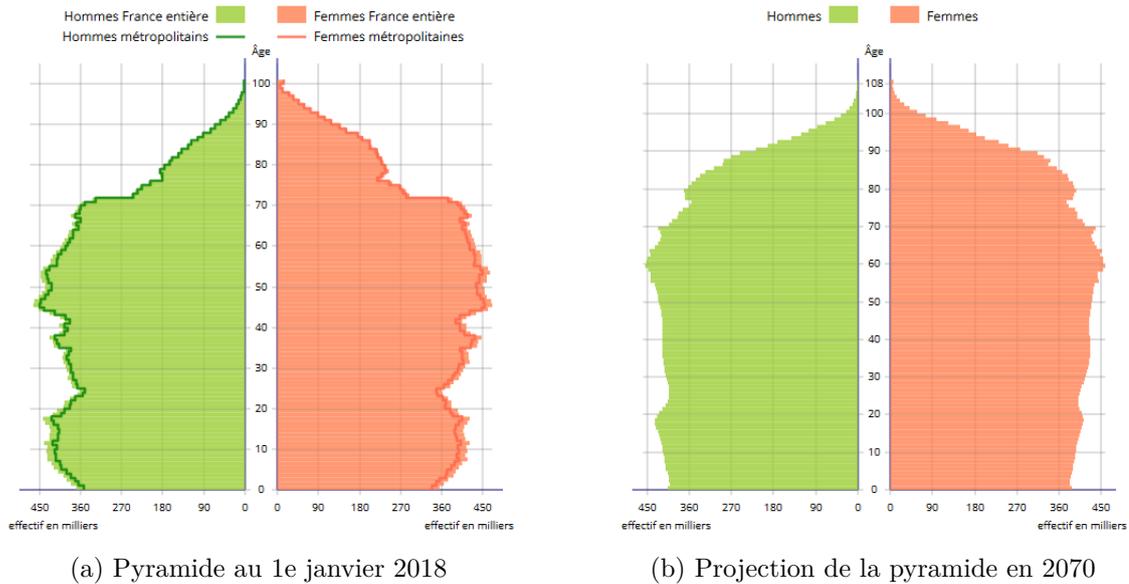


FIGURE 1.1 – Pyramide des âges de la population française. *Source : Insee, projections de populations 2013-2070*¹

les patients et leurs proches, et de retarder l'entrée en maison de retraite.

Dans la section suivante, nous décrivons brièvement le fonctionnement du système de santé en France, et les différentes structures permettant le maintien à domicile des seniors.

1.3 Le système de santé, médico-social et social en France

1.3.1 Les différents acteurs de la santé publique

La médecine de parcours vise à regrouper tous les types de soins afin de renforcer la prise en charge et l'accompagnement des patients à travers tout le territoire. Que ce soit au niveau national, régional ou local, divers acteurs permettent de coordonner les différentes structures de santé afin de renforcer la prise en charge des patients³.

Au niveau national, les pouvoirs publics sont à la base de l'organisation du système sanitaire et médico-social. Les ministères de la Santé et des Affaires Sociales prennent notamment en charge l'application des politiques de santé publique. Ils veillent à la répartition des structures sur l'ensemble du territoire, et gèrent les organismes d'assurance-

3. Site du ministère des solidarités et de la santé <https://solidarites-sante.gouv.fr/systeme-de-sante-et-medico-social/systeme-de-sante-et-medico-social/article/systeme-de-sante-medico-social-et-social>

maladie.

Les **Agences Régionales de Santé (ARS)** prennent le relais au niveau régional. Les politiques nationales sont adaptées aux spécificités démographiques et géographiques régionales via des **Programmes Régionaux de Santé (PRS)**, **Schémas Régionaux d'Organisation des Soins (SROS)**, ou **Schémas Régionaux d'Organisation Médico-Sociale (SROMS)**. Ainsi, les populations fragiles sont mieux ciblées et mieux accompagnées dans leur parcours de soins.

Au niveau local, le but est de lutter contre les inégalités et d'améliorer la diversité de l'offre de soins et médico-sociale. Les structures locales s'articulent autour des **ARS** pour organiser la prise en charge des patients. Les soins primaires, ou soins de proximité, sont assurés par les médecins généralistes. Les médecins spécialistes fournissent les soins de second recours, tandis que les établissements de santé sont chargés des soins dits de troisième recours.

En France, le système de santé s'appuie sur différentes structures :

- Les structures sanitaires pour la prise en charge hospitalière : les hôpitaux publics, cliniques privées, et établissements privés d'intérêt collectif. On y délivre à la fois des soins généraux et des soins spécialisés. Ces structures participent également à la médecine d'urgence en appui des services d'urgences, **Service d'Aide Médicale Urgente (SAMU)** et **Services Mobiles d'Urgence et de Réanimation (SMUR)**.
- Les structures ambulatoires pour fournir les "soins de ville". Il s'agit des cabinets libéraux, des maisons ou centre de santé où exercent les médecins généralistes et spécialistes, pharmaciens, dentistes, kinésithérapeutes, etc.
- Les structures médico-sociales et sociales destinées aux personnes fragiles, c'est-à-dire des personnes précaires, âgées, dépendantes ou en situation de handicap. Elles regroupent entre autres les **EHPAD** ou des structures spécialisées pour les personnes handicapées.

1.3.2 Les alternatives à l'hospitalisation

Depuis quelques années, les pouvoirs publics poussent au développement d'alternatives à l'hospitalisation classique ou à l'hébergement en **EHPAD**. Parmi elles, nous pouvons par exemple citer³ :

- La chirurgie ambulatoire qui permet de réduire les délais de prise en charge et d'éviter des hospitalisations.
- La télémédecine qui permet d'établir un diagnostic à distance, d'éviter des transports inutiles, et de faciliter l'accès aux soins.

- L'**Hospitalisation À Domicile (HAD)** qui permet d'éviter ou de réduire les hospitalisations avec hébergement. Les soins sont délivrés directement au domicile du patient, ce qui assure le confort de vie du patient et de ses proches, notamment pour des traitements longs et fréquents (chimiothérapie, soins palliatifs, etc.).
- Les services de soins infirmiers à domicile qui permettent de fournir une surveillance médicale, des soins médicaux et paramédicaux.
- Les services de maintien à domicile qui permettent de fournir des services sociaux ou médico-sociaux à des personnes vulnérables.

Dans cette thèse, nous nous intéressons au secteur du soin et service à domicile au sens large (hospitalisation à domicile, soins infirmiers à domicile, maintien à domicile). La prochaine section apporte quelques informations complémentaires sur les différentes structures du domaine, et sur la prépondérance de la dimension humaine dans la gestion des problèmes organisationnels rencontrés.

1.4 Focus sur le soin et service à domicile en France

1.4.1 Services d'aides et soins à domicile

L'augmentation du nombre de seniors dans notre société va de pair avec l'augmentation du nombre de personnes dépendantes ou fragiles, qui souhaitent se maintenir le plus longtemps possible à leur domicile. Au 1^{er} janvier 2015, l'**INSEE** recensait 2113 services de soins infirmiers à domicile pour personnes âgées, ce qui correspond à 117093 places dans ces établissements ou services⁴. Selon la population visée ou le type d'acte requis, on distingue plusieurs types de services⁵.

Services à la Personne (SAP)

Les **SAP** désignent des services d'aide à la personne pour des tâches de la vie quotidienne. Ils concernent les activités de type aide ménagère, garde d'enfants, assistance aux personnes âgées ou handicapées. Pour être catégorisées **SAP**, ces activités doivent être exercées en mode mandataire, c'est-à-dire que le bénéficiaire se positionne en tant qu'employeur de l'intervenant.

Services d'Aide et d'Accompagnement (SAAD)

Les structures de **SAAD** sont des organismes qui fournissent des services à la personne en mode prestataire. Leurs interventions consistent à accompagner les personnes dépendantes ou fragilisées dans les tâches de la vie quotidienne avec entre autres, des actes de préservation de l'autonomie et de développement des activités sociales.

4. Etude INSEE, Personnels et équipements de santé <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3303478?sommaire=3353488>

5. Site du ministère des solidarités et de la santé <https://solidarites-sante.gouv.fr/affaires-sociales/personnes-agees/droits-et-aides/article/aides-et-soins-a-domicile>

Services de soins infirmiers à domicile (SSIAD)

Les SSIAD ont vu le jour en 1981. Ils fournissent des soins médico-sociaux chez les personnes âgées ou fragilisées qui nécessitent des soins infirmiers. Ils ont vocation à retarder l'intégration des patients dans des structures médicalisées, ou au contraire à faciliter leur retour à domicile après une hospitalisation.

Services Polyvalents d'Aide et de Soins à Domicile (SPASAD)

Les SPASAD sont apparus en 2005. Ces établissements regroupent les actes traditionnellement effectués dans les SSIAD et les SAAD.

1.4.2 Importance de la dimension humaine dans le soin et service à domicile

Dans le secteur du soin et service à domicile, les conditions de travail sont très difficiles : le rythme de travail est intense, les horaires de travail décalés, la rémunération est faible, et les contrats sont souvent à temps partiel, ce qui oblige les intervenants à avoir plusieurs employeurs. De plus, les intervenants sont soumis à des contraintes physiques et psychologiques importantes. Le nombre d'accidents du travail dans le secteur du soin à domicile est trois fois plus élevé que pour la moyenne des salariés français⁶.

La charge de travail élevée, tant en nombre d'interventions qu'en temps de service, les déplacements importants dans une journée de travail et la charge émotionnelle liée au public précaire côtoyé, peut conduire à un épuisement professionnel du personnel. Du fait de ce cadre de travail extrêmement exigeant et du manque de reconnaissance (salarial et sociétal), le turnover est particulièrement élevé dans le secteur. Ces difficultés sont moins présentes dans les EHPAD par exemple, où la plupart des contrats proposés sont des emplois à plein temps, avec une organisation du travail plus classique. La prise en compte de la pénibilité du travail, des situations personnelles des intervenants et de leurs revendications est indispensable dans l'organisation d'une structure de soins et services à domicile.

Le roulement du personnel qui résulte en partie de ces conditions de travail difficiles impacte fortement la réalisation des plannings et cause de nombreux problèmes organisationnels aux structures. Dans un milieu où la concurrence est forte, elles doivent sans cesse s'adapter à ces perturbations et recruter de nouveaux intervenants. Les départs d'intervenants et les arrivées de nouvelles recrues doivent intégrer le processus de planification sans que la qualité de service en pâtisse, au risque d'avoir un impact négatif sur la satisfaction des patients. La patientèle est également soumise à de nombreuses évolutions. Alors, il faut adapter les tournées en conséquence, tout en gardant une continuité avec le parcours de soin des patients déjà présents dans la structure.

6. <https://www.pstformation.com/risques-professionnels-pour-les-aides-a-domicile/>

Les structures de soins et services à domicile doivent faire preuve d'une grande réactivité et être capables de s'adapter à tout type de perturbation tout en garantissant une certaine qualité de vie au travail pour les intervenants, et une qualité de service pour les patients.

1.5 Différences entre soin et service à domicile

En France, on distingue le soin à domicile des services d'aide à domicile. La différence majeure réside d'une part dans le type d'interventions effectuées, et d'autre part dans le type de qualifications requises pour le personnel en charge de ces interventions.

Les soins à domicile sont des actes infirmiers, de nursing ou paramédicaux faisant appel à des infirmiers, aides-soignants, kinésithérapeutes, etc. L'administration de médicaments, les analyses médicales, les injections, soins de blessures, suivi de l'état de santé sont des actes relevant du soin à domicile. Ils sont généralement prescrits par un médecin généraliste suite à une hospitalisation ou une perte d'autonomie.

L'**HAD** est également souvent incluse dans la notion de soin à domicile.

Les services d'aide à domicile relèvent quant à eux de l'aide à la vie quotidienne. Ce sont les aide-ménagères, auxiliaires de vie sociale, ou assistants de vie qui fournissent les prestations. Il s'agit généralement d'aide au ménage, d'aide à l'hygiène, d'aide à la préparation des repas, d'accompagnement, etc. Le service à domicile a pour but d'aider les personnes fragiles dans les tâches quotidiennes, et d'éviter les risques d'isolement social qui touchent ces populations.

Cette distinction entre soins et services n'apparaît pas aussi clairement dans d'autres pays. Dans la littérature scientifique dont nous avons connaissance, il semble que le **Home Care (HC)** et **Home Health Care (HHC)** soient souvent assimilés et traités de manière conjointe, au moins dans les travaux de recherche relevant du domaine de la recherche opérationnelle.

Dans cette thèse, nous ne nous focaliserons pas sur cette spécificité du système français, et parlerons indifféremment de soins ou de services. De même, les personnes ayant recours aux soins à domicile sont généralement désignées comme des patients, alors que celles ayant recours aux services à domicile sont plutôt désignées comme des clients ou bénéficiaires. Pour éviter toute confusion, nous utiliserons de manière équivalente ces termes, même si nous privilégierons "patient" dans les chapitres théoriques (chapitres 3, 4 et 5), et "bénéficiaire" dans le chapitre d'application (chapitre 6). Nous parlerons "d'intervenants" pour désigner le personnel des structures et ne ferons pas de distinction entre les notions de "soins", "services" et "visites".

Chapitre 2

État de l'art

Sommaire

2.1	Introduction	24
2.2	Introduction aux problèmes de tournées de véhicules	25
2.2.1	Problèmes de tournées de véhicules	25
2.3	Les problèmes de tournées de soins et services à domicile	26
2.3.1	Critères d'optimisation	27
2.3.2	Contraintes	30
2.3.3	Approches de résolution	34
2.3.4	Cas d'études et outils d'aide à la décision	36
2.4	Réoptimisation, aspects dynamiques et incertitudes	37
2.4.1	Motivation	38
2.4.2	Différents types d'incertitudes/perturbations considérées	38
2.4.3	Approches	40
2.4.4	Modélisation	41
2.4.5	Objectifs	42
2.4.6	Discussion sur les incertitudes	42
2.5	Positionnement de nos travaux	43

Ce chapitre propose une revue de littérature détaillée des problèmes de planification dans le secteur des soins et services à domicile. Nous y introduisons également des méthodes de recherche opérationnelle classiquement utilisées dans le domaine.

Durant cette thèse, nous avons réalisé un travail de recherche bibliographique et analysé l'ensemble des articles portant sur la planification de tournées de soins et de services dont nous avons connaissance jusqu'en mai 2019. Cette étude a donné lieu à la rédaction d'un article que nous avons soumis à une revue internationale [76]. Nous complétons cette analyse avec des références plus récentes.

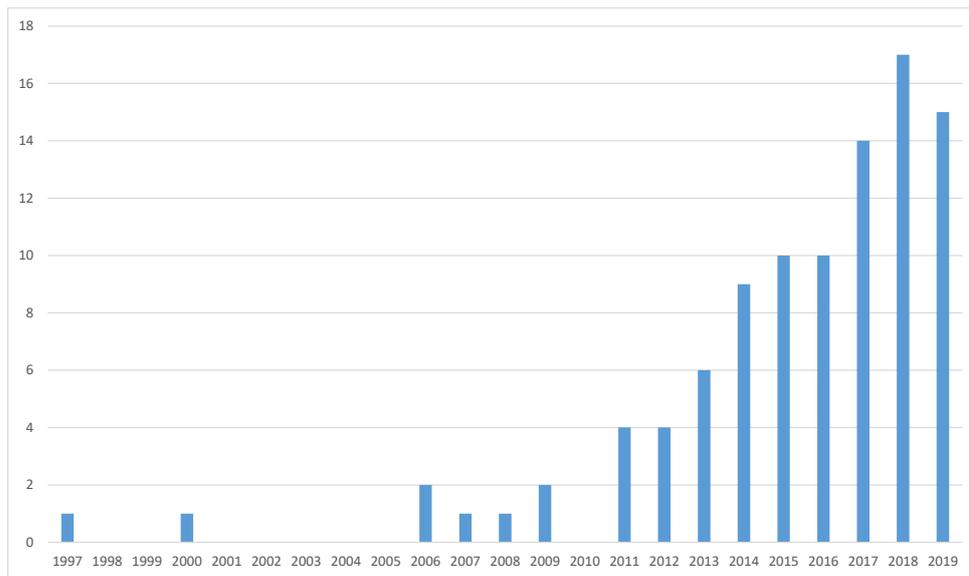


FIGURE 2.1 – Nombre de publications portant sur des problèmes de tournées de soins en revue scientifique internationale jusqu'en mai 2019

2.1 Introduction

Face à la demande croissante de soins [206], le secteur du soin et service à domicile est en pleine expansion et la planification des soins et services fait l'objet de nombreux travaux de recherche. À notre connaissance, l'intérêt de la communauté scientifique pour ce type de problèmes est apparu à la fin des années 1990 [23] et n'a cessé de se développer dans les décennies suivantes. Depuis quelques années, on assiste à une explosion du nombre de recherches académiques et donc de publications en revue scientifique dans le domaine du HHC, notamment en ce qui concerne les problèmes de planification de tournées (cf Fig 2.1).

La planification des tournées de soins, qui consiste à programmer des interventions, affecter des intervenants et créer des tournées, est étudiée dans la littérature sous de nombreuses variantes. Souvent rencontrée sous la dénomination *Home Health Care Routing and Scheduling Problem (HHCRSP)*, il s'agit d'une variante d'un autre problème bien connu de la recherche opérationnelle : le *VRP*. Ce dernier est l'un des sujets les plus étudiés dans le domaine de la recherche opérationnelle et compte des applications dans de nombreux domaines autres que celui de la santé. Les variantes du *VRP* sont ainsi extrêmement nombreuses, et toutes ne sont pas pertinentes dans le cadre de cette thèse. La plupart des contraintes et méthodes utilisées trouvent toutefois leur équivalent dans le *HHCRSP*. Pour cette raison, nous choisissons dans ce chapitre de restreindre notre

état de l'art au domaine du soin et service à domicile. Dans les chapitres où cela nous semble nécessaire, nous rappellerons toutefois des éléments bibliographiques additionnels de la littérature du [VRP](#) et discuterons du positionnement de nos recherches par rapport à ces travaux.

Ce chapitre a donc pour objectif de donner une vision académique de l'organisation des soins et services à domicile en présentant une revue de littérature détaillée des problèmes de planification dans le secteur des soins et services à domicile.

Durant cette thèse, nous avons mené un travail de recherche bibliographique sur la littérature dédiée aux problèmes de planification de tournées dans le soin et service à domicile. Nous avons classifié l'ensemble des articles dont nous avons connaissance jusqu'en mai 2019 selon les critères d'optimisation étudiés, les contraintes prises en compte et les méthodes de résolution mises en œuvre. Nous présentons une synthèse de cette recherche dans les tables en annexe [A](#). Depuis, nous avons fait une nouvelle recherche pour inclure des travaux plus récents dans notre état de l'art. Nous dressons un panorama des problèmes traités dans la littérature et des approches de résolutions utilisées, que nous illustrons avec des articles qui nous paraissent représentatifs.

Tout d'abord, nous proposons une brève introduction aux problèmes classiques de tournées de véhicules en section [2.2](#). Ensuite, nous nous intéressons à l'application de ces problèmes dans le secteur des soins et des services à domicile en section [2.3](#). Nous nous intéressons tour à tour aux variantes du [HHCSP](#), en détaillant les différents critères d'optimisation étudiés, contraintes existantes et méthodes développées dans la littérature. Nous présentons également quelques cas d'étude. Dans la section [2.4](#), nous accordons ensuite un intérêt particulier aux problèmes prenant en compte les incertitudes ou aspects dynamiques. Enfin, nous concluons en positionnant les travaux présentés dans cette thèse par rapport à la recherche existante (section [2.5](#)).

2.2 Introduction aux problèmes de tournées de véhicules

Les problèmes de planification de tournées sont nombreux, et trouvent leur place dans divers domaines autres que celui de la santé. Il nous apparaît donc important de se situer dans un contexte plus global et de commencer cet état de l'art en introduisant quelques références de base concernant des problèmes de recherche opérationnelle dont sont issus les problèmes de planification de soins. Les différentes variantes et méthodes seront abordées dans le contexte du [HHC](#) dans la suite du chapitre.

2.2.1 Problèmes de tournées de véhicules

Le problème de tournée de véhicules, plus communément appelé [VRP](#), consiste à établir un routage optimal d'une flotte de véhicules afin de desservir un ensemble de clients. Il a été introduit par Dantzig Ramser [[57](#)] il y a 60 ans, et est devenu depuis l'un

des problèmes les plus étudiés de la recherche opérationnelle, certainement de par l'existence de nombreuses variantes et de leurs applications pratiques, mais également de par sa complexité : en 1981, Lenstra et Kan [152] prouvent que le problème est NP-difficile, ainsi que la plupart de ses extensions.

De nombreux états de l'art ont été réalisés, le lecteur pourra notamment se référer à [35] ou [80].

Dans le chapitre 3, nous présentons quelques variantes classiques du **VRP** et leur traduction dans le cadre du **HHC**. Dans les chapitres 4 et 5, nous introduisons les méthodes et modèles du **VRP** qui sont en lien avec les méthodes et modèles que nous utilisons.

Problème du voyageur de commerce

Le **VRP** lui-même est issu d'un problème combinatoire plus ancien : le problème du voyageur de commerce (ou **Traveling Salesman Problem (TSP)**), dont Dantzig et al. [56] proposent la première formulation mathématique en 1954, mais qui apparaît dès le XIX^e siècle dans les travaux de Sir William Rowan Hamilton. Étant donné un ensemble de villes et les distances entre chaque paire, il s'agit de déterminer un chemin visitant toutes les villes et retournant à son point de départ de telle sorte que la distance totale parcourue soit minimisée [58]. Le lecteur pourra se référer à [123] et [150] pour un aperçu détaillé des formulations et méthodes existantes.

L'une des variations du **TSP** est le **multi-Traveling Salesman Problem (mTSP)**, dans lequel il faut construire un ensemble de chemins visitant les villes et retournant à un même point de départ [193]. Bektas [24] propose un état de l'art du **mTSP** et de ses différentes applications dans la vie réelle ; et montre comment étendre le problème à des problèmes de tournées de véhicules. S'il caractérise le **mTSP** comme un **VRP** sans contrainte de capacité, il n'y a pas de consensus sur cette distinction, qui n'est d'ailleurs pas systématique dans la littérature.

2.3 Les problèmes de tournées de soins et services à domicile

Dans cette section, nous dressons un portrait des grandes tendances de recherche liées aux problèmes de planification des tournées de soins et de services à domicile. Nous ne cherchons pas à être exhaustifs, mais seulement à donner une vision globale de la recherche existante, pour mieux caractériser nos contributions en section 2.5.

Pour ce faire, nous catégorisons les articles de la littérature selon les critères d'optimisation étudiés, les contraintes prises en compte et les stratégies de résolution.

Afin de compléter l'état de l'art présenté dans ce chapitre, nous recommandons les récentes revues de littérature proposées par Di Mascolo et al. [74] Cissé et al. [52], Fikar et Hirsch [101] et Grieco et al. [120].

2.3.1 Critères d'optimisation

De nombreuses variantes du problème de tournées de soins et de services à domicile existent, et donc de nombreux critères d'optimisation ont été étudiés dans la littérature. Nous pouvons les diviser en deux catégories : la minimisation des coûts, ou la maximisation de la satisfaction d'un ou plusieurs acteurs du problème.

Minimisation des coûts

La minimisation des coûts liés au routage est l'objectif le plus courant dans la littérature : classiquement, il s'agit de minimiser les temps de trajet et/ou les distances [10, 23, 223]. On trouve aussi des objectifs liés aux coûts engendrés par le trajet avec par exemple le remboursement selon la législation des kilomètres parcourus [18].

D'autres types de coûts sont également considérés, notamment en ce qui concerne le temps de travail des intervenants. Cela peut se traduire par la minimisation des heures supplémentaires [177] ou la minimisation du nombre d'intervenants nécessaires pour fournir les services [161].

Dans [121], les auteurs cherchent eux aussi à réduire les coûts liés au personnel. Comme ils considèrent que les bénéfices de la structure sont déterminés par le nombre et le type de services fournis et que les trajets doivent être défrayés par l'employeur, cela revient à réduire les trajets (pour diminuer les compensations financières) et minimiser les temps d'attente (pour pouvoir fournir plus de services sur un même intervalle de temps). Ces deux objectifs sont simultanément traités en minimisant la longueur des tournées puisque les temps de service sont fixes.

Maximisation de la satisfaction des acteurs

Ce critère est aussi largement étudié dans la littérature et peut lui-même être divisé en deux sous-catégories, à savoir la satisfaction des patients ou la satisfaction des intervenants.

Satisfaction des patients

La satisfaction des patients est modélisée de nombreuses manières. Nous en listons les principales :

- Minimisation des services non-couverts, ou maximisation du nombre de visites [68, 126].

- Minimisation des violations des fenêtres de temps [30]. Lorsque les visites doivent être effectuées dans un intervalle de temps précis, les fenêtres de temps sont parfois souples et leur violation est possible, sous réserve de pénalités dans la fonction objectif. De manière similaire, dans [87] et [227], certains patients expriment des préférences quant à l'horaire de visite, que les auteurs essaient de satisfaire au maximum.
- Maximisation de la continuité de soins. En tant qu'objectif, cela revient généralement à affecter un intervenant préférentiel [228], ou minimiser le nombre d'intervenants pour un même patient [168, 230]. Ce critère, bien que primordial en pratique, n'est finalement que peu étudié dans la littérature et représente un réel verrou scientifique.

Satisfaction des intervenants

En ce qui concerne la satisfaction des intervenants, le critère majoritairement étudié est l'équilibrage des charges de travail. Cappanera et Scutellà [37] définissent un *facteur d'utilisation de l'opérateur* qui correspond au ratio entre la charge totale affectée à l'opérateur et sa charge maximale possible. Il s'agit ensuite de maximiser le minimum des facteurs associés aux opérateurs.

Decerle et al. [66] étudient l'impact de différentes définitions de la notion de *charge de travail* sur les tournées générées. Ils discernent trois activités dans une tournée de soins : le temps de trajet, le temps d'attente, et le temps passé auprès des patients. La plupart du temps, l'ensemble de ces trois activités constitue la charge de travail mais parfois, seuls les temps de service sont considérés [36]. La définition choisie pour l'équilibrage a un réel impact sur la satisfaction des intervenants puisque la rémunération de ces temps n'est pas la même, et chacune de ces activités n'est pas ressentie de la même manière.

Dans [198], la satisfaction des intervenants passe par la minimisation du travail surqualifié.

Dans [228], l'insatisfaction des intervenants est calculée selon différents critères qu'il convient de minimiser : le travail surqualifié, le travail en dehors des horaires préférentiels, les heures supplémentaires, et la longueur des premiers et derniers trajets d'une journée (non rémunérés).

Autres critères

Quelques travaux considèrent également l'efficacité du clustering, c'est-à-dire la minimisation des affectations hors des zones de référence des intervenants [179], ou tentent de réduire le nombre de clusters [192].

Des considérations environnementales sont prises en compte dans [96] et [97], où les émissions polluantes sont minimisées.

Considérations multi-objectif

Étant donné que la plupart des travaux modélisent le problème comme une variante du VRP, c'est l'objectif classique du VRP qui est le plus souvent étudié, à savoir la minimisation des temps de trajet. Toutefois, de par la dimension humaine du problème, de nombreux articles considèrent également d'autres objectifs et s'intéressent donc à des problèmes multi-objectif.

La plupart du temps, l'optimisation multi-objectif est gérée par agrégation et pondération des critères. Dans [228], six critères représentatifs de la satisfaction des patients et des intervenants sont considérés. Charge au décideur de choisir les poids attribués à chaque critère.

Dans [245], la satisfaction des patients et la satisfaction des intervenants sont agrégées dans la fonction objectif. Ces deux composants sont eux-mêmes modélisés comme l'agrégation de plusieurs critères : le respect des horaires de travail et l'équilibrage de charge pour la satisfaction des intervenants, et le respect des fenêtres de temps et du délai entre deux services successifs pour les patients.

À notre connaissance, les articles n'utilisant pas une méthode d'agrégation pour ce problème datent tous d'après 2015. Dans [205], une approximation du front de Pareto est proposée pour minimiser les temps de trajet tout en maximisant la charge de travail du personnel. Maya Duque et al. [172] adoptent une approche hiérarchique. La qualité de service est maximisée dans une première phase, puis les distances sont minimisées dans une seconde phase autorisant des dégradations mineures du premier objectif. Braekers et al. [34] ont utilisé une méthode ϵ -contrainte pour étudier un compromis entre minimisation des temps de trajets et maximisation des préférences des patients. Plus récemment, Decerle et al. [64] utilisent un algorithme mémétique et calculent le front de Pareto pour optimiser trois objectifs : la minimisation du temps de travail total, la maximisation de la qualité de service, et l'équilibrage du temps de travail.

Discussion sur les critères d'optimisation

Notons que certains objectifs peuvent concourir à plusieurs des catégories que nous avons évoquées. Prenons l'exemple des trajets d'une tournée : ils peuvent représenter un coût budgétaire, un critère de satisfaction pour les intervenants, ou encore un enjeu environnemental. Selon le point de vue adopté par les auteurs, un même critère peut être interprété de différentes manières. Dans cette section et plus largement dans le chapitre, nous avons tenté de rester fidèles aux interprétations des auteurs dans nos classifications, même si les limites sont parfois floues.

Nous constatons une évolution des critères étudiés selon les années. Le critère majoritairement étudié reste le même au cours des ans, à savoir la minimisation des temps de trajets/coûts/distances ; mais on observe une plus grande diversité depuis 2017 où la satisfaction des patients est de plus en plus prise en compte. L'étude de la satisfaction des intervenants reste marginale, tout du moins dans les problèmes mono-objectif. En

complément de cette section, le lecteur pourra se référer aux tables A.7, A.8 et A.9 en annexe.

2.3.2 Contraintes

Dans cette section, nous présentons les différents types de contraintes étudiées dans la littérature. Notons qu'ici aussi, certaines contraintes peuvent être intégrées dans plusieurs catégories selon le point de vue des auteurs.

Contraintes liées aux nombres de visites

Dans le domaine du **HHC**, les plannings peuvent être établis à court-terme (un jour ou moins), ou à long terme (souvent une semaine, parfois un mois ou plus).

Pour les plannings établis sur une seule période, on considère implicitement que chaque patient ne requiert qu'une seule visite, mais il est parfois spécifié que les patients peuvent recevoir plusieurs visites dans la journée, comme dans [164]. Dans [125], si un patient requiert plusieurs services dans la même journée, alors il est virtuellement considéré comme plusieurs patients, chacun requérant une seule visite.

Pour des plannings établis sur plusieurs périodes, les patients peuvent recevoir plusieurs visites au cours de l'horizon, et cette multiplicité amène de nouvelles contraintes. Dans [172], à l'admission d'un nouveau patient dans la structure, sont définies une fréquence (nombre de visites par semaine), et une périodicité (hebdomadaire ou quinzomadaire). Les patients peuvent recevoir entre une et cinq interventions par semaine. Pour les patients nécessitant plus d'une visite par semaine, les services sont planifiés de préférence sur des jours distincts et non-successifs.

Les jours des visites ne sont pas forcément imposés par les patients : plusieurs articles considèrent des fréquences de visites [126, 175], ce qui permet d'établir des patterns lorsque l'horizon couvre de nombreuses périodes [38, 39, 235].

Dans [211], lorsqu'un patient requiert moins d'un service par jour, le nombre de jours entre deux visites est minimisé.

Enfin, on trouve des continuités temporelles. Dans [173], le planning est établi sur un horizon de plusieurs jours, au cours desquels les interventions chez un même patient doivent être programmées à la même heure. On retrouve cette contrainte dans [118, 172], où les jours d'interventions (non fixes) doivent aussi être les mêmes au cours d'un horizon de plusieurs semaines.

Contraintes temporelles

Comme pour le **VRP**, une des variantes classiques du **HHCRSP** consiste à imposer des fenêtres de temps durant lesquelles les interventions doivent être réalisées. La fenêtre

peut être stricte, auquel cas les horaires doivent être systématiquement respectés, ou bien souple [67], auquel cas il est possible de violer cette contrainte, en général sous réserve de pénalités qui sont minimisées ensuite dans l'objectif (cf sous-section 2.3.1). Dans [228], le problème utilise les deux types de fenêtres pour chaque patient. Les fenêtres strictes, plus larges que les fenêtres souples permettent de limiter la violation éventuelle de ces dernières.

Les horaires d'interventions peuvent également être fixes [169], ou encore être choisis parmi un ensemble d'horaires possibles [68]. Dans [99], les patients expriment des horaires préférentiels.

Nous trouvons également des contraintes de dépendances entre les services. Ces dépendances peuvent être des disjonctions, ce qui signifie que deux visites chez un même patient ne peuvent se chevaucher dans le temps [155].

Les contraintes de synchronisation imposent au contraire que plusieurs interventions soient réalisées au même moment chez un même patient [36, 107]. Par exemple, les personnes en fort surpoids nécessitent plusieurs intervenants pour certains types de service, notamment pour ce qui relève de l'aide au lever et au coucher.

Enfin, les contraintes de précédence régulent les cas où plusieurs visites doivent se succéder dans un certain ordre chez un même patient. Typiquement, si un patient doit bénéficier d'une aide à la toilette et d'un changement de pansement, les deux interventions peuvent être réalisées par deux personnes différentes mais toujours dans cet ordre. Les contraintes de précédence exacte imposent que les horaires des visites s'enchaînent sans pause [141] ; les contraintes de précédence minimale établissent une durée minimale à respecter entre les visites [196] ; à l'inverse des contraintes de précédence maximale qui fixent une durée à ne pas dépasser entre les visites [5].

Ces contraintes augmentent fortement la complexité des problèmes étudiés puisqu'il est alors impossible de construire des tournées de manière indépendante.

Contraintes humaines

Les relations humaines entre patients et intervenants jouent un rôle majeur dans les affectations de services. Au fur et à mesure des visites, une relation de confiance s'installe et amène parfois les patients à exprimer des affinités avec des intervenants [86], ou même à désigner un intervenant préféré [34].

Dans [72], les patients peuvent exprimer une préférence quant au genre de l'intervenant affecté. Dans le cas des aides à l'hygiène, il n'est en effet pas rare que les patients désirent être aidés par une personne de même sexe.

Au contraire, des incompatibilités peuvent se dessiner entre un patient et un intervenant pour de nombreuses raisons telles que des caractères incompatibles ou des allergies à des animaux domestiques. Alors, de telles affectations doivent être évitées [48].

Comme définie précédemment, la continuité de soins consiste à affecter le même in-

tervenant ou un nombre réduit d'intervenants, à un patient nécessitant plusieurs visites au cours de l'horizon de temps.

L'article [207] examine la relation entre la continuité de soins dans le service à domicile et trois des issues possibles pour un patient : l'hospitalisation, la nécessité émergente de soins, et l'amélioration dans les activités de la vie quotidienne. Au travers de cette expérimentation menée sur près de 60 000 personnes bénéficiant de soins à domicile, il est montré qu'augmenter la continuité de soins réduit la probabilité d'hospitalisation et de nouveaux besoins, et améliore la probabilité d'amélioration dans les tâches de la vie quotidienne ou de sortie de structure. Même si ces conclusions sont nuancées par le fait que d'autres facteurs aient pu intervenir aussi dans les évolutions des états de santé de la population considérée (comme l'âge en particulier), cela montre bien que la continuité revêt un intérêt majeur dans la planification des soins et services à domicile. Toutefois, il semble qu'il n'y ait pas de réel consensus sur la définition de la continuité de soins et sur les manières de la mesurer [210].

Il s'agit parfois de n'affecter qu'un seul et même intervenant à un même patient au cours de l'horizon [118], ou alors de limiter le nombre d'intervenants différents par patient [156]. Dans [42], les patients sont divisés en trois catégories. Les premiers reçoivent une continuité stricte, c'est-à-dire qu'ils ne sont visités que par un seul intervenant ; les deuxièmes ont une continuité partielle, c'est-à-dire qu'ils sont tant que possible visités par un seul intervenant qui peut toutefois être changé si nécessaire ; les derniers n'ont pas de continuité puisque n'importe quel intervenant peut leur être affecté.

À l'inverse, les auteurs de [117] introduisent des nouvelles contraintes de non-loyauté. Pour une planification sur plusieurs semaines, les contraintes usuelles de continuité de soins doivent être appliquées au cours d'une même semaine, mais une rotation des intervenants est imposée entre deux semaines consécutives. Le but de cette rotation est de prévenir l'apparition de conflits entre patients et intervenants, et de prévenir les blessures squeletto-musculaires puisque certains actes nécessitent des efforts physiques importants.

Afin d'assurer une certaine équité entre les intervenants, les contraintes d'équilibrage de charge sont assez courantes dans les travaux de la littérature. Souvent traitées comme contraintes souples, et donc passées en objectif (cf sous-section 2.3.1), il s'agit de minimiser les écarts de charge horaire entre les intervenants. Gayraud et al. [111] proposent une autre interprétation de la charge de travail, liée à la pénibilité des services à fournir. Ainsi, les patients à forte dépendance qui exigent en général des actes plus lourds sont répartis sur les tournées de tous les intervenants.

Contraintes légales

Les soins et services dispensés dans le domaine du HHC sont divers et variés : cela va de l'aide ménagère aux soins infirmiers, en passant par de l'aide à l'hygiène, de la garde active, etc. Le personnel des structures de HHC est composé de différents corps de métier dont on peut citer les infirmières, les aides à domicile, les aides-soignantes, les aides ménagères... Tous ces profils requièrent différentes qualifications. Lorsque le

personnel est hétérogène, une contrainte classique de la littérature consiste à garantir que les intervenants aient la qualification nécessaire pour effectuer la visite. Dans [153], les tâches possibles sont réparties en trois niveaux de qualification hiérarchisés. Chaque intervenant peut réaliser toutes les tâches requérant un niveau de qualification inférieur ou égal à ses compétences. À l'inverse, le travail surqualifié est parfois interdit ou réglementé, car il est source d'insatisfaction pour le personnel : dans [100], les rétrogradations sont permises mais limitées. Dans [111], la durée des visites dépend du niveau de compétence de l'intervenant.

De manière générale, les contraintes de qualification sont extrêmement étudiées dans la littérature.

Les structures de soin et service à domicile doivent bien entendu respecter les conventions collectives dont elles dépendent [151]. De nombreuses contraintes légales inspirées des différentes législations sont donc prises en compte dans l'élaboration des plannings : les durées de travail sont limitées, des jours de repos et des pauses quotidiennes doivent être accordés, etc.

Lors du recrutement, un contrat est établi avec chaque salarié, dans lequel un volume horaire contractuel est décidé, et qu'il ne faut pas excéder pendant l'horizon. Cheng et Rich [50] distinguent par exemple des infirmières employées à temps plein et d'autres à temps partiel.

Dans [71], si les intervenants ne sont pas en jour de repos, leur charge de travail journalière doit être comprise entre une borne inférieure et une borne supérieure ; ils ne peuvent travailler plus d'un certain nombre de jours consécutifs ; et tout comme les patients, ils ne sont disponibles que durant une fenêtre de temps qui leur est spécifique. Les heures supplémentaires sont autorisées mais sont toutefois pénalisées dans la fonction objectif.

Dans [230], chaque infirmière dispose d'un volume contractuel total qui peut être dépassé dans l'horizon de planification s'il est ensuite compensé dans l'horizon de planification suivant. Il est ainsi toléré de dépasser la charge de travail initiale dans une certaine limite. Le nombre d'heures de repos entre deux journées consécutives et la durée d'une journée de travail doivent respecter les contraintes légales.

Dans [127], les intervenants doivent prendre part à d'autres activités telles que des tâches administratives ou réunions qui sont intégrées au planning.

Contraintes de routage

La plupart du temps, les intervenants se déplacent avec leur véhicule personnel. Il arrive toutefois que d'autres modes de transport soient envisagés tels que les véhicules partagés [102], les déplacements à pied [100], ou les transports en commun [222]. Récemment, des modes de transports "verts" sont considérés. Dans [221], les infirmières

peuvent se déplacer à vélo électrique. Dans [88], les déplacements sont réalisés en véhicule électrique : il faut alors intégrer une stratégie de charge des véhicules au problème de planification.

La multi-modalité représente un réel enjeu pour la planification en milieu urbain, mais est pourtant peu étudiée dans la littérature. Considérer plusieurs moyens de transport complexifie le problème en apportant de nouvelles contraintes : horaires (transports en commun), synchronisations des visites (véhicules partagés), temps de trajets différents (multi-modalité), temps maximal par trajet (déplacements à pied), etc.

Autres

Les structures de HHC desservant des territoires parfois très étendus, ils sont souvent divisés en secteurs sur lesquels les intervenants sont affectés [42]. Dans [27], les districts peuvent se chevaucher et ne peuvent donc pas être traités séparément. Notons que l'utilisation de secteurs indépendants permet de simplifier le problème et de nombreux travaux de la littérature se consacrent d'ailleurs au problème de sectorisation pour le soin à domicile [31, 238].

Discussion sur les contraintes

Nous observons que la plupart des problèmes étudient des contraintes classiques du VRP comme les fenêtres de temps, les dépendances temporelles ou les contraintes de qualification. Dans les cas d'étude, nous trouvons plus souvent des contraintes légales, ou des contraintes de continuité de soin qui reçoivent un intérêt croissant depuis 2017. Les tables A.10 à A.18 en annexe apportent une classification détaillée des articles parus avant mai 2019.

2.3.3 Approches de résolution

Dans cette section, nous présentons un aperçu non-exhaustif des méthodes utilisées dans la littérature pour résoudre les problèmes de planification de tournées de soins.

Méthodes exactes

Comme souvent dans les problèmes de recherche opérationnelle, une des premières méthodes mise en œuvre est la programmation mathématique. Cheng et Rich [50] proposent la toute première formulation pour le HHCRSP, mais bien d'autres articles plus récents proposent eux aussi de nouvelles formulations pour traiter des contraintes supplémentaires : synchronisation de visites [36], arrivée et départ de patients [117], etc. Des solveurs linéaires sont généralement utilisés pour résoudre les MILP mais leur efficacité reste limitée aux instances de petite taille.

On trouve de nombreuses autres méthodes, dont l'efficacité a déjà été démontrée pour les problèmes de VRP. Les plus courantes sont les méthodes arborescentes.

Bard et al. [17] ont proposé un branch-and-price-and-cut pour résoudre le problème de routage de thérapeutes (autre dénomination du **HHCRSP**) avec de nombreuses contraintes légales (pause déjeuner, heures supplémentaires, etc.) et horaires fixes sur un horizon de cinq jours. Ils résolvent de petites instances composées de 5 thérapeutes et 162 services en 50 minutes au plus.

Trautsamwieser et Hirsch [229] résolvent un problème de planification hebdomadaire avec fenêtre de temps. Une recherche à voisinage variable est utilisée pour déterminer une borne supérieure, ensuite utilisée dans une procédure de branch-and-price-and-cut. Ils trouvent les solutions optimales pour des instances jusqu'à 9 infirmières et 45 clients.

Plus récemment, Liu et al. [159] proposent un algorithme de branch-and-price pour lequel les colonnes sont générées grâce à une heuristique de descente à voisinage variable ou un algorithme d'étiquetage. Ils trouvent des solutions pour des instances constituées de 9 intervenants et 50 patients, avec des gaps relatifs allant jusqu'à 17 %.

Enfin, d'autres approches comme la programmation dynamique sont plus rarement utilisées [153].

Méthodes approchées

Les méthodes exactes permettent de trouver la solution optimale du problème étudié. Toutefois, le **HHCRSP** étant une variante du **VRP**, c'est un problème NP-difficile. Les méthodes exactes, de complexité exponentielle, ne peuvent résoudre que des problèmes de taille limitée. On trouve donc dans la littérature de nombreuses alternatives sous la forme de méthodes heuristiques, ou de méta-heuristiques. La qualité des solutions n'est pas toujours garantie, mais les instances traitées sont en général bien plus grandes que celles résolues par les méthodes exactes (cf Tables A.3, A.4, A.6).

Ainsi, en plus de leur méthode exacte, Bard et al. [17], ont également développé une heuristique à horizon glissant qui propose des solutions de bonne qualité en quelques secondes pour les instances résolues par le branch-and-price-and-cut, et qui trouve des solutions pour des instances de plus grande taille (jusqu'à 20 thérapeutes et 650 visites) en moins de 10 minutes.

Lieder et al. [153] proposent eux aussi une version heuristique de leur approche exacte de programmation dynamique, grâce à laquelle ils arrivent à résoudre à l'optimal 95% de leurs instances (5 intervenants, 42 visites) en quelques minutes pour les plus grandes instances.

Globalement, on retrouve toutes les méthodes heuristiques classiques pour les problèmes de tournées de véhicules : des algorithmes gloutons [16, 83]; des procédures de recherche locale [78, 85, 119]; des heuristiques dédiées [95, 129].

Les méta-heuristiques, qui ont l'avantage de s'appliquer à tous types de problèmes d'optimisation, sont évidemment très étudiées également dans la littérature du **HH-CRSP**. Là encore, la variété de méthodes utilisées est telle que nous n'en dressons qu'un bref aperçu. Nous retrouvons des recherches taboues [48, 198]; des algorithmes de recuit simulé (SA) [30]; des recherches à voisinage variable (VNS) [106, 141, 181].

Les algorithmes évolutionnaires sont très populaires dans le domaine. Nous pouvons entre autres citer [133] et [218] qui proposent un algorithme génétique ou [7] et [224] qui développent une méthode d'optimisation par essais particuliers (PSO). Nous remarquons un intérêt croissant pour les adaptations des algorithmes de colonies de fourmis (ACO) depuis 2018 [63, 93, 132, 166, 246].

Enfin, notons aussi le recours aux approches de résolution en plusieurs phases, qui s'adaptent particulièrement bien aux problèmes de "routing and scheduling", souvent décomposés en différentes étapes dans la littérature.

Fikar et Hirsch [100] identifient dans un premier temps les tours potentiels, puis optimisent le système de transport complet. Grenouilleau et al. [119] suggèrent de créer des routes avec une recherche à voisinage large (LNS), puis de sélectionner les routes avec une heuristique constructive et un modèle de partitionnement d'ensemble.

Dans [134], la première phase consiste à résoudre un problème d'affectation en utilisant un algorithme d'ordonnancement, puis le routage est optimisé pour chacune des infirmières.

2.3.4 Cas d'études et outils d'aide à la décision

Le **HHCRSP** est un problème très populaire actuellement dans la recherche académique, mais aussi pour les professionnels de santé. En effet, de nombreux travaux de recherche se basent sur des cas réels et testent leurs méthodes sur des données réelles fournies par des hôpitaux, des centres de HAD ou encore des structures de soin et service à domicile.

Dans [117], deux cas d'étude sont étudiés : une paroisse catholique et une organisation à but non-lucratif qui font de la préparation de repas, de l'aide à domicile, et organisent des transports jusqu'à des centres de soins.

Les expérimentations de [192] sont menées sur les données fournies par une entreprise desservant 9635 patients à Madrid; celles de [236] sur les données d'une structure de soins à domicile italienne.

La plupart de ces articles étudient des problèmes inspirés de cas réels et testent leurs approches sur des instances basées sur des données réelles, mais ne fournissent pas des solutions applicables en pratique car certaines contraintes n'ont pas été intégrées ou des données manquantes ont été générées. Nous relevons tout de même quelques travaux de la littérature menés en collaboration directe avec des partenaires industriels et ayant abouti à la réalisation de prototypes voire même de logiciels aujourd'hui déployés et

utilisés sur le terrain.

Begur et al. [23] proposent le premier système d'aide à la décision pour la planification d'infirmières. Un système d'information géographique (GIS) permettant à l'utilisateur d'interpréter visuellement la tournée est intégré à un module d'optimisation pour la partie routage et planification, développé à partir d'une approche basée sur l'algorithme de Clarke and Wright [53].

Everborn et al. [94] s'intéressent au système de santé à domicile mis en place en Suède. Le logiciel LAPS CARE permet de planifier des tournées de soins en prenant en compte des contraintes légales, mais aussi les préférences des patients. L'algorithme d'optimisation génère parfois des routes qui ne satisfont pas toutes les contraintes, mais qui peuvent facilement être modifiées par les utilisateurs. L'outil a ainsi pour vocation de faciliter la tâche de planification, notamment pour accélérer la prise de décision lorsqu'une perturbation de dernière minute impose de re-router rapidement les tournées. Le logiciel est déployé dans plusieurs unités de soins en Suède.

Dans [172], le cas particulier d'une organisation de soins à domicile en Belgique est étudié. Contrairement aux autres systèmes d'aides à la décision dont nous avons connaissance dans ce domaine, les plannings sont construits sur des horizons longs (plusieurs semaines). Cela permet d'assurer une continuité dans les horaires des soins tout au long de l'horizon, mais les absences d'intervenants doivent être gérées manuellement en dehors de l'outil développé. L'aire étudiée est divisée en 44 régions traitées indépendamment les unes des autres, et les expérimentations sont menées sur 6 d'entre elles.

Plus récemment, Kandakoglu et al. [138] proposent un outil de planification pour assister le service de néphrologie de l'hôpital d'Ottawa dans le développement de la dialyse à domicile. De nombreuses contraintes légales (pauses déjeuner, heures supplémentaires, compétences) sont prises en compte dans la formulation mathématique qui permet de créer les itinéraires quotidiens des infirmières. Le modèle a été validé par des tests menés sur des instances réelles de 9 intervenants et une cinquantaine de patients.

Notons que d'autres systèmes d'aide à la décision ont été développés pour des problèmes annexes tels que l'affectation du personnel soignant [147], ou de districting [28, 31].

2.4 Réoptimisation, aspects dynamiques et incertitudes

Dans cette section, nous portons un intérêt particulier aux études prenant en compte la gestion des incertitudes, ou considérant les aspects dynamiques du problème.

2.4.1 Motivation

Dans la majorité des articles mentionnés précédemment, tous les paramètres sont supposés connus à l'avance, que ce soient les temps de trajet, les temps de service, les disponibilités des patients et intervenants, etc. Cependant, en pratique, il est peu probable d'exécuter le planning prévu tout au long de l'horizon sans rencontrer une quelconque perturbation. Dans le secteur du soin et service à domicile, les données sont sujettes à une forte variabilité due aux incertitudes inhérentes au domaine, qui conduisent souvent le planning initial à être infaisable. Puisque le facteur humain est prédominant, certaines contraintes rendent impossible l'annulation des tournées impactées, ou bien la re-création complète du planning à chaque événement perturbateur. Il apparaît donc évident que les problèmes déterministes ne sont pas toujours complètement adaptés pour modéliser les imprévus de la vie réelle.

De plus, les structures de soin et service à domicile font face à un roulement du personnel très important, ainsi qu'à de nombreux changements dans la composition de leur patientèle. Là encore, calculer les nouvelles tournées optimales à chaque changement sans tenir compte de l'historique n'est pas pertinent puisque cela ne satisfait pas les contraintes de continuité. On a alors affaire à des problèmes de replanification. Que ce soit sur un plan stratégique, tactique ou opérationnel, prendre en compte les aspects dynamiques, les perturbations et/ou les incertitudes est nécessaire pour proposer des solutions pratiques au problème de planification des tournées de soins.

L'intérêt porté aux incertitudes et/ou aléas semble assez récent puisque le premier article que nous avons recensé à ce sujet date de 2011 [27] et à notre connaissance, seule une douzaine de travaux envisagent ces aspects avant 2017. Depuis, de plus en plus d'articles s'intéressent à la gestion des aspects dynamiques et des perturbations des plannings. La table A.19 présentée en annexe A liste et catégorise des articles parus avant mai 2019 s'intéressant à ces aspects. L'analyse qui suit est complétée avec des références plus récentes.

2.4.2 Différents types d'incertitudes/perturbations considérées

Dans le domaine du soin à domicile, les incertitudes ou aléas ont différentes causes, et se manifestent via différents événements. Certaines perturbations émanent des patients, d'autres des intervenants, et les dernières sont inhérentes au domaine du HHC.

Aléas liés aux patients

Lorsque l'état d'un patient se dégrade, il peut requérir des changements dans la fréquence de ses visites [175], ou dans ses horaires de soins [154]. Il est également courant que les demandes ne soient pas exactement connues au moment de la planification [205]. Dans [239], les patients sont également susceptibles de changer leurs disponibilités et de

requérir de nouvelles interventions, ou au contraire d'en annuler.

Si ce sont parfois des annulations ponctuelles [122, 184], il arrive aussi que le patient quitte définitivement la structure parce que son état de santé requiert des soins plus lourds dans des structures médicalisées ou en hôpital [117].

Il faut également intégrer de nouveaux patients dans les plannings. Dans [27], les requêtes des patients ne sont pas connues en avance et arrivent durant l'exécution du planning. Alors s'ajoute au problème de planification la question de l'admission des patients. La requête d'un nouveau patient doit être acceptée et programmée dans les 24 heures suivant la demande.

L'admission de nouveaux patients est également considérée par [68], ou encore par [181] où sont distingués les patients existants, les patients en liste d'attente, et les nouveaux patients. À l'arrivée d'un nouveau patient, il faut donc décider de son admission, et le cas échéant de son intégration dans les plannings ou dans la liste d'attente.

Aléas liés au personnel

Le personnel est aussi source d'imprévus : lorsque les intervenants sont malades, ou changent leurs disponibilités à la dernière minute, leurs tournées sont impactées et cela a des répercussions sur le planning tout entier puisque les patients doivent quand même recevoir les soins requis. De manière générale, le secteur du soin et service à domicile est très exigeant et éreintant pour les intervenants si bien que les structures doivent faire face à un fort taux d'absentéisme.

Dans [233], les intervenants sont susceptibles d'annuler un service ou de changer leurs disponibilités en début de période. Le recrutement de nouveaux intervenants et leur intégration dans les tournées est parfois nécessaire pour pallier le départ du personnel et couvrir un maximum de visites [69, 182, 183]. Dans [183], il est possible de faire appel à des infirmières extérieures à la structure en cas de pénurie de personnel sous réserve de pénalités dans la fonction objectif.

Aléas inhérents au domaine

Les problèmes de routage sont soumis à des aléas concernant les temps de trajet : le trafic peut être plus ou moins dense [236], un véhicule peut tomber en panne [11], le stationnement peut causer des retards [215]...

Selon le type d'intervention effectuée, notamment si elle relève du domaine du soin à domicile, les durées de visite peuvent varier. De nombreux articles considèrent des incertitudes concernant le temps passé chez le patient : [42, 241, 243]. Le secteur de la santé amène également des urgences à intégrer en temps réel au planning [186] ou à traiter le plus rapidement possible [79].

Parmi tous les critères considérés, le plus étudié semble être les temps de service incertains. De nombreux articles s'intéressent aussi aux temps de trajet incertains, et aux changements de patientèle.

Le changement dans les fréquences de visite [175], ou les pannes de véhicule [11] sont des critères plus originaux qui, à notre connaissance, ne sont considérés chacun que dans un seul article.

2.4.3 Approches

Il y a de nombreuses manières d'appréhender les incertitudes ou aléas d'un planning : la robustesse, la flexibilité, l'optimisation stochastique, l'optimisation dynamique, la stabilité... Ces approches ne sont pas nécessairement incompatibles entre elles et n'offrent pas les mêmes possibilités au décisionnaire.

Une première stratégie consiste à prévoir les perturbations et à fournir une solution robuste, c'est-à-dire une solution qui reste réalisable malgré les imprévus. La robustesse d'une solution dépend du degré de conservatisme de la méthode de résolution. C'est le degré de risque que le décisionnaire accepte de prendre quant à la faisabilité de la solution en toutes circonstances.

Par exemple, Naji et al. [180] proposent une solution extrêmement conservatrice qui reste réalisable pour n'importe quel scénario envisagé. Dans [40] et [42], la faisabilité de la solution n'est garantie que pour des scénarios sous un certain seuil de perturbation. Dans [215], les solutions restent réalisables tant que les temps de service et de trajet varient dans des ensembles d'incertitudes prédéfinis.

L'optimisation stochastique permet d'intégrer les incertitudes au modèle déterministe en les modélisant sous la forme de variables aléatoires. Dans la plupart des articles traitant des problèmes stochastiques, les incertitudes portent sur les temps de trajets et de services [185, 244].

L'utilisation de paramètres flexibles donne aussi plus de possibilités lors de la création des tournées : dans [175], les temps de service et fréquences de visites peuvent être ajustés ; dans [181], le décisionnaire peut choisir de recruter des infirmières, et d'accepter ou non des nouveaux patients ; dans [199], il peut demander aux intervenants de revenir travailler pendant leur jour de repos.

Ces modèles rendent possible l'anticipation des perturbations, et sont donc principalement adoptés à un niveau stratégique ou tactique.

Afin de faire face aux imprévus sur un plan opérationnel, d'autres stratégies sont privilégiées. Elles peuvent être qualifiées de stratégies correctives : un planning initial est construit, et dès qu'un imprévu survient, ce planning initial est corrigé pour rester réalisable. Cette approche dynamique offre l'avantage de prendre en compte uniquement les aléas qui ont effectivement lieu et cela permet au planning initial de rester optimal tant que les perturbations n'interviennent pas. Toutefois, les corrections successives peuvent

parfois être particulièrement coûteuses et peu efficaces.

Dans [138], des infirmières flottantes permettent de remplacer au pied levé les infirmières absentes lorsque cela est possible. Sinon, les infirmières les plus proches sont détournées de leur tournée initiale.

Les problèmes dynamiques peuvent être traités avec des objectifs de stabilité, qui consistent à rester aussi proche que possible du planning initial : cela permet de garantir une continuité largement appréciée à la fois des patients et des intervenants. Dans [239], la stabilité est maximisée pour tous les acteurs du problème : les patients, le personnel, mais aussi la structure. Globalement, les horaires de début et fin de service ou les affectations patients-intervenants sont les critères de stabilité les plus étudiés.

Notons que les approches dynamiques offrent aussi des solutions pour des problèmes de replanification à plus long terme. Dans [117], Gomes et Rodrigues Pereira Ramos proposent une méthode pour construire un nouveau planning sur horizon long suite aux départs et arrivées de nouveaux patients.

2.4.4 Modélisation

Selon la stratégie choisie pour gérer les incertitudes et aléas, la variabilité des données apparaît soit dans les variables, soit dans le modèle, soit dans la méthode de résolution.

Dans les approches stochastiques, qui sont plutôt populaires dans la littérature, des variables aléatoires sont généralement utilisées pour exprimer les incertitudes. Les auteurs de [180] et [205] préfèrent utiliser un ensemble discret de scénarios.

Dans les cas robustes ou flexibles, on trouve des variables d'intervalle : par exemple dans [175], les temps de service sont modélisés comme des variables de décision avec une durée préférentielle (borne supérieure), et une durée minimale (borne inférieure). L'objectif est de rester aussi proche que possible de la borne supérieure, mais en s'autorisant des durées moindres si nécessaire.

Au contraire, dans [42] et [43], les temps de service sont caractérisés par leur valeur attendue (borne inférieure) et leur valeur maximale en cas d'imprévu (borne supérieure). Cette fois-ci, le but est d'avoir les durées les plus faibles possibles, tout en autorisant des durées plus longues si nécessaires.

Une méthode classique dans l'optimisation robuste réside dans les modèles à cardinalité contrainte. Cela permet au décideur de choisir quel degré de conservatisme il veut intégrer dans la solution. Par exemple, dans [40], le degré de conservatisme limite le nombre de demandes incertaines par tournée ; dans [42] et [43], le nombre de clients dont les durées de service ne sont pas celles initialement prévues est borné ; dans [183], le nombre d'infirmières absentes est limité. Les modèles à cardinalité contrainte garantissent des solutions réalisables tant que le degré de conservatisme est respecté.

Dans les cas dynamiques, le planning initial est bâti à partir d'une méthode déterministe, et est ensuite modifié pour répondre aux divers événements venant compromettre sa faisabilité. Ainsi, on trouve différentes options dans les méthodes de résolution : des heuristiques d'insertion [27], des simulations multi-agents avec actions de recours [164], des méthodes de réparation [233], et des approches basées sur des scénarios [69].

2.4.5 Objectifs

Dans la majorité des articles, la fonction objectif ne change pas de celle utilisée pour établir le planning initial. Les temps de trajet, temps d'attente, ou temps de travail sont minimisés ; les charges de travail sont équilibrées ; les différents coûts sont minimisés. Notons que ces fonctions objectif sont majoritairement utilisées dans les approches stochastiques ou robustes qui prennent en compte les incertitudes a priori.

Dans [43, 180] ou encore [215], la fonction objectif est minimisée dans le pire scénario/cas possible.

Il arrive enfin que la fonction objectif dépende des changements impliqués par les perturbations sur le planning initial. Ainsi, un objectif fréquent est la minimisation de la déviation du planning initial. La définition et le calcul de cette déviation diffèrent selon les articles : Nickel et al. [184] considèrent les changements dans les horaires de début des services, alors que Shi et al. [213] calculent les services retardés et les heures supplémentaires engagées. Dans [239], trois critères sont minimisés de manière conjointe : (1) les modifications des horaires de soin, (2) les modifications dans la longueur des tournées et la succession des patients, et (3) les coûts additionnels dûs aux pénalités, heures supplémentaires, etc. Les coûts induits par les modifications du planning sont pris en compte dans plusieurs articles : cela inclut les coûts de réaffectation, ou les coûts liés aux services retardés.

Dans [79], les auteurs s'intéressent à un problème différent où les patients peuvent demander un soin en urgence. Leur objectif est de minimiser le temps de réponse, c'est-à-dire de fournir le service aussi vite que possible après que la requête a été émise.

2.4.6 Discussion sur les incertitudes

L'intérêt pour les problèmes avec incertitudes ou aléas est relativement récent. De ce fait, nous manquons encore de recul sur l'évolution des critères étudiés au cours du temps. Toutefois on peut noter que la flexibilité n'a pas reçu autant d'attention que les problèmes robustes ou stochastiques.

Aussi, que ce soit dans le type de perturbations ou d'incertitudes considérées ou dans les fonctions objectif, le personnel n'est clairement pas l'acteur privilégié par les auteurs qui préfèrent assurer les intérêts économiques de la structure ou la satisfaction du patient.

La table A.19 fournit quelques éléments supplémentaires sur la prise en compte des perturbations et incertitudes dans la littérature.

2.5 Positionnement de nos travaux

Nous avons pu montrer dans ce chapitre que les problèmes de tournées de soins sont largement étudiés par la communauté scientifique, avec de nombreuses variantes du fait de la multitude de contraintes et objectifs existants.

Dans cette thèse, nous avons étudié un premier problème de planification de soins prenant en compte des contraintes légales, des contraintes de compatibilité, des fenêtres de temps, des intervenants soumis à différents contrats. Si ces contraintes sont toutes étudiées dans la littérature, elles le sont plus rarement de manière conjointe. Considérer l'ensemble de ces critères nous permet d'étudier un cas proche de la réalité. D'autre part, quand la plupart des travaux existants favorisent les enjeux économiques en optimisant les trajets des tournées, nous choisissons de satisfaire le patient en maximisant la continuité de soins, peu étudiée en tant qu'objectif principal. Divers critères originaux issus du domaine de la santé publique sont utilisés pour évaluer la continuité de soins. La méthode heuristique proposée a été testée sur des données réelles.

La section 2.4 donne un aperçu de l'intérêt grandissant porté aux incertitudes et perturbations du terrain, qui constituent un élément central de nos travaux. Nous nous sommes positionnées sur un plan stratégique pour étudier un problème de réoptimisation des tournées sur le long terme suite à des perturbations connues alors que la plupart des études existantes se consacrent plutôt à la gestion des incertitudes sur le court terme. Dans notre cas, les perturbations peuvent être anticipées et le problème est déterministe mais tient compte de l'historique des plannings grâce à des contraintes de continuité humaines et temporelles peu étudiées à notre connaissance. Là encore, nous considérons de nombreuses contraintes légales, médicales, inspirées de cas réels. Contrairement à la plupart des travaux de la littérature, nous nous plaçons du point de vue des intervenants pour choisir les critères définissant une "bonne tournée". Nous proposons une méthode exacte basée sur une décomposition en deux phases pour résoudre ce problème de réoptimisation stratégique. Les expérimentations sont menées sur des données réelles et des instances adaptées de la littérature.

Nous nous sommes aussi intéressées à un problème de réoptimisation au niveau opérationnel, pour réparer rapidement un planning en cas d'absence inopinée d'un intervenant. Pour cette étude, nous étudions une continuité humaine partielle pour répondre aux enjeux du terrain et nous introduisons de la flexibilité dans une version heuristique de la méthode développée pour la réoptimisation stratégique. Pour confronter les intérêts souvent contradictoires des trois acteurs du problème, nous traitons des versions bi-objectif du problème. Nous considérons à la fois un critère classique de la littérature (les temps de trajets) et deux critères de stabilité, à savoir le nombre de changements induits par la

réoptimisation dans les tournées (indicateur de stabilité côté intervenant), et le décalage des horaires des services (indicateur de stabilité côté patient). Ces deux éléments ont un impact direct sur la satisfaction des intervenants et des patients.

Enfin, la collaboration avec une entreprise de service à domicile nous a permis de confronter nos travaux à la réalité du terrain. Les cas d'étude de la littérature dont nous avons connaissance ne vont pas aussi loin que nous dans la compréhension du terrain, puisque nous avons cherché à intégrer toutes les spécificités du terrain et de la structure partenaire, et nous avons développé une preuve de concept adaptée à leurs besoins. De nombreuses règles de fonctionnement internes sont modélisées, intégrées à la planification, et analysées lors de tests sur données réelles et issues de la littérature.

Tous ces travaux ont été menés dans le but de réduire l'écart entre recherche théorique et cas pratique, en prenant en compte les contraintes spécifiques au secteur du soin et service à domicile, mais surtout en développant des méthodes pour faire face aux imprévus du métier. L'identification de différents facteurs de satisfaction des patients et des intervenants nous a amenées à porter un intérêt particulier à la continuité de soins, envisagée à la fois sous l'aspect humain et temporel.

Chapitre 3

Planification de tournées avec optimisation de la continuité de soins

Sommaire

3.1	Introduction	46
3.2	Les variantes du VRP dans la littérature	46
3.2.1	Tournées de véhicules et variantes	46
3.2.2	Positionnement	47
3.3	Continuité de soins : définitions et indicateurs	48
3.4	Description du problème	50
3.5	Méthode de résolution	51
3.5.1	Heuristique à horizon glissant	51
3.5.2	Construction d'une solution initiale pour le problème journalier	52
3.5.3	Formulation mathématique pour le problème journalier (HH-CRSP1)	53
3.5.4	Modèle global (HHCSP-G)	55
3.6	Expérimentations	56
3.6.1	Caractéristiques des instances	56
3.6.2	Résultats expérimentaux	57
3.7	Conclusion	58

Ce chapitre présente un problème de planification de tournées de soins hebdomadaires dans lequel nous optimisons la continuité de soins, en prenant en compte plusieurs types de contraintes (contraintes légales, disponibilités, compatibilités, fenêtres de temps).

Une version préliminaire de ces travaux a fait l'objet d'une publication en conférence internationale [168].

3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons introduit les problèmes de planification dans le secteur des soins et services à domicile. Nous avons évoqué le fait que les objectifs les plus fréquemment étudiés sont des objectifs de coûts. Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la continuité de soins, peu abordée dans la littérature en tant qu'objectif. Nous considérons différents indicateurs de continuité, et étudions leur intégration dans la conception de tournées de soins s'étalant sur plusieurs périodes. Nous proposons une heuristique à horizon glissant pour résoudre un problème de planification sur horizon long avec prise en compte de la continuité de soins.

Nous commençons par introduire quelques notions classiques de la littérature sur les tournées de véhicules (section 3.2), en complément au chapitre précédent. Ensuite, nous détaillons dans la section 3.3 plusieurs critères de continuité de soins, tels qu'ils sont généralement étudiés en santé publique. Puis, nous présentons le problème étudié (section 3.4), la méthode développée (section 3.5), et enfin les résultats numériques des expérimentations menées sur des données réelles (section 3.6).

3.2 Les variantes du VRP dans la littérature

Comme évoqué dans le chapitre précédent, les problèmes de planification de tournées de soins sont issus des problèmes de tournées de véhicules (VRP). Comme pour le VRP, de nombreuses variantes existent dans le domaine du soin à domicile. Dans cette section, nous présentons quelques variantes du VRP, dont les contraintes additionnelles correspondent à celles que nous considérons dans ce chapitre, et plus globalement dans cette thèse. Les références citées ci-après sont généralement des références fondatrices, dans lesquelles ont été introduites les contraintes auxquelles nous nous intéressons. Nous signalons aussi quelques revues de littérature plus récentes auxquelles le lecteur pourra se référer.

3.2.1 Tournées de véhicules et variantes

Une variante classique du VRP consiste à imposer une fenêtre de temps durant laquelle le client doit être livré : il s'agit du [Vehicle Routing Problem with Time Windows \(VRPTW\)](#). Les fenêtres de temps peuvent être strictes, c'est-à-dire que le client doit impérativement être livré à l'intérieur de la fenêtre de temps, ou souples, auquel cas une livraison en dehors de la fenêtre entraîne une pénalité dans la fonction objectif. Nous pouvons par exemple citer les travaux de Cordeau et al. [54], ou le plus récent état de l'art de Dixit et al. [77].

Cette contrainte est extrêmement courante dans les articles relevant du domaine de la santé, puisque les horaires des interventions sont souvent liés à la nature des soins fournis (préparation des repas, aide au lever ou au coucher, etc.).

Le [Distance-Constrained Vehicle Routing Problem \(DCVRP\)](#) impose une contrainte sur la longueur maximale des tournées. Pour des tournées de soins, cela peut correspondre à la limitation du nombre de patients visités, ou aux limitations légales des durées de travail. Laporte et al. proposent un programme linéaire en nombres entiers [148] pour résoudre le [DCVRP](#).

Dans le [Periodic Vehicle Routing Problem \(PVRP\)](#) [174], l'horizon est étendu sur plusieurs périodes, et un client peut être livré plusieurs fois. Des contraintes de fréquences sont parfois imposées, ce qui peut conduire à l'établissement de patterns pour la livraison. Dans les structures de soins et de services à domicile, les patients requièrent des soins réguliers. Il n'est donc pas rare d'effectuer la planification sur un horizon long, durant lequel ils reçoivent plusieurs visites, parfois dans une même période.

Les contraintes d'incompatibilité intervenants-patients auxquelles nous faisons face dans le domaine de la santé se retrouvent également dans les problèmes avec contraintes de site ([Site-Dependent Vehicle Routing Problem \(SDVRP\)](#)), où la flotte est composée de différents véhicules qui ne sont pas capables de desservir tous les clients. Cordeau et Laporte [55] ont montré que ce problème pouvait être vu comme un cas particulier du [PVRP](#).

Enfin, le problème [Consistent Vehicle Routing Problem \(ConVRP\)](#), lui aussi sur un horizon de plusieurs périodes, impose qu'un même client soit toujours livré par un unique conducteur. Kovacs et al. [142] généralisent le problème en remarquant que les objectifs de minimisation de coûts classiquement étudiés en [VRP](#) peuvent être grandement améliorés en autorisant plus d'un conducteur par client. Pour cette raison, ils considèrent le cas où un client est livré par un nombre limité de conducteurs. Comme pour les tournées de soins, cette hypothèse est plus réaliste puisqu'il est généralement impossible d'affecter un seul conducteur sur une longue période de temps, et qu'elle permet de proposer des solutions même dans les situations où un conducteur spécifique n'est pas disponible (vacances, maladie, etc.).

3.2.2 Positionnement

Les problèmes de planification de tournées de soins sont fondamentalement liés à tous les problèmes évoqués dans la section précédente. Toutefois, l'aspect humain et social inhérent au domaine de la santé impose d'adapter les formulations du [VRP](#) pour modéliser le problème désormais désigné dans la littérature comme le [HHCRSP](#).

Parmi la grande variété de contraintes du [VRP](#) nous pouvons retrouver la plupart de celles auxquelles nous sommes confrontés dans le domaine du soin à domicile. Comme nous l'avons montré dans le chapitre 2, elles sont toutes étudiées dans la littérature, mais rarement toutes prises en compte conjointement. Nous étudions dans ce chapitre un problème de planification sur horizon long avec plusieurs types de contraintes (contraintes légales, disponibilités, compatibilités) afin de rester proche de la réalité.

De plus, nous nous intéressons à un aspect moins étudié dans la littérature, mais pourtant essentiel dans le domaine de la santé : la continuité de soins. Nous considérons plusieurs définitions de la continuité dont, à notre connaissance, certaines n'ont jamais été considérées dans la littérature de la recherche opérationnelle. Nous présentons différents indicateurs de mesure dans la section suivante.

3.3 Continuité de soins : définitions et indicateurs

La continuité de soins est un concept fondamental dans le domaine de la santé, et par extension dans le domaine du soin et service à domicile. Bien qu'il soit largement étudié dans la littérature scientifique hors du domaine de la recherche opérationnelle, il n'existe pas de définition universelle. Même si nous verrons dans les chapitres suivants, que la continuité de soins peut revêtir une notion de continuité temporelle, nous nous intéressons ici uniquement à sa dimension humaine. Lorsqu'un patient requiert plusieurs soins sur une période plus ou moins longue, et doit recevoir plusieurs visites, il est généralement apprécié que le même intervenant prenne en charge toutes les visites.

La relation intervenant-patient est particulièrement importante dans le secteur du soin à domicile, puisqu'elle peut notamment jouer un rôle sur le bon déroulement des soins, ou sur l'évolution de l'état de santé du patient [207]. Assurer la continuité de soins apparaît donc comme un élément essentiel de la conception des tournées de soins malgré le fait qu'il soit souvent difficile à satisfaire.

Nous présentons ici divers indicateurs de continuité, issus de la littérature en santé publique.

Chaque indicateur est calculé pour un patient fixé, noté p . Notons \mathcal{K} l'ensemble des intervenants, S_{kp} le nombre de services fournis par l'intervenant k au patient p et S_p le nombre de services requis par le patient étudié.

NOP : Number Of Providers Seen [89]

L'indicateur NOP recense le nombre d'intervenants différents visitant le patient au cours de l'horizon examiné. À notre connaissance, c'est l'indicateur le plus utilisé dans les travaux de recherche opérationnelle. Pour maximiser la continuité de soins, il faut minimiser le NOP.

COC : Continuity of Care Index [51]

L'indicateur COC se calcule de la manière suivante :

$$COC = \frac{\sum_{k \in \mathcal{K}} S_{kp}^2 - S_p}{S_p(S_p - 1)}$$

Sa valeur varie entre 0 et 1 et dépend non seulement du nombre d'intervenants affectés au patient mais aussi du nombre de services effectués par chacun.

MMCI : Modified Modified Continuity Index [113]

Le MMCI mesure la continuité selon le nombre total de visites requises et d'intervenants connus, sa valeur varie également entre 0 et 1.

$$MMCI = \frac{1 - \frac{NOP}{S_p + 0.1}}{1 - \frac{1}{S_p + 0.1}}$$

UPC : Usual Provider Continuity Index [219]

Cet indicateur requiert la désignation préalable d'un intervenant préféré pour chaque patient. Il représente le ratio de services effectués par l'intervenant préféré et se calcule comme suit :

$$UPC = \frac{S_{pk^*}}{S_p}$$

où k^* est l'intervenant préféré du patient.

MFPC : Most Frequent Provider Continuity Index [115]

Lorsque l'intervenant préféré n'est pas spécifié, l'indicateur MFPC (Most Frequent Provider Continuity index) désigne l'intervenant préféré comme celui réalisant le plus de visites au cours de l'horizon, et se calcule comme l'UPC.

$$MFPC = \frac{\max_{k \in \mathcal{K}} S_{kp}}{S_p}$$

Comparaison des indicateurs

Dans le Tableau 3.1, nous donnons des exemples de calcul de continuité selon les différents indicateurs. La séquence "AAAABBBBC" signifie par exemple qu'un patient requérant 8 visites a été visité 4 fois par l'intervenant A, 3 fois par l'intervenant B, et une fois par l'intervenant C. Pour le calcul de l'UPC, nous considérons que l'intervenant préféré est l'intervenant B, nous l'indiquons par la notation $UPC(B)$.

Mis à part le NOP, tous les autres indicateurs varient entre 0 et 1, où une valeur élevée reflète une continuité forte. Pour maximiser la continuité, il s'agit donc de minimiser le NOP, ou de maximiser les autres critères. Pour le NOP, COC, MMCI, MFPC, la continuité maximale est atteinte lorsque tous les services sont fournis par un seul et même intervenant tandis que la discontinuité complète (un intervenant différent par service) produit les pires valeurs. Pour l'UPC, la continuité est maximale (resp. minimale) lorsque l'ensemble des visites (resp. aucune visite) est effectué par l'intervenant préféré.

Remarquons que le COC est très sensible au nombre d'intervenants connus et diminue fortement lorsque le NOP augmente, d'autant plus lorsque la répartition du nombre

de visites entre les différents intervenants est équilibrée.

Au contraire, le MFPC et l'UPC ne dépendent pas directement du NOP, mais uniquement du nombre de services effectués par l'intervenant préféré. Le MMCI quant à lui n'est pas impacté par la distribution des services parmi les intervenants, mais seulement par le NOP et le nombre de visites requis. Given et al. [115] ont montré que le MFPC est toujours supérieur ou égal au COC.

Séquence de visites	NOP	COC	MMCI	UPC(B)	MFPC
AAAA	1	1	1	0	1
AAAAAABB	2	0,57	0,86	0,25	0,75
AAAABBBB	2	0,43	0,86	0,5	0,5
AAABBB	2	0,4	0,80	0,5	0,5
AAAABBBC	3	0,32	0,72	0,38	0,5
ABCD	4	0	0,03	0,25	0,25

TABLE 3.1 – Exemples de calcul de continuité selon les différents indicateurs

Dans les travaux de recherche opérationnelle, le NOP est le principal critère utilisé pour représenter la continuité de soins. Le concept d'intervenant préféré, que l'on retrouve dans le calcul de l'UPC existe également, mais se manifeste généralement sous forme de bonus (ou pénalité) dans la fonction objectif [228]. Le nombre total de visites n'est alors pas pris en compte dans le calcul de la continuité.

3.4 Description du problème

Nous considérons un ensemble de patients qui requièrent des visites sur un horizon de plusieurs jours. Chaque service est caractérisé par une durée spécifique, ainsi qu'une fenêtre de temps dans laquelle le service doit être effectué. Chaque patient dispose d'un ensemble d'intervenants connus et d'un ensemble d'intervenants incompatibles. Ces incompatibilités peuvent être liées à des allergies, des préférences de genre, ou encore des incompatibilités de caractères. Ces ensembles peuvent éventuellement être vides pour certains patients.

Les intervenants peuvent effectuer des visites durant leurs créneaux de disponibilité, qui diffèrent selon le jour de la semaine. Ils ont un volume horaire de travail spécifique, qu'ils ne peuvent pas dépasser au cours de l'horizon.

L'amplitude d'une journée de travail correspond à la différence entre la fin du dernier service et le début du premier service de la tournée. Le temps de service d'une tournée correspond au temps passé auprès des patients. Le temps de trajet d'une tournée correspond à la somme de tous les trajets entre deux visites. Il ne tient donc pas compte

des trajets depuis ou vers le domicile de l'intervenant.

Nous cherchons à maximiser la continuité de soins. Pour cela, nous minimisons le nombre moyen d'intervenants visitant les patients au cours de l'horizon (NOP). Nous utilisons également les indicateurs MMCI et MFPC, que nous maximisons.

Toutes les notations utilisées dans le chapitre sont présentées dans le Tableau 3.4, en fin de chapitre.

3.5 Méthode de résolution

Afin de résoudre le problème détaillé dans la section précédente, nous utilisons une formulation mathématique du problème journalier, que nous répétons pour chaque jour de la semaine en prenant en compte les solutions trouvées pour les jours précédents, pour assurer la continuité de soins, et garantir le respect des contraintes limitant le volume horaire global de travail des intervenants. Pour chaque jour, nous fournissons une solution initiale construite grâce à un algorithme constructif. Au bout des d jours composant l'horizon de temps considéré, les d solutions journalières ainsi trouvées sont concaténées pour former une solution globale, elle-même fournie comme solution initiale d'un programme linéaire hebdomadaire.

3.5.1 Heuristique à horizon glissant

Pour résoudre le problème sur tout l'horizon, nous résolvons chaque jour séparément, en prenant en compte les solutions des jours précédents. L'algorithme `rollingHorizon` est détaillé ci-après (Algorithme 1).

Pour un jour fixé, nous commençons par générer une solution initiale. Nous utilisons pour cela un algorithme constructif (cf Algorithme 2, `init`) qui procède par insertion successive des services. Il arrive que les tournées ainsi produites n'intègrent pas tous les services demandés mais cette solution parfois incomplète est toutefois donnée en warm start au programme linéaire HHCRSP1 présenté en section 3.5.3 et permet d'en accélérer la résolution. Lorsque le MILP échoue dans le temps imparti, nous générons une nouvelle solution initiale en introduisant de l'aléatoire dans le processus d'insertion, au moment de choisir l'intervenant affecté. Une fois une solution trouvée, nous mettons à jour les ensembles d'intervenants connus, et itérons le problème sur le jour suivant.

Quand tous les problèmes intermédiaires ont été traités, toutes les solutions journalières sont concaténées et la solution globale obtenue est fournie en warm start à un MILP pour tout l'horizon (cf 3.5.4).

Algorithme 1 Heuristique pour le HHCRSP : `rollingHorizon`

Output: Solution s^* pour l’horizon considéré

```

for all  $d \in \mathcal{D}$  do
     $solved \leftarrow false$ 
     $i \leftarrow 0$ 
    while  $!solved$  do
         $s_d^0 \leftarrow INIT(d, i)$  ▷ recherche d’une solution initiale, cf 2
         $s_d^* \leftarrow HHCRSP1(s_d^0)$  ▷ MILP HHCRSP1 avec warm start, cf 3.5.3
         $i \leftarrow i + 1$ ;
        update  $solved$ 

    for all  $p \in \mathcal{P}$  do
        update  $\mathcal{K}_p$ 
    save  $s_d^*$  ▷ sauvegarde de la solution journalière

 $s^0 \leftarrow Concatenate \{s_d^*, d \in \mathcal{D}\}$ 
 $s^* \leftarrow HHCRSP-G(s^0)$  ▷ MILP avec warm start (cf 3.5.4)
return  $s^*$ 
    
```

3.5.2 Construction d’une solution initiale pour le problème journalier

Pour cet algorithme constructif, nous sélectionnons les services de manière itérative après les avoir triés (`sortServices(d)`), et les affectons au meilleur intervenant trouvé (`bestCW(s, \mathcal{K}^*)`) dans le sous-ensemble \mathcal{K}^* d’intervenants considérés.

Dans un premier temps, il s’agit de trier dans l’ordre croissant les services du jour d selon leur date de début au plus tard ($b_s - \delta_s$). Pour chaque service, nous choisissons un intervenant et insérons le service en fin de tournée, le plus tôt possible (en respectant les fenêtres de temps et temps de trajets).

Pour choisir l’intervenant affecté à un service s , nous parcourons l’ensemble d’intervenants considéré. Selon le cas, il peut s’agir des intervenants connus ($\mathcal{K}^* = \mathcal{K}_p$), ou bien tous les intervenants non-incompatibles ($\mathcal{K}^* = \mathcal{K} \setminus \hat{\mathcal{K}}_p$), et sélectionnons celui pour lequel l’insertion du service crée le moins de temps d’inactivité dans sa tournée. À titre d’exemple, si nous cherchons à insérer un service dont la date de début au plus tôt est à 12h, et que nous avons deux intervenants disponibles dont les tournées (en construction) se terminent respectivement à 10h et à 11h30, nous, choisissons le deuxième.

Notons que nous commençons le processus d’initialisation pour une journée en cherchant les meilleurs intervenants dans l’ensemble des intervenants connus du patient recherchant le service. Si aucune solution n’est trouvée, alors tous les intervenants non-

incompatibles sont considérés.

Algorithme 2 Initialisation : $\text{init}(d, i)$

Input: d jour considéré, i entier

Output: Solution s_d^0 pour le jour considéré (potentiellement non réalisable)

```

 $\mathcal{S}_d \leftarrow \text{SORTSERVICES}(d)$  ▷ tri des services selon leur date de début au plus tard
for all  $s \in \mathcal{S}_d$  do
  if  $i=0$  then
     $k \leftarrow \text{BESTCW}(s, \mathcal{K}_p)$  ▷ sélection de l'intervenant
  else
     $k \leftarrow \text{BESTCW}(s, \mathcal{K} \setminus \hat{\mathcal{K}}_p)$ 
   $s_d^0 \leftarrow \text{INSERT}(s, k)$  ▷ insertion du service dans la tournée
return  $s_d^0$ 

```

3.5.3 Formulation mathématique pour le problème journalier (HH-CRSP1)

Nous formulons le **HHCRSP** comme un problème de **VRPTW**. Nous utilisons un graphe $G = (\mathcal{S}^*, \mathcal{E})$ où les sommets représentent l'ensemble des services requis pour une journée et les arcs entre deux sommets sont pondérés par le temps de trajet induit. Nous introduisons deux sommets fictifs, α et β qui correspondent aux domiciles des intervenants desquels toutes les tournées doivent commencer et finir. Étant donné que les trajets domicile-travail ne sont pas comptabilisés dans le calcul de l'amplitude ou dans les temps de trajets globaux, tous les poids sur les arcs partant de α ou allant vers β sont égaux à 0. Notons $\mathcal{S}^* = \{\mathcal{S} \cup \{\alpha, \beta\}\}$ l'ensemble des services incluant les services fictifs.

Modèle HHCRSP1 : Planification journalière

Données et notations

$mem_{kp} \in \{0, 1\}$ vaut 1 si l'intervenant k a déjà visité le patient p
 les jours précédant le jour considéré
 vaut 0 sinon, ou si le jour considéré est le premier jour de l'horizon

Variables de décision

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{si l'intervenant } k \text{ effectue consécutivement les services } i \text{ et } j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$s_{jk} = \text{heure de début du service } j \text{ effectué par l'intervenant } k$$

$$z_{kp} = \begin{cases} 1 & \text{si l'intervenant } k \text{ visite le patient } p \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Fonctions objectifs

$$\min NOP_{avg} = \min \frac{1}{P} \times \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{p \in \mathcal{P}} z_{kp} \quad (3.1)$$

$$\max MMCI_{avg} = \max \frac{1}{P} \times \sum_{p \in \mathcal{P}} \frac{1 - \frac{\sum_{k \in \mathcal{K}} z_{kp}}{S_p + 0.1}}{1 - \frac{1}{S_p + 0.1}} \quad (3.2)$$

Contraintes

$$\sum_{i \in \mathcal{S}^*} \sum_{k \in \mathcal{K}} x_{ijk} = 1 \quad \forall j \in \mathcal{S} \quad (3.3)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{S}} x_{\alpha jk} = \sum_{j \in \mathcal{S}} x_{j\beta k} \leq 1 \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (3.4)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{S}^*} x_{ijk} = \sum_{i \in \mathcal{S}^*} x_{jik} \quad \forall j \in \mathcal{S}, \forall k \in \mathcal{K} \quad (3.5)$$

$$e_k \cdot \sum_{j \in \mathcal{S}} x_{\alpha jk} \leq s_{\alpha k} \leq s_{\beta k} \leq l_k \cdot \sum_{j \in \mathcal{S}} x_{j\beta k} \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (3.6)$$

$$s_{\beta k} - s_{\alpha k} \leq A_{max} \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (3.7)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{S}} \sum_{i \in \mathcal{S}^*} x_{ijk} \times \delta_j \leq W_{max} \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (3.8)$$

$$a_j \sum_{i \in \mathcal{S}^*} x_{ijk} \leq s_{jk} \leq (b_j - \delta_j) \sum_{i \in \mathcal{S}^*} x_{ijk} \quad \forall k \in \mathcal{K}, \forall j \in \mathcal{S} \quad (3.9)$$

$$s_{ik} + (t_{ij} + \delta_i) \times x_{ijk} \leq s_{jk} + l_k(1 - x_{ijk}) \quad \forall k \in \mathcal{K}, \forall i, j \in \mathcal{S}^* \quad (3.10)$$

$$x_{ijk} = 0 \quad \forall k \in \hat{\mathcal{K}}_p, \forall j \in \mathcal{S}^*, \forall i \in \mathcal{S}_p, \forall p \in \mathcal{P} \quad (3.11)$$

$$z_{kp} \geq \sum_{i \in \mathcal{S}^*} x_{ijk}, \quad \forall p \in \mathcal{P}, \quad \forall j \in \mathcal{S}_p, \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (3.12)$$

$$z_{kp} \geq mem_{kp}, \quad \forall p \in \mathcal{P}, \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (3.13)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in \mathcal{S}^* \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (3.14)$$

$$s_{jk} \in \mathbb{N} \quad \forall j \in \mathcal{S}^*, \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (3.15)$$

$$z_{kp} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad (3.16)$$

Avec la première fonction objectif (3.1), nous minimisons le NOP moyen. La seconde fonction (3.2) maximise le MMCI moyen. La contrainte (3.3) assure que tous les services soient couverts. Les contraintes (3.4) et (3.5) sont les contraintes de flot. Avec la contrainte (3.10), elles garantissent l'intégrité des tournées qui commencent et finissent au domicile de l'intervenant, sans sous-tour. Les limites légales sont garanties par les contraintes (3.7) et (3.8). Les fenêtres de temps des services sont imposées par (3.9) et celles des intervenants par (3.6). Enfin, l'affectation d'intervenants incompatibles est interdite (3.11). Les contraintes (3.12) et (3.13) permettent de fixer les variables de continuité pour le calcul des objectifs. Les contraintes (3.14), (3.15) et (3.16) précisent les domaines de définition des variables.

3.5.4 Modèle global (HHCRSP-G)

Pour la formulation, complète, nous ajoutons simplement un indice d aux variables de décision, afin de signifier le jour considéré. Toutes les contraintes sont les mêmes, et sont formulées pour tout jour de l'horizon ($\forall d \in \mathcal{D}$). Seules les contraintes de continuité changent légèrement : la contrainte (3.13) est supprimée (l'utilisation des booléens mem n'est plus nécessaire puisque le modèle est hebdomadaire) et (3.12) devient :

$$z_{kp} \geq \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{i \in \mathcal{S}^*} x_{ijkd}, \quad \forall p \in \mathcal{P}, \quad \forall j \in \mathcal{S}_p, \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (3.17)$$

L'équation suivante permet de limiter le temps de service global de chaque intervenant :

$$\sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{j \in \mathcal{S}} \sum_{i \in \mathcal{S}^*} x_{ijkd} \times \delta_j \leq h_k \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (3.18)$$

Des tests préliminaires sur des données réelles nous ont permis de remarquer que les temps de trajets pouvaient exploser par rapport aux plannings réels puisqu'ils ne sont pas contraints ni optimisés dans notre modèle. Même si nous nous focalisons sur la continuité de soins, proposer des plannings avec des temps de trajets excessifs n'est acceptable ni pour les intervenants, ni sur le plan économique pour la structure. Pour

cette raison, nous ajoutons une contrainte (3.19) pour limiter les temps de trajets à une borne fixée arbitrairement.

$$\sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{i \in \mathcal{S}^*} \sum_{j \in \mathcal{S}^*} x_{ijkd} \times t_{ij} \leq T \quad (3.19)$$

Les calculs des objectifs ne changent pas, mais nous ajoutons la maximisation du MFPC moyen. Comme nous ne connaissons pas encore l'intervenant le plus fréquemment affecté au patient au moment de l'optimisation des problèmes journaliers, nous utilisons le critère *NOP* dans les modèles HHCRSP1 successifs. Ensuite, à partir de la solution initiale globale s^0 , nous déterminons l'intervenant k_p^* qui a été le plus souvent affecté au patient p durant l'horizon. Alors, la fonction objectif devient :

$$\max MFPC_{avg} = \min \frac{1}{P} \times \sum_{p \in \mathcal{P}} \frac{\sum_{i \in \mathcal{S}_p} \sum_{j \in \mathcal{S}^*} x_{ijk_p^*}}{S_p} \quad (3.20)$$

3.6 Expérimentations

L'heuristique présentée a été implémentée en Java, et nous utilisons le solveur Cplex pour résoudre les différents MILP. Toutes les expérimentations ont été menées sur une machine avec les caractéristiques suivantes : Intel ©Core™ i5-7440HQ CPU 2.80GHz et 16 GO de RAM. Nous limitons le temps d'exécution à 3 minutes pour chaque MILP journalier, et à 30 minutes pour le MILP final.

3.6.1 Caractéristiques des instances

Nous avons testé notre heuristique sur des données réelles fournies par une entreprise de services à domicile, dont nous parlerons plus en détail dans le chapitre 6. Nous disposons de trois plannings hebdomadaires utilisés en pratique, dont les caractéristiques sont détaillées dans le tableau 3.2, des matrices de distances associées, ainsi que des informations sur les disponibilités des intervenants et les préférences des patients. Tous les ensembles d'intervenants incompatibles sont vides, mais les données sur les intervenants connus sont fournies pour certains patients.

À partir de chaque planning, nous construisons trois instances avec des fenêtres de temps de tailles diverses. Les instances de taille S ont des horaires fixes, établis à partir de ceux utilisés dans le planning. Les instances de taille M ont des fenêtres de temps s'étalant 30 minutes avant et après les horaires prévus, et pour les instances de taille L, elles s'étalent 60 minutes avant et après ces mêmes horaires.

Nous fixons la borne T pour les temps de trajets à 110 % des temps de trajets réels calculés dans les plannings utilisés par l'entreprise.

Instance	K	P	S
1	7	9	85
2	9	33	188
3	18	92	401

TABLE 3.2 – Caractéristiques des instances

3.6.2 Résultats expérimentaux

Nous exécutons l'algorithme sur chacune des instances, en optimisant tour à tour la continuité de soins via plusieurs des indicateurs évoqués, à savoir le NOP, le MMCI, et le MFPC. Comme nous ne disposons pas d'informations sur les intervenants préférés des patients, nous ne pouvons calculer l'UPC. Le calcul du COC n'étant pas linéaire, nous ne pouvons l'intégrer comme fonction objectif dans le MILP.

Nous comparons les valeurs obtenues grâce à notre algorithme (NOP^* , $MMCI^*$, $MFPC^*$) avec les valeurs calculées à partir du planning réel (NOP_R , $MMCI_R$, $MFPC_R$). Les temps d'exécution (CPU_{avg} , en secondes) sont également reportés dans le tableau 3.3.

Instance	TW	NOP		$MMCI$		$MFPC$		CPU_{avg} (s)
		NOP^*	NOP_R	$MMCI^*$	$MMCI_R$	$MFPC^*$	$MFPC_R$	
1	S	1		1		1		3,573
	M	1	2,66	1	0,84	1	0,72	3,022
	L	1		1		1		5,268
2	S	1		1		1		94,37
	M	1	2,18	1	0,79	1	0,74	293,6
	L	1		1		1		958,5
3	S	3,25		0,5		0,59		2078,6
	M	1,20	1,62	0,96	0,87	0,93	0,85	5345,3
	L	1,13		0,97		0,95		2345

TABLE 3.3 – Comparaison des résultats de continuité de notre méthode avec les plannings réels

Pour les instances 1 et 2, nous arrivons à trouver une continuité optimale, où tous les services requis par un même patient sont fournis par le même intervenant au cours de l'horizon. En quelques secondes, nous résolvons les instances de petite taille, quand les instances de taille moyenne prennent quelques minutes.

Pour les instances de grande taille en revanche, le temps d'exécution moyen est beaucoup plus long, et nous atteignons la limite de temps avant d'avoir trouvé la solution optimale. Si nous obtenons de bons résultats pour les fenêtres de temps M et L avec une très forte continuité de soin, nous ne trouvons pas de solution qui améliore le planning réel pour l'instance 3S dans le temps imparti. Notons que pour chacune de ces instances,

la solution obtenue lorsque la limite de temps est atteinte est trouvée rapidement par Cplex (moins de 5 minutes). Un travail sur les bornes inférieures pour la minimisation du MFPC et MMCI) ou supérieures pour la maximisation du NOP pourrait accélérer la résolution.

Malgré la contrainte sur les temps de trajets (augmentation limitée à 10 % par rapport aux plannings réels), la majorité des plannings construits par notre méthode améliorent grandement la continuité de soins. Notons que la limite des 10% de temps de trajets supplémentaires autorisés n'est pas systématiquement atteinte. Pour certains instances (1S, 1M), nous avons même obtenus des meilleurs temps de trajets que dans le planning réel.

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une heuristique à horizon glissant pour résoudre un problème de planification de tournées sur horizon long. Tout en considérant des contraintes légales, nous avons cherché à maximiser la continuité de soins, habituellement peu étudiée en tant qu'objectif principal. Notre algorithme propose des solutions avec une forte continuité sur des instances de taille réelle, et en temps d'exécution rapide sur les petites et moyennes instances. Nous avons réussi à améliorer la continuité des plannings utilisés en réalité en imposant des contraintes pour limiter les dégradations des temps de trajet. Une approche multi-objectif permettrait de mieux analyser l'impact de la continuité de soins sur les temps de trajets ou sur des critères de satisfaction des intervenants comme les temps d'attente et les amplitudes des tournées.

Toutefois, l'étude de santé publique menée par Gjevjon et al. [116] sur le terrain affirme que les responsables de la planification des centres de soin à domicile doivent trouver des compromis entre les deux objectifs divergents que sont la continuité de soins, et les aspects pratiques de la planification. Il met également en évidence le fait que favoriser la satisfaction des patients (en particulier via la continuité de soins) a un impact négatif sur la satisfaction des intervenants.

Nous verrons dans les chapitres suivants qu'assurer de bonnes conditions de travail est essentiel pour le bon fonctionnement d'une structure de soins à domicile. Ainsi, nous nous intéresserons à la satisfaction des intervenants dans la suite de nos travaux, en assurant néanmoins la continuité de soins, qui reste primordiale dans ce type de problèmes.

Caractéristiques générales	
\mathcal{D}/D	horizon de temps / nombre de jours composant l'horizon
A_{max}	amplitude maximale
W_{max}	temps de service maximal
T	valeur limite pour les temps de trajet
Caractéristiques de l'intervenant k	
\mathcal{K}/K	ensemble/nombre d'intervenants
$[e_k, l_k]$	fenêtre de disponibilité de k
h_k	volume horaire maximal de k sur l'horizon
Caractéristiques du patient p	
\mathcal{P}/P	ensemble/nombre de patients
\mathcal{K}_p	ensemble d'intervenants connus par p
$\hat{\mathcal{K}}_p$	ensemble d'intervenants incompatibles avec p
\mathcal{S}_p/S_p	ensemble/nombre de services requis par p
S_{kp}	nombre de services fournis par l'intervenant k au patient p
k_p^*	intervenant le plus souvent affecté à p
Caractéristiques du service s	
\mathcal{S}/S	ensemble/nombre de services
δ_s	durée du service s
$[a_s, b_s]$	fenêtre de temps du service s
$t_{s_1 s_2}$	temps de trajet entre s_1 et s_2
Notations de l'heuristique de planification	
\mathcal{S}^*	ensemble de sommets du graphe
\mathcal{E}	ensemble d'arcs du graphe
$\alpha; \beta$	sommets fictifs
mem_{kp}	tableau de booléens contenant les relations entre l'intervenant k et le patient p
s_d^0/s_d	solution initiale / solution finale pour le jour d
s^0/s	solution initiale / solution finale sur l'horizon complet
Indicateurs de continuité	
NOP	Number Of Providers Seen
COC	Continuity Of Care Index
$MMCI$	Modified Modified Continuity Index
UPC	Usual Provider Continuity Index
$MFPC$	Most Frequent Provider Continuity Index

TABLE 3.4 – Tableau récapitulatif des notations et données du chapitre 3

Chapitre 4

Réoptimisation stratégique des tournées de soins

Sommaire

4.1	Introduction	62
4.2	Modèles et méthodes pour les tournées de véhicules	63
4.2.1	Modèles mathématiques pour le VRP	63
4.2.2	Problèmes statiques et dynamiques	64
4.2.3	Méthodes de décomposition	64
4.2.4	Positionnement	65
4.3	Description du problème	66
4.3.1	Exemple	67
4.3.2	Contraintes	68
4.3.3	Objectifs	70
4.4	Formulation mathématique	71
4.5	Méthode de résolution : SRO	75
4.5.1	Génération de graphes	75
4.5.2	Génération de tournées	78
4.5.3	Sélection de tournées	83
4.5.4	Retour sur la prise en compte des contraintes	86
4.6	Expérimentations	87
4.6.1	Instances	87
4.6.2	Résultats numériques	88
4.6.3	Analyse des résultats	89
4.7	Conclusion et perspectives	91

Dans ce chapitre nous étudions un problème de réoptimisation stratégique des planings hebdomadaires suite à des départs ou arrivées d'intervenants et de patients. Nous prenons en compte différentes contraintes de continuité de soins et favorisons les intérêts des intervenants.

Une partie de ce travail a été présentée en conférence internationale [169]. Nous avons également rédigé un article reprenant l'ensemble des aspects abordés dans ce chapitre, que nous soumettrons prochainement à un journal international.

4.1 Introduction

Lorsqu'un planning est construit, et même s'il est optimal, son application est souvent rendue impossible telle quelle. En effet, le secteur de la santé engendre de nombreux imprévus qui bouleversent les décisions prises à un niveau stratégique. Les aléas les plus courants concernent généralement les évolutions de la patientèle et de la composition du personnel des structures. Le planning initialement prévu étant souvent lourdement impacté par ces changements, il convient d'engager un travail de replanification, et donc une réoptimisation des tournées. Dans un contexte où l'aspect humain est essentiel, recalculer les tournées optimales indépendamment du planning initial n'est globalement pas une solution satisfaisante si l'on considère la satisfaction des patients et des intervenants plutôt que les intérêts économiques purs de la structure. En effet, il est primordial de maintenir une certaine continuité dans le processus de replanification puisque cela représente un facteur majeur de la satisfaction des patients. D'une part, il convient d'assurer une continuité temporelle, c'est-à-dire le fait de garder inchangés les horaires des interventions lors du processus de réoptimisation. D'autre part, il faut garantir une continuité humaine en affectant toujours des intervenants déjà connus des patients. Cette contrainte constitue un véritable verrou scientifique dans les problèmes de replanification de tournées de soins.

La plupart du temps, les enjeux économiques et la satisfaction du patient sont mis en avant, au détriment de la satisfaction de l'intervenant. Il est important de noter que les intervenants des structures de soin à domicile évoluent dans un milieu stressant, avec des conditions de travail difficiles et une faible reconnaissance professionnelle. Cela crée un environnement anxigène qui provoque de nombreux burn-outs, arrêts-maladie, et pousse parfois les intervenants à la démission. Ce fort roulement du personnel aggrave la situation d'instabilité des plannings et impacte de manière significative la qualité de service. Les structures de soin et service à domicile se doivent donc de proposer des plannings acceptables du point de vue des employés, ce qui constitue par ailleurs un argument majeur pour le recrutement d'intervenants qualifiés dans un secteur où la concurrence est de plus en plus forte, rendant le recrutement difficile.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à un problème de réoptimisation stratégique et cherchons à réoptimiser des plannings compromis par des départs et/ou arrivées de patients et/ou d'intervenants. Nous prenons en compte différentes contraintes de continuité et favorisons les intérêts des intervenants. Nous évoquons quelques travaux de la littérature liés au problème général de tournées de véhicules, afin d'introduire des outils utiles à la compréhension de notre méthode (4.2). Nous proposons une description formelle de notre problème en section 4.3, et une formulation mathématique (4.4). Ensuite, nous détaillons notre stratégie de résolution, basée sur une méthode exacte en deux phases. Enfin, des expérimentations menées à la fois sur des données réelles et des instances de la littérature nous permettent d'analyser les performances de notre méthode (4.6), et de proposer d'éventuelles pistes de recherche (4.7).

4.2 Modèles et méthodes pour les tournées de véhicules

Comme souligné dans les chapitres précédents, les tournées de véhicules (ou **VRP**) ont de nombreuses et diverses applications pratiques. Ainsi, nous pouvons rencontrer des problèmes proches dans d'autres domaines que celui que nous étudions. Dans cette section, nous introduisons les formulations et outils de la recherche opérationnelle rencontrés dans la littérature du **VRP** en lien avec le problème et la méthode présentés dans ce chapitre. Comme dans le chapitre précédent, nous donnons ici des références fondatrices, mais le lecteur pourra se référer aux états de l'art évoqués dans le chapitre 2 pour trouver des travaux plus récents.

4.2.1 Modèles mathématiques pour le **VRP**

Les problèmes de tournées de véhicules sont modélisés de nombreuses manières, que Toth et Vigo [225] divisent en trois catégories : les modèles de flots de véhicules, les modèles de flots de commodités, et les modèles de partitionnement d'ensemble.

Modèles de flots de véhicules

Ce premier modèle utilise une formulation avec une variable binaire à deux indices qui indique si l'arc qui lui est associé est emprunté par un véhicule dans la solution optimale. Cette formulation convient pour les problèmes de **VRP** basiques, lorsque la flotte est homogène et que le coût d'une tournée peut être exprimé comme la somme des coûts des arcs empruntés par le véhicule. Cependant, dans des cas plus complexes, par exemple lorsque le coût de la solution est lié à l'enchaînement global des arcs empruntés, et non pas à la somme des coûts des arcs empruntés, la formulation n'est plus adaptée. Des extensions utilisant un troisième indice pour caractériser le véhicule qui emprunte l'arc ont ensuite été développées [104] : chaque véhicule étant traité de manière individuelle, il est alors possible de considérer des flottes hétérogènes.

Modèles de flots de commodités

Cette deuxième famille de formulations reprend les variables de décision utilisées dans les modèles de flots de véhicules et y ajoute des variables continues liées aux arcs. Ces variables de flot représentent les charges des véhicules au moment où l'arc est emprunté. Cette formulation a été introduite par Garvin et al. [110].

Modèles de partitionnement d'ensemble

Dans cette formulation initialement proposée par [15], il s'agit de choisir une partition parmi un ensemble de circuits préalablement générés. On fait l'hypothèse que tous

les circuits proposés respectent les contraintes liées à la construction d'une tournée individuelle. La décision porte donc sur le choix du sous-ensemble de tournées. La relaxation linéaire est généralement bien meilleure que pour les modèles précédents, toutefois le nombre de variables binaires du problème est exponentiel.

Cette modélisation est également utilisée pour d'autres problèmes de planification, dont par exemple la planification du personnel aérien [165].

4.2.2 Problèmes statiques et dynamiques

Dans les problèmes statiques de **VRP**, toutes les informations sont connues au moment de la planification et restent inchangées tout au long de l'horizon. Dans les problèmes dynamiques au contraire, les données sont susceptibles de varier de manière plus ou moins impromptue, ou sont encore inconnues au début de la tournée. Les routages dynamiques impliquent donc la prise de nouvelles décisions et sont généralement plus complexes que les problèmes statiques.

Pillac et al. [191] distinguent deux types d'approche pour les problèmes dynamiques.

Réoptimisation continue

Les approches de réoptimisation continue consistent à relancer le processus d'optimisation dès qu'un changement intervient dans les données. Généralement, les véhicules ne connaissent pas leur prochain client à livrer avant d'avoir fini la livraison en cours. Ces méthodes permettent d'être très réactifs et de gérer les problèmes en temps réel, ou avec des demandes urgentes, mais ne permettent pas d'avoir une vue d'ensemble sur les tournées et d'anticiper la planification.

Réoptimisation périodique

La réoptimisation périodique consiste quant à elle à résoudre à intervalles réguliers un problème statique correspondant à l'état courant du système. Cela nécessite de résoudre le problème complet à chaque intervalle, ce qui peut créer un certain délai pour le preneur de décisions, mais cette approche permet d'utiliser des algorithmes conçus pour des problèmes statiques. Il faut également noter que lorsqu'une perturbation survient, elle ne sera prise en compte qu'à la prochaine réoptimisation : si le délai entre deux réoptimisations est trop long, ou si l'incertitude impacte un élément survenant dans l'intervalle courant, le routage peut devenir infaisable. Lorsque les changements sont non urgents, la réoptimisation périodique semble particulièrement adaptée aux problèmes pratiques de tournées de véhicules [204], notamment lorsque l'on travaille à un niveau tactique ou stratégique.

4.2.3 Méthodes de décomposition

Les méthodes de résolution du **VRP** sont nombreuses, et il serait impossible ici d'en dresser une liste exhaustive. Parmi les approches classiques de la littérature, se dégage la famille des algorithmes en deux phases, que nous introduisons brièvement ici.

Cluster-first, route-second

Il s'agit de déterminer plusieurs sous-ensembles de clients à livrer, et de résoudre un problème de voyageur de commerce sur chacun des clusters ainsi créés. Plusieurs heuristiques existent, la plus ancienne étant à notre connaissance le sweep algorithm [114] qui ne s'applique qu'aux instances planaires du VRP. Dans cette méthode, les sous-ensembles de clients sont créés en calculant leurs coordonnées angulaires par rapport au dépôt, puis en balayant l'espace par coordonnées croissantes.

Route-first, cluster-second

La première phase consiste en la résolution d'un TSP. Le circuit ainsi créé est ensuite divisé en un ensemble de routes réalisables. A notre connaissance, cette décomposition a été introduite par Beasley [21], et semble assez peu compétitive sur les benchmarks de la littérature [149].

Algorithmes de pétales

Cette méthode se base sur la formulation du VRP comme un problème de partitionnement d'ensemble. Un ensemble de routes, appelées pétales, est créé. Dans la deuxième phase, la meilleure sélection de routes est choisie. La difficulté résidant dans le fait de produire tous les pétales réalisables, des heuristiques sont développées pour créer un sous-ensemble prometteur de routes. Agarwal et al. [3] proposent une version exacte de cet algorithme en s'appuyant sur de la génération de colonnes, mais ne traitent que de petites instances du VRP avec un maximum de 25 clients ; tandis que Foster et Ryan [105] proposent une méthode approchée pour générer un sous-ensemble de pétales.

4.2.4 Positionnement

Dans ce chapitre, nous étudions les changements de plannings à un niveau stratégique. Ainsi, nous ne parlons pas d'incertitudes mais plutôt de perturbations, puisqu'au moment de la prise de décision, nous supposons que l'état actuel du système est connu et stable. Il ne s'agit ni de proposer une réparation rapide et réactive, ni de réoptimiser le planning à chaque nouvelle perturbation. En pratique, les planificateurs ont de la visibilité sur la majorité des perturbations, et les gèrent manuellement au fil de l'eau. Le besoin est donc plutôt de réoptimiser le planning lorsque ces réparations successives deviennent ingérables au niveau opérationnel, et engendrent des routages inefficaces. Il s'agit donc d'une réoptimisation périodique, qui nous permet de travailler sur un problème statique, motivé par la réalité du terrain. Pour cette raison, nous prenons en compte de nombreuses contraintes rarement étudiées de manière conjointe dans la littérature.

Nous nous basons sur une modélisation en partitionnement d'ensemble, que nous résolvons à l'aide d'un algorithme de pétales.

4.3 Description du problème

Dans cette section, nous présentons formellement le problème étudié. Toutes les notations introduites sont également regroupées dans le Tableau 4.3 en fin de chapitre.

Nous considérons un ensemble de P patients (\mathcal{P}) qui requièrent un ensemble de S services (\mathcal{S}) sur un horizon de D jours (\mathcal{D}). Chaque service $s \in \mathcal{S}$ a une durée spécifique δ_s , et des horaires de début et fin f_s et g_s . En soin à domicile, la gamme de services proposée est très large, puisqu'il peut s'agir d'aide ménagère, d'aide à la préparation de repas, ou encore de soins infirmiers. De ce fait, chaque service est également caractérisé par une qualification ρ_s .

Plusieurs services peuvent être requis par un patient la même semaine, ou le même jour. Nous définissons l'ensemble \mathcal{K}_p comme l'ensemble des intervenants connus par p , et $\hat{\mathcal{K}}_p$ l'ensemble des intervenants incompatibles avec p . Notons τ_p la tolérance du patient p , c'est à dire le nombre maximal d'intervenants différents dont il peut recevoir la visite durant l'horizon \mathcal{D} . Nous définissons un seuil σ dont l'utilisation sera détaillée ultérieurement, et nous notons \mathcal{P}_σ l'ensemble des patients tels que

$$\frac{\text{nombre d'intervenants connus par } p}{\tau_p} < \sigma$$

Notons à présent \mathcal{K} l'ensemble des intervenants. Chaque intervenant k dispose d'un niveau de compétence q_k que l'on peut hiérarchiser. Ainsi, un intervenant peut réaliser un service s si et seulement si son niveau de compétence est au moins supérieur au niveau de qualification requis pour le service ($q_k \geq \rho_s$). Chaque intervenant a un volume horaire hebdomadaire maximal h_k , et des disponibilités différentes au cours de l'horizon, représentées par un ensemble I_k d'intervalles de temps.

Nous supposons que nous disposons d'un planning initial, qui est devenu obsolète suite au départ ou à l'arrivée de plusieurs intervenants et/ou de patients. Nous considérons quatre perturbations différentes : le départ d'un patient, l'arrivée d'un patient, le départ d'un intervenant et l'arrivée d'un intervenant.

Départ d'un patient

Les départs de patients sont des événements fréquents dans les structures de soin à domicile. En effet il n'est pas rare que l'état de santé d'un patient se dégrade, qu'il ait besoin d'être hospitalisé, placé dans une structure médicalisée, ou qu'il décède. Parfois au contraire, leur état s'améliore et ils n'ont plus besoin d'assistance dans leur vie quotidienne. Quand un patient sort de la structure, cela crée des vides dans les emplois du temps des intervenants qui devaient visiter ces patients. Leur temps d'attente augmente, leur temps de travail diminue et passe bien en deçà de leur valeur contractuelle, et la

charge de travail peut parfois être déséquilibrée par rapport à leurs collègues. Il convient donc de réorganiser les plannings afin de s'adapter à ces départs afin de préserver des conditions de travail convenables pour les intervenants, qui évoluent dans un contexte stressant et éreintant.

Arrivée d'un patient

Quand un patient intègre la structure, il faut ajouter de nouveaux services aux tournées existantes. Il faut veiller à maintenir une certaine stabilité pour les patients déjà présents dans le système, tout en gardant des plannings satisfaisants pour les intervenants, et économiquement rentables pour la structure.

Départ d'un intervenant

A cause des conditions de travail difficiles et peu gratifiantes, le roulement du personnel est extrêmement fort dans le secteur du soin et du service à domicile. Lorsqu'un intervenant démissionne, il faut s'assurer que sa tournée est redistribuée afin que les patients bénéficient toujours des services requis. La re-distribution des tâches doit être pensée de manière pérenne, car le recrutement n'est pas toujours facile, et le personnel recruté n'a pas forcément les mêmes caractéristiques que les intervenants qui sont partis.

Arrivée d'un intervenant

Pour éviter de surcharger un personnel déjà énormément sollicité, il convient de recruter rapidement de nouveaux intervenants lorsque des employés quittent la structure. Notons qu'à cause des contraintes de continuité de soins, il est parfois difficile d'intégrer ces nouveaux intervenants dans les plannings, puisqu'ils ne sont connus par aucun patient. C'est pour cette raison que nous avons introduit le seuil de continuité σ . Dans le cas où un patient est visité par peu d'intervenants différents, alors que sa tolérance est grande, nous décidons de rompre la continuité stricte pour autoriser les visites par des intervenants supplémentaires, toujours dans les limites de la tolérance τ_p du patient.

4.3.1 Exemple

Afin d'illustrer notre propos dans ce chapitre, appuyons-nous sur l'exemple simplifié exposé dans la Figure 4.1 dans lequel 3 intervenants fournissent 11 services durant une journée. L'axe horizontal représente un axe temporel, sur lequel on peut lire les horaires et durées des services, qui sont tous des multiples de 30 minutes pour des raisons de lisibilité. Sur l'axe vertical, on retrouve les 3 intervenants, et les services qui leur sont initialement associés. Chaque patient est représenté par une couleur distincte :

- Patient A requiert le service 1
- Patient B requiert le service 2
- Patient C requiert les services 3, 4, et 9
- Patient D requiert le service 5

- Patient E requiert le service 6
- Patient F requiert les services 7 et 8
- Patient G requiert le service 10
- Patient H requiert le service 11

Nous considérons deux niveaux de qualification, différenciés sur la figure par le style de ligne utilisé : un service représenté en trait plein (par exemple le service 1) est un service de qualification 0 tandis qu'un service représenté par un trait en pointillé requiert une qualification de niveau 1 (par exemple le service 4). Pour simplifier l'exemple, nous ferons l'hypothèse qu'il y a 15 minutes de trajet entre n'importe quelle paire de patients, et que cette journée est représentative des relations entre intervenants et patients : nous considérerons que l'intervenant 1 connaît uniquement les patients A, B, et C. Inversement, le patient A ne connaît que l'intervenant 1, alors que le patient C connaît tous les intervenants.

Supposons enfin que tous les patients ont une tolérance $\tau = 3$ et fixons le seuil σ à 50 %.

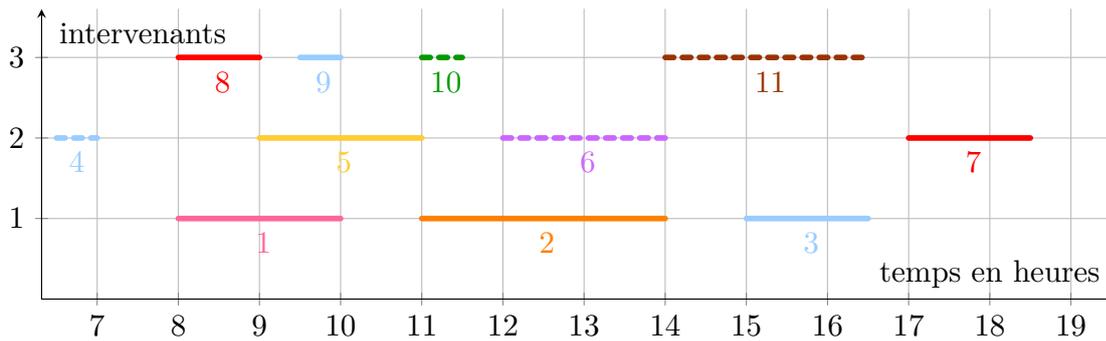


FIGURE 4.1 – Exemple simplifié d'un planning initial

4.3.2 Contraintes

Il s'agit de réoptimiser le planning initial afin que tous les services requis soient délivrés. Nous supposons qu'au moment où la re-planification a lieu, toutes les perturbations sont connues. Il ne s'agit donc pas de traiter des aléas en temps réel, mais bien d'intervenir sur le plan stratégique pour reconstruire un planning viable sur le moyen terme. Agir à ce niveau permet aux intervenants d'avoir de la visibilité sur leur planning et leur charge de travail à venir, et cela offre aux structures de soin à domicile la possibilité d'anticiper les besoins de formation ou de recrutement.

Contraintes générales

Les premières contraintes à prendre en compte sont des contraintes d'ordre général sur la construction des tournées.

1. L'intervenant doit commencer et finir sa tournée à son domicile
2. Deux services peuvent être exécutés de manière consécutive par un même intervenant si leurs horaires sont compatibles, c'est à dire si l'intervenant a le temps de se déplacer du lieu du premier service jusqu'au lieu du second service
3. Tous les services requis doivent être fournis
4. L'intervenant doit avoir au moins le niveau de qualification requis pour exécuter un service. Le travail surqualifié est autorisé
5. L'intervenant doit être disponible sur toute la durée du service requis
6. Un intervenant ne peut pas fournir de service chez un patient avec lequel il a été jugé incompatible

Contraintes légales

Les plannings sont régis par les [Conventions Collectives Nationales \(CCN\)](#) [151], et doivent donc également suivre des contraintes légales.

1. L'amplitude d'une journée, c'est à dire le temps écoulé entre le début du premier service de la journée, et la fin du dernier service de la journée, ne peut excéder A_{max} (13 heures dans les [CCN](#)). Notons que le premier et dernier trajet de la tournée ne sont pas décomptés dans l'amplitude.

Exemple : l'amplitude de la tournée de l'intervenant 1 est de 8.5 heures

2. Le temps effectif de travail, qui correspond dans la législation au temps durant lequel l'employé est à disposition de son employeur, ne doit pas excéder E_{max} (10 heures dans les [CCN](#)). Il correspond au temps de travail passé aux côtés des patients, aux temps de trajets (à l'exception du premier et dernier trajet de la tournée), et aux temps d'attente strictement inférieurs à 15 minutes. Les temps d'attente supérieurs à 15 minutes sont considérés comme des temps de pause, et ne sont donc ni comptés comme du temps de travail, ni payés.

Exemple : La durée effective de travail de l'intervenant 1 est de $(120 + 180 + 90) + (15 + 15) + (0) = 420$ minutes = 7h. La durée effective de travail de l'intervenant 3 est de $(60 + 30 + 30 + 150) + (15 + 15 + 15) + (15) = 330$ minutes = 5h30

3. Une pause déjeuner de 45 minutes au minimum doit être accordée dans un intervalle de temps précis, que nous noterons \mathcal{L} . Nous notons \mathcal{L}_{ij} l'ensemble des couples de services entre lesquels une pause déjeuner est possible.
4. Un jour de repos doit être accordé pour chaque intervenant au cours de l'horizon de temps

Contraintes de continuité

La continuité de soins semble constituer un élément majeur de la satisfaction des patients. Nous distinguons deux types de continuité.

Tout d'abord, nous définissons la continuité humaine comme la garantie que chaque patient ne soit visité que par un nombre réduit d'intervenants. Le secteur du soin à domicile mettant en relation du personnel soignant et des personnes fragiles, les liens sociaux entre les différents protagonistes jouent un rôle crucial dans la satisfaction du patient, qui appréciera grandement de toujours recevoir des visites d'intervenants connus, et ce malgré les éventuels changements de personnel au sein de la structure. Selon la pathologie et le caractère du patient, l'interprétation du "nombre réduit d'intervenants" diffère. Il convient donc d'adapter cette notion en introduisant une tolérance spécifique à chaque patient. Nous parlons de continuité stricte lorsqu'un patient n'est strictement visité que par des intervenants déjà connus.

Ensuite, nous nous intéressons à la continuité temporelle, ou continuité horaire. En général, les patients restent dans les structures sur de longues périodes (hors hospitalisation à domicile), et requièrent sensiblement les mêmes services à intervalles réguliers. Les plannings étant établis à la semaine ou au mois, il s'agit de conserver ici aussi une continuité par rapport au planning initial, en évitant de changer les habitudes des patients. Il faut donc veiller à ce que les horaires des soins ne changent pas, ou en limiter les variations. Là encore, une continuité temporelle stricte désigne le fait de garder les horaires d'intervention fixes.

Dans le problème que nous étudions ici, la continuité temporelle est stricte. Pour ce qui est de la continuité humaine, nous verrons qu'imposer une continuité stricte pour tous les patients pourrait empêcher l'existence d'une solution réalisable. Ainsi, nous adoptons une stratégie plus flexible, que nous détaillons dans la section suivante.

4.3.3 Objectifs

Le roulement du personnel peut être limité en proposant de bonnes conditions de travail. Ainsi, nous choisissons d'optimiser trois critères qui semblent jouer un rôle dans la pénibilité du travail d'aide à domicile, à savoir :

1. La minimisation des temps de trajets. Les employés des structures à domicile utilisent leur propre véhicule pour se déplacer. Les temps de trajets sont à la fois peu rémunérés, et considérés comme du temps perdu, donc particulièrement mal vécus par les intervenants.

Exemple : pour l'intervenant 1, nous décomptons $15+15 = 30$ minutes de trajet dans la journée

2. La minimisation des temps d'attente. Lors d'une journée de travail, les temps d'inactivité entre deux services sont également très mal perçus par les intervenants. Au delà de 15 minutes d'attente entre deux services, temps de trajet non compris,

cela est considéré comme une pause : ni compté comme du temps de travail, ni rémunéré. Ce temps de pause entre deux interventions, dans une voiture, sans infrastructure adaptée (machine à café, fauteuil, etc.) est seulement ressenti comme du temps perdu. Lorsque les intervenants ont une pause de plus de 90 minutes, on considère toutefois qu'ils ont le temps de rentrer chez eux, et de mettre à profit ce temps libre, qui constitue une réelle interruption dans la tournée. Cependant, de trop nombreuses pauses même très longues, ne sont pas souhaitables dans une même journée de travail. Ainsi, nous choisissons de décompter le temps d'attente comme la somme de tous les temps d'inactivité entre deux services consécutifs, de laquelle nous retirons uniquement la plus grande pause supérieure à 90 minutes de la journée, si elle existe.

Cela permet de prendre en compte le ressenti négatif des intervenants vis à vis de ces temps d'inactivité, et de proposer des tournées satisfaisantes. *Exemple : pour l'intervenant 1, le temps d'attente ainsi calculé est de $45+45 = 90$ minutes. Pour l'intervenant 2, il est de $(105+45+165)-165=150$ minutes ; et de $(15 +45 +135) - 135 = 60$ minutes pour l'intervenant 3.*

Notons qu'au sens des CCN, c'est l'intervenant 3 qui a le plus d'attente dans la journée (puisque au delà de 15 minutes consécutives, on considère qu'il est en pause), alors qu'au contraire, il est considéré comme celui ayant le moins d'attente dans notre définition du temps d'attente comme objectif à minimiser.

3. La minimisation de l'amplitude d'une journée de travail. La minimisation du temps d'attente comme évoqué précédemment peut provoquer la création de tournées avec une large pause en milieu de journée, mais une prise et fin de service éloignés dans le temps. Nous nous intéressons donc également à la conception de tournées les plus compactes possibles.

Exemple : pour l'intervenant 1, l'amplitude de la tournée est de 8.5 heures.

Nous optimisons chacun de ces critères d'optimisation individuellement, et observons le comportement de chacun des deux autres critères.

4.4 Formulation mathématique

Modèle HHCRSP 2 : Formulation pour la replanification sur horizon long

Données et notations

Nous reprenons les notations déjà évoquées dans la section précédente. Comme les tournées des intervenants doivent impérativement commencer et finir depuis leur lieu de résidence, nous introduisons deux services fictifs, α et β , représentant respectivement un début et une fin de tournée.

\mathcal{S}_d	ensemble des services requis le jour d
\mathcal{S}_p	ensemble des services requis par le patient p
$\mathcal{S}^* = \mathcal{S} \cup \{\alpha, \beta\}$	ensemble des services incluant les services fictifs
$\mathcal{S}_d^* = \mathcal{S}_d \cup \{\alpha, \beta\}$	ensemble des services requis le jour d incluant les services fictifs
$\mathcal{S}_p^* = \mathcal{S}_p \cup \{\alpha, \beta\}$	ensemble des services requis par le patient p incluant les services fictifs
\mathcal{P}_σ	ensemble de patients sous le seuil de continuité
t_{ij}	temps de trajet entre les services i et j
$w_{ij} = f_j - g_i - t_{ij}$	temps d'inactivité entre les services i et j
e_{ij}	temps de travail effectif impliqué par la réalisation consécutive de i et j , au sens des CCN

Variables de décision

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{si l'intervenant } k \text{ effectue consécutivement les services } i \text{ et } j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$b_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{si la plus grande pause supérieure à 90 minutes de l'intervenant } k \\ & \text{s'effectue entre les services } i \text{ et } j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$l_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{si la pause déjeuner de l'intervenant } k \text{ s'effectue entre les services } i \text{ et } j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$z_{kp} = \begin{cases} 1 & \text{si l'intervenant } k \text{ fournit un service au patient } p \text{ durant l'horizon considéré} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Fonctions objectif

$$\min \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{i \in \mathcal{S}_d} g_i \times x_{i\beta k} - f_i \times x_{\alpha i k} \quad (4.1)$$

$$\min \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{i \in \mathcal{S}} \sum_{j \in \mathcal{S}} t_{ij} \times x_{ijk} \quad (4.2)$$

$$\min \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{i \in \mathcal{S}} \sum_{j \in \mathcal{S}} w_{ij} \times (x_{ijk} - b_{ijk}) \quad (4.3)$$

Contraintes de flot

$$\sum_{i \in \mathcal{S}_d} x_{\alpha i k} \leq 1 \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad \forall d \in \mathcal{D} \quad (4.4)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{S}_d} x_{i\beta k} \leq 1 \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad \forall d \in \mathcal{D} \quad (4.5)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{S}^*} x_{ijk} = \sum_{j \in \mathcal{S}^*} x_{jik} \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad \forall i \in \mathcal{S} \quad (4.6)$$

Contraintes générales

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{j \in \mathcal{S}^*} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in \mathcal{S} \quad (4.7)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{S}^*} x_{ijk} \times (q_k - \rho_j) \geq 0 \quad \forall j \in \mathcal{S}, \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (4.8)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{S}^*} x_{ijk} = 0 \quad \forall i \in \mathcal{S} \text{ tels que } [f_i, g_i] \not\subset I_k \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (4.9)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{S}_p^*} \sum_{j \in \mathcal{S}_p} \sum_{k \in \mathcal{K}_p} x_{ijk} = 0 \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad (4.10)$$

$$x_{ijk} \times (f_j - g_i - t_{ij}) \geq 0 \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad \forall i, j \in \mathcal{S} \quad (4.11)$$

Contraintes liées au calcul de l'objectif 4.3

$$\sum_{i \in \mathcal{S}_d} \sum_{j \in \mathcal{S}_d} b_{ijk} \leq 1 \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad \forall d \in \mathcal{D} \quad (4.12)$$

$$b_{ijk} \leq x_{ijk} \times \max(0; 91 - f_j + g_i + t_{ij}) \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad \forall i, j \in \mathcal{S} \quad (4.13)$$

Contraintes légales

$$\sum_{i \in \mathcal{S}^*} \sum_{j \in \mathcal{S}^*} x_{ijk} \times e_{ij} \leq h_k \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (4.14)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{S}_d^*} \sum_{j \in \mathcal{S}_d^*} x_{ijk} \times e_{ij} \leq E_{max} \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad \forall d \in \mathcal{D} \quad (4.15)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{S}_d} (g_i \times x_{i\beta k} - f_i \times x_{\alpha i k}) \leq A_{max} \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad \forall d \in \mathcal{D} \quad (4.16)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{S}} x_{\alpha i k} < D \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (4.17)$$

$$\sum_{(i,j) \in \mathcal{S}_d^{*2} \cap \mathcal{L}_{ij}} l_{ijk} = 1 \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad \forall d \in \mathcal{D} \quad (4.18)$$

$$l_{ijk} \leq x_{ijk} \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad \forall i, j \in \mathcal{S}^* \quad (4.19)$$

Contraintes de continuité

$$z_{kp} \geq \sum_{i \in \mathcal{S}^*} x_{ijk} \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad \forall j \in \mathcal{S}_p \quad (4.20)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} z_{kp} \leq \tau_p \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad (4.21)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{S}^*} \sum_{k \in \mathcal{K} \setminus \mathcal{K}_p} x_{ijk} = 0 \quad \forall j \in \mathcal{S}_p \quad \forall p \notin \mathcal{P}_\sigma \quad (4.22)$$

Domaines de définition

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathcal{S}, \quad \forall j \in \mathcal{S}, \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (4.23)$$

$$b_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathcal{S}, \quad \forall j \in \mathcal{S}, \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (4.24)$$

$$l_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathcal{S}, \quad \forall j \in \mathcal{S}, \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (4.25)$$

$$z_{kp} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad (4.26)$$

La fonction objectif 4.1 permet de minimiser la somme des amplitudes des journées de travail de tous les intervenants. Le deuxième objectif 4.2 permet de minimiser les temps de trajets, à l'exception des premiers et derniers trajets de chaque tournée, tandis que le troisième objectif (4.3) concerne la minimisation des temps d'attente, desquels on ôte chaque jour, et pour chaque intervenant, la plus grande pause supérieure à 90 minutes si elle existe (4.12, 4.13).

Nous nous assurons que les tournées commencent et finissent aux domiciles des intervenants avec les contraintes 4.4 et 4.5. La contrainte 4.6 assure la conservation du flot.

La couverture de tous les services est garantie par 4.7. Seuls des services compatibles peuvent être exécutés consécutivement (4.11); les intervenants doivent être disponibles (4.9), avoir les qualifications requises pour délivrer un service (4.8) et ne pas être incompatibles avec le patient concerné (4.10).

Les contraintes 4.14 à 4.17 modélisent les contraintes légales, à savoir : la limitation du temps effectif de travail durant l'horizon, la limitation du temps effectif de travail quotidien, la limitation de l'amplitude d'une tournée, et l'attribution d'un jour de repos. Chaque intervenant doit bénéficier d'une pause déjeuner pendant l'intervalle de temps \mathcal{L} (4.18, 4.19).

La continuité humaine est garantie par les contraintes 4.20, 4.21 et 4.22.

Enfin, les domaines de définition des variables de décision sont définis par les contraintes 4.23 à 4.26.

4.5 Méthode de résolution : SRO

La méthode de résolution **Strategic Re-Optimization (SRO)** que nous proposons se base sur une décomposition du problème, que nous approchons en deux étapes. Il s'agit dans un premier temps de construire des tournées journalières admissibles pour chaque intervenant, puis de sélectionner dans un second temps la meilleure combinaison de tournées pour établir un planning complet pour la structure. En tout premier lieu, il convient donc de modéliser notre problème par des graphes, construits de telle manière qu'un chemin dans ce graphe représente une tournée de soins. Le déroulé général de l'algorithme apparaît dans la figure 4.2.

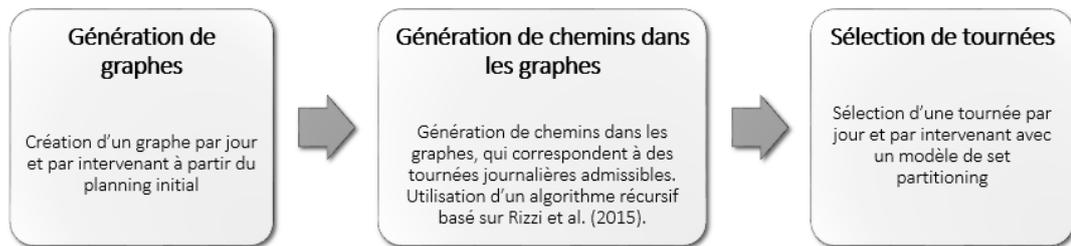


FIGURE 4.2 – Déroulé global de l'algorithme SRO

4.5.1 Génération de graphes

Nous commençons par générer un ensemble de graphes, un par jour et par intervenant, pour modéliser notre problème. Pour un graphe particulier, l'ensemble des sommets représente l'ensemble des services qui pourraient être fournis par cet intervenant. Dans notre cas, il s'agit donc des services pour lesquels l'intervenant est qualifié, dont les horaires correspondent à ses disponibilités, et dont le patient requérant est compatible avec les contraintes de continuité du problème. À cet ensemble de sommets, nous ajoutons deux services fictifs, une source et un puits, représentant les points de départ et d'arrivée d'une tournée. Puis nous créons des arcs entre tous les couples de services susceptibles d'être réalisés consécutivement par le même intervenant. Il s'agit donc de s'assurer que les horaires des deux services sont compatibles, en particulier en ce qui concerne le trajet entre les domiciles des deux patients concernés. Un chemin de la source jusqu'au puits représente un enchaînement de services compatibles, c'est-à-dire une tournée journalière. Cette tournée sera dite **admissible** si elle respecte toutes les contraintes légales journalières.

Notons $G_{kd}(V_{kd}, \mathcal{E}_{kd})$ le graphe correspondant à l'intervenant k pour le jour d et détaillons de manière complète la construction d'un tel graphe. Nous illustrons ce processus dans la figure 4.3 qui présente le graphe associé à l'intervenant 1 de l'exemple présenté dans la figure 4.1.

Sommets

Les sommets du graphe correspondent aux services pouvant être fournis par l'intervenant k . Plus précisément, pour tout service $s \in \mathcal{S}$ requis par un patient p , nous ajoutons un sommet v_s à V_{kd} si les conditions suivantes sont respectées :

1. le patient requérant le service connaît l'intervenant : $k \in \mathcal{K}_p$
2. l'intervenant est disponible pour délivrer le service : $[f_s, g_s] \subset I_k$
3. l'intervenant a les compétences nécessaires pour délivrer le service : $q_k \geq \rho_s$

Si un patient est un nouvel arrivant dans la structure, alors il ne connaît aucun intervenant. Ainsi, pour tout service qu'il requiert, nous ajoutons un sommet à chaque graphe correspondant à un intervenant capable d'effectuer le service, c'est à dire un intervenant remplissant les conditions 2 et 3.

De manière similaire, si un intervenant est nouveau dans la structure, alors il n'est connu d'aucun patient, et son graphe reste vide. Pour pallier ce biais, nous faisons appel au seuil σ et à l'ensemble \mathcal{P}_σ des patients sous le seuil, alors pour chaque service requis par $p \in \mathcal{P}_\sigma$ nous ajoutons des sommets dans les graphes des intervenants capables d'effectuer le service. Pour les patients dont beaucoup d'intervenants connus ont quitté la structure, l'utilisation de ce seuil permet également de les réaffecter et de garantir que les services pourront être effectués. Pour ces patients, la continuité humaine n'est pas garantie à cette étape puisque les services qu'ils requièrent peuvent encore être affectés à tous les intervenants capables de les effectuer. Nous devons appliquer cette contrainte plus tard dans le processus de sélection des tournées (cf 5.5.4).

Pour chaque graphe G_{kd} , nous ajoutons également deux sommets fictifs : une source α_{kd} et un puits β_{kd} . Ils représentent le domicile de l'intervenant, duquel les tournées doivent commencer et s'achever.

Afin de simplifier la lecture, nous ferons désormais abstraction des indices k et d , puisque nous allons travailler de manière similaire sur chaque graphe, indépendamment des caractéristiques de l'intervenant à qui ils correspondent, ou du jour auxquels ils sont liés.

Arcs

Nous plaçons un arc entre deux sommets pouvant être effectués de manière consécutive :

- i) αv : la source est reliée à tous les sommets du graphe
- ii) $v \beta$: tous les sommets du graphe sont reliés au puits
- iii) $v_i v_j$: où les services i et j sont compatibles, c'est à dire qu'un intervenant est en mesure d'effectuer de manière consécutive les deux services sans que les horaires ne se chevauchent, en comptant le temps de trajet nécessaire entre les deux services

Poids

A présent, il s'agit d'affecter des poids à chacun de ces arcs. Considérons l'arc $v_i v_j \in \mathcal{E}_{kd}$. Nous lui attribuons les poids suivants :

- i) t_{ij} : temps de trajet entre les domiciles des patients requérant les services i et j . Pour les arcs venant de la source ou allant vers le puits, ce poids est nul puisque les premiers et derniers trajets d'une tournée ne sont jamais comptabilisés, d'après les CCN.
- ii) $a_{ij} = f_j - f_i$: amplitude induite par l'enchaînement des services i et j . Cela comprend la durée du service i , le temps de trajet et le temps d'inactivité entre les deux services. Ce poids est nul pour les arcs venant de la source α .
- iii) $e_{ij} = g_i - f_i + t_{ij} + w_{ij}^{CCN}$ où $w_{ij}^{CCN} = 0$ si $w_{ij} \geq 15$ minutes, et w_{ij} sinon. e_{ij} représente le temps de travail effectif induit par la réalisation successive des services i et j , et w_{ij}^{CCN} est le temps d'attente compté comme du temps de travail dans les CCN.

Pour tout chemin c de la source aux puits, nous noterons

$$A_c = \sum_{(ij) \in \mathcal{E} \cap c} a_{ij}$$

et

$$E_c = \sum_{(ij) \in \mathcal{E} \cap c} e_{ij}$$

l'amplitude et le temps effectif de travail induits.

Notons ici que pour les patients n'appartenant pas à \mathcal{P}_σ , la contrainte de continuité humaine est garantie de par la construction du graphe. Les contraintes de disponibilité, de continuité temporelle et de qualification sont également assurées lors de cette étape de construction du graphe.

Exemple

Construisons alors le graphe associé pour l'intervenant 1 de l'exemple présenté en Figure 4.1. Supposons que cet intervenant a le niveau de qualification 0, et qu'il est disponible toute la journée. Au vu des règles de construction énoncées précédemment, nous en déduisons que :

- les services 4, 6, 10 et 11 n'apparaissent pas dans le graphe car ils requièrent un niveau de qualification supérieur à celui de l'intervenant
- les services 1, 2, 3 et 9 apparaissent dans le graphe car l'intervenant est qualifié, disponible, et connu des patients concernés
- les services 7 et 8 n'apparaissent pas car

$$\frac{\text{nombre d'intervenants connus par le patient F}}{\tau_F} = \frac{2}{3} > \sigma$$

— le service 5 apparaît car

$$\frac{\text{nombre d'intervenants connus par le patient D}}{\tau_D} = \frac{1}{3} < \sigma$$

Nous ajoutons sur chaque arc les poids (a_{ij}, e_{ij}) comme définis précédemment (en minutes). Le graphe ainsi créé est représenté dans la Figure 4.3. Pour une meilleure lisibilité, nous dessinons les arcs reliant un sommet à la source ou au puits en gris, et les poids sur les arcs (ij) ont la couleur du service i et nous n'ajoutons pas les poids correspondant aux temps de trajet sur le graphe puisque nous avons pris l'hypothèse que $t_{ij} = 15$ pour chaque couple de noeuds.

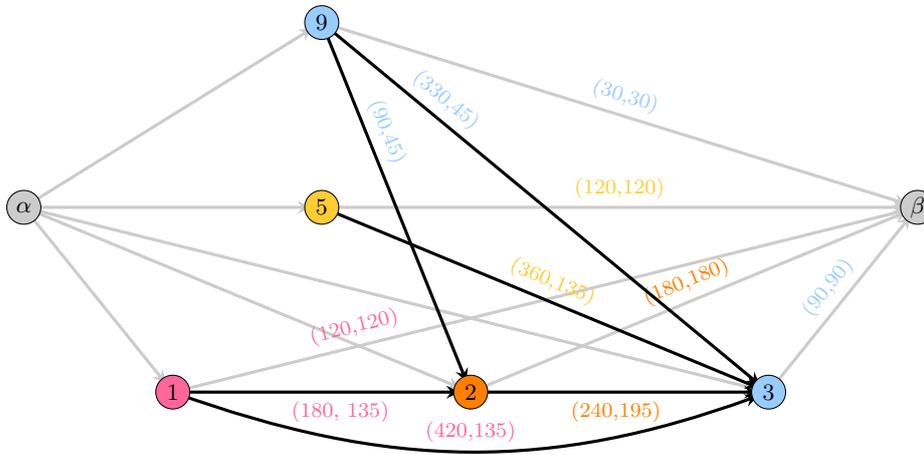


FIGURE 4.3 – Graphe associé pour l'intervenant 1

4.5.2 Génération de tournées

Pour chaque graphe, nous devons générer l'ensemble des chemins dits admissibles de la source jusqu'au puits, qui correspondent à l'ensemble des tournées journalières admissibles. C'est à dire que nous construisons des enchaînements de services tels que les contraintes légales exposées précédemment (cf 1, 2, et 3) sont respectées. Pour qu'un chemin soit **admissible**, son amplitude et temps de travail effectif induits doivent être inférieurs à l'amplitude maximale légale A_{max} , et au temps de travail effectif maximal légal E_{max} . Nous devons également nous assurer qu'une pause déjeuner est accordée selon les règles des CCN.

L'algorithme `pathGeneration(G, k, d)` (Algorithme 3), permet de lister l'ensemble des chemins c du graphe G tels que l'octroi de la pause déjeuner est garanti, et tels que

$$A_c < A_{max} \text{ et } E_c < E_{max}$$

Nous supposons que toutes les données du problème sont accessibles en tant que variables globales. Nous détaillons à présent les différentes étapes de l'algorithme.

Algorithme 3 pathGeneration(k, d)

```

 $E_{min} \leftarrow \text{MINBOUND}(k, d, \mathcal{S}_d)$  ▷ calcul de bornes inférieures

for all  $v \in V$  do :
   $c_{A_+}^v \leftarrow \text{SHORTAMPLITUDE}(v, G)$  ▷ calculs de plus courts/longs chemins
   $c_{E_+}^v \leftarrow \text{SHORTEFFWT}(v, G)$ 
   $c_{E_-}^v \leftarrow \text{LONGEFFWT}(v, G)$ 

return RECPATHGENERATION( $\alpha, \beta, A_{max}, E_{max}, E_{min}, \text{false}, \{\alpha\}$ ) ▷ voir Algorithme 4

```

Calcul d'une borne inférieure pour le temps effectif de travail : minBound(k, d, \mathcal{S}_d)

Les contraintes légales nous fournissent des bornes supérieures sur le poids des chemins à créer. Il est également possible de déterminer des bornes inférieures sur la durée minimale de travail effectif d'une tournée. Cette borne, que nous noterons E_{min} , est spécifique à chaque intervenant chaque jour, et doit donc être recalculée pour chaque graphe étudié.

Une première étape consiste à calculer la durée totale de service requise, et de comparer cette durée au travail maximal théorique que peuvent effectuer les autres intervenants. Alors, nous obtenons une durée minimale de temps de travail effectif pour la durée d'une tournée.

Dans l'exemple 4.1, cherchons à établir une borne inférieure pour l'intervenant 2, en supposant que $E_{max} = 7$ heures. 16 heures de services sont requises au total, et comme les deux autres intervenants sont disponibles toute la journée, ils sont uniquement limités par E_{max} et peuvent au maximum travailler 7 heures chacun : il reste donc 2h de services qui seront nécessairement attribuées à l'intervenant 2. $E_{min} \geq 2h$

Notons que cette borne est ici très naïve, mais dans des cas où les plannings sont surchargés, et où les intervenants ne sont pas disponibles toute la journée, ces bornes peuvent être bien meilleures.

Une seconde étape consiste à regarder, lorsque plusieurs services sont requis simultanément, combien d'intervenants sont disponibles et qualifiés pour intervenir. Si il y a autant d'intervenants que de services en simultané, alors au moins un de ces services devra être réalisé par l'intervenant pour lequel on calcule la borne inférieure. On peut donc additionner les durées des services les plus courts à chaque fois que cette configuration se produit.

Dans l'exemple 4.1, on voit que les services 1, 5 et 9 doivent être effectués par des inter-

venants différents. Donc l'intervenant 2 aura au moins $\min\{\delta_1, \delta_5, \delta_9\} = 0.5h$ de service dans la journée. De la même manière, on voit que les services 6 et 11 doivent être réalisés par deux intervenants différents puisqu'il faut aussi tenir compte des 15 minutes de trajet (non représentées sur la figure), et comme l'intervenant 1 n'est pas assez qualifié, seuls deux intervenants sont disponibles pour intervenir. L'intervenant 2 aura au moins $\min\{\delta_6, \delta_{11}\} = 2h$ de service supplémentaire. Ainsi $E_{min} \geq 2.5h$. Ces déductions sont illustratives de la méthode, nous ne les listons pas toutes pour l'exemple étudié.

Nous gardons ensuite la plus grande des valeurs calculée pour notre borne E_{min} . Dans notre exemple pour l'intervenant 2, nous obtenons $E_{min} = 2.5h$.

Calcul de plus courts/plus longs chemins : `shortAmplitude`, `shortEffWT`, `longEffWT`

Pour chaque sommet v du graphe, nous calculons en temps linéaire [25] :

- le plus court chemin de v jusqu'à β au sens de l'amplitude, noté c_{A+}^v
- le plus court chemin de v jusqu'à β au sens du temps effectif de travail, noté c_{E+}^v
- le plus long chemin de v jusqu'à β au sens du temps effectif de travail, noté c_{E-}^v

Construction des chemins admissibles : `recPathGeneration` (Algorithme 4)

Nous appelons ensuite `recPathGeneration` (cf Algorithme 4) qui visite récursivement les noeuds du graphe afin de retourner tous les chemins de α à β tels que les trois bornes évoquées précédemment soient respectées et tels qu'une pause déjeuner puisse être octroyée selon les règles de la CCN.

Pour construire un chemin admissible c , nous commençons depuis la source du graphe. Ensuite, pour chaque voisin v , nous regardons s'il est susceptible d'appartenir à un chemin admissible. Pour cela, nous vérifions que

$$A_{c_{A+}^v} \leq A_{max}$$

$$E_{c_{E+}^v} \leq E_{max}$$

$$E_{c_{E-}^v} \geq E_{min}$$

Nous vérifions aussi que l'ajout de cet arc est compatible avec l'octroi d'une pause déjeuner. La fonction `isLunchEligible` (complexité constante) permet de signaler les arcs qui permettent une pause déjeuner ; et `isLunchPossibleAfter` (complexité constante) permet de signaler si l'horaire de pause déjeuner sera dépassé avec l'ajout de cet arc. Si ces deux fonctions renvoient `false`, ou si l'une des conditions précédentes n'est pas respectée, cela signifie qu'ajouter le sommet au chemin $c_{\alpha u}$ ne permettra pas de construire de tournée admissible, donc nous arrêtons la recherche et remontons dans l'arbre de récursion.

Dans le cas contraire, le sommet est accepté et nous le rajoutons au chemin en construction, qui devient $c = \{\alpha, v\}$. Il s'agit ensuite de mettre à jour les bornes pour la suite du chemin à construire, en retirant l'amplitude et le temps effectif de travail impliqués par l'ajout de ce service. Le booléen b est également mis à jour et passe à *true* si `isLunchEligible` renvoie *true*.

Ainsi, nous construisons récursivement tous les chemins admissibles dans le graphe, en éliminant au fur et à mesure l'exploration des sommets non-prometteurs. Cet algorithme est inspiré de l'algorithme présenté par Rizzi et al. [203], dans lequel les auteurs présentent une méthode efficace pour lister des chemins de longueur bornée dans un graphe. L'algorithme est à délai polynomial, ce qui signifie que le temps de calcul entre deux chemins admissibles est polynomial. La preuve de complexité complète peut être trouvée dans l'article [203]. Toutefois, si les graphes sont denses, le nombre de chemins admissibles est exponentiel, alors le temps nécessaire pour lister tous les chemins l'est également.

Exemple

Reprenons le graphe présenté en figure 4.3 et déroulons un exemple de l'algorithme. Dans la figure 4.4, nous reprenons les informations précédemment introduites, et nous rajoutons sur les arcs des croix noires, signalant les arcs renvoyant *true* lorsque passés en paramètre de `isLunchEligible`.

Supposons que nous appelions `recPathGeneration(9, β , 480, 420, 150, false, $\{\alpha, 9\}$)`. Alors nous visitons tous les voisins du sommet 9.

- Figure 4.5a : le sommet β est refusé car la borne inférieure pour le temps de travail effectif est violée ($E_c = 30 < 150$).
- Figure 4.5b : le sommet 2 est accepté car toutes les contraintes sont respectées. On ajoute donc l'arc au chemin, et on fait l'appel récursif : `recPathGeneration(2, β , 390, 375, 105, true, $\{\alpha, 9, 2\}$)`. On visite désormais les voisins de 2.
 - Figure 4.5c : le sommet 3 est refusé car la contrainte de pause déjeuner est violée.
 - Figure 4.5d : le sommet β est accepté car toutes les contraintes sont respectées. On fait un appel récursif `recPathGeneration(β , β , 210, 195, 0, true, $\{\alpha, 9, 2, \beta\}$)`, qui s'interrompt immédiatement puisque nous avons atteint le puits du graphe. Nous sauvegardons le chemin admissible $\{\alpha, 9, 2, \beta\}$.
 - tous les voisins du sommet 2 ont été visités, nous remontons d'un niveau dans l'arbre de récursion.
- etc.

Algorithme 4 $\text{recPathGeneration}(u, t, A_+, E_+, E_-, b, c_{\alpha u})$

Input:

$c_{A_+}^v$: le plus court chemin de v à β au sens de l'amplitude
 $c_{E_+}^v$: le plus court chemin de v à β au sens du temps effectif de travail
 $c_{E_-}^v$: le plus long chemin de v à β au sens du temps effectif de travail
 u, t : sommets du graphe
 A_+ : borne supérieure pour l'amplitude
 E_+ : borne supérieure pour le temps effectif de travail
 E_- : borne inférieure pour le temps effectif de travail pour l'intervenant k
 b : variable booléenne qui garantit une pause déjeuner durant la journée
 $c_{\alpha u}$: chemin de α à u dans le graphe

Output: tous les chemins c_{ut} (A_+, E_+, E_-)-bornés tels que $c_{\alpha u} \cdot c_{ut}$ respectent la contrainte de pause déjeuner.

if $u = t$ **then**
 return $c_{\alpha u}$

for all $v \in V$ such that $(uv) \in \mathcal{E}$ **do**

$A'_+ \leftarrow A_+ - a_{uv}$
 $E'_+ \leftarrow E_+ - e_{uv}$
 $E'_- \leftarrow E_- - e_{uv}$
 $b' \leftarrow b \parallel \text{ISLUNCHELIGIBLE}(uv)$

if $(A_{c_{A_+}^v} < A'_+) \ \& \ (E_{c_{E_+}^v} < E'_+) \ \& \ (E_{c_{E_-}^v} > E'_-) \ \&$
 $(b' \parallel \text{ISLUNCHPOSSIBLEAFTER}(v))$ **then**
 $\text{RECPATHGENERATION}(v, t, A'_+, E'_+, E'_-, b', c_{\alpha u} \cdot (uv))$

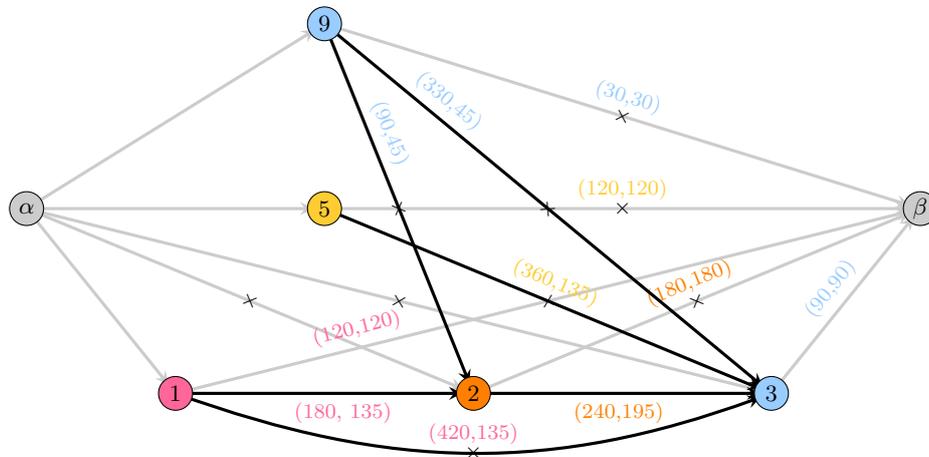
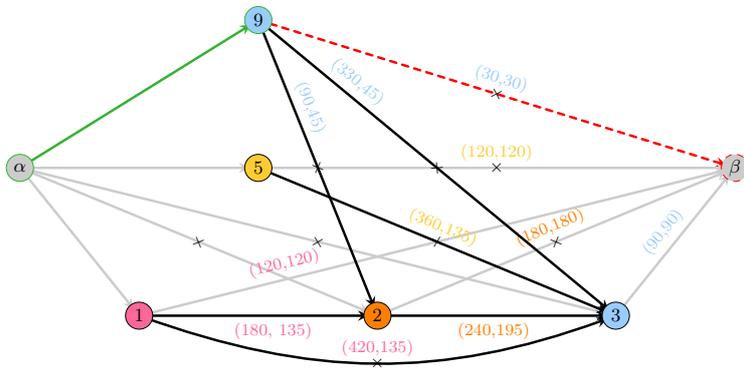


FIGURE 4.4 – Graphe associé à l’intervenant 1 avec signalement des arcs compatibles avec la contrainte de pause déjeuner

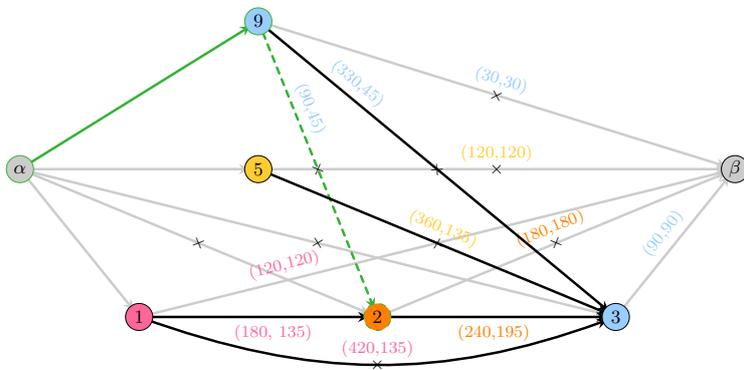
4.5.3 Sélection de tournées

A présent, nous disposons d’un ensemble de tournées journalières admissibles pour chaque intervenant chaque jour. Il s’agit de sélectionner une tournée de chacun de ces ensembles, afin de créer un emploi du temps pour tous les employés de la structure sur l’horizon considéré, de telle sorte que toutes les contraintes hebdomadaires ou mensuelles (selon l’horizon choisi) soient respectées, et que tous les services soient délivrés. A cette étape, nous devons nous assurer que les contraintes hebdomadaires sont bien respectées (temps effectif de travail hebdomadaire, jour de repos), et que la continuité humaine est également respectée pour tous les patients.

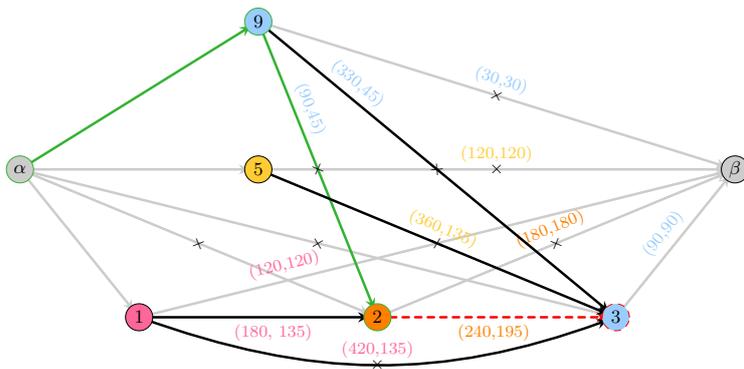
Nous résolvons cette deuxième partie du problème avec un MILP, basé sur un modèle de partitionnement d’ensemble (Modèle SP1) .



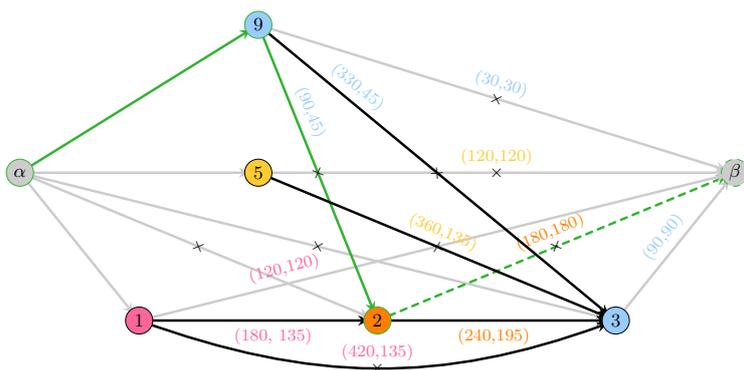
(a) Refus du sommet β



(b) Acceptation du sommet 2



(c) Refus du sommet 3



(d) Acceptation du sommet β

Modèle SP 1 : Modèle de partitionnementDonnées et notations

$\mathcal{T}_{kd} \in \mathbb{N}$	ensemble des tournées admissibles de l'intervenant k le jour d . Ajoutons-y la tournée vide qui représente un jour de repos, indexée par $j = 0$.
$w_{kdj}^{OBJ} \in \mathbb{N}$	temps d'attente au sens de l'objectif de la tournée j de l'intervenant k le jour d
$e_{kdj} \in \mathbb{N}$	temps effectif de travail de la tournée j de l'intervenant k le jour d
$a_{kdj} \in \mathbb{N}$	amplitude de la tournée j de l'intervenant k le jour d
$t_{kdj} \in \mathbb{N}$	temps de trajet de la tournée j de l'intervenant k le jour d
$b_{kdj}^s \in \{0, 1\}$	vaut 1 si le service s est couvert par la tournée j de l'intervenant k le jour d , 0 sinon
$y_{dp}^s \in \{0, 1\}$	vaut 1 si le service s du jour d est requis par le patient p , 0 sinon

Variables de décision

$$x_{kdj} = \begin{cases} 1 & \text{si l'intervenant } k \text{ effectue la tournée } j \text{ durant le jour } d \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$$z_{kp} = \begin{cases} 1 & \text{si l'intervenant } k \text{ visite le patient } p \text{ durant l'horizon de temps} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Objectif

$$\min \sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{j=0}^{N_{kd}} O_{kdj} \times x_{kdj} \quad (4.27)$$

$$\text{où } O_{kdj} = \begin{cases} w_{kdj}^{OBJ} & \text{pour minimiser les temps d'attente} \\ a_{kdj} & \text{pour minimiser l'amplitude} \\ t_{kdj} & \text{pour minimiser les temps de trajet} \end{cases}$$

Contraintes

$$\sum_{j=0}^{|\mathcal{T}_{kd}|} x_{kdj} = 1 \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad \forall d \in \mathcal{D} \quad (4.28)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{j=0}^{|\mathcal{T}_{kd}|} b_{kdj}^s \times x_{kdj} = 1 \quad \forall d \in \mathcal{D}, \forall s \in \mathcal{S}_d \quad (4.29)$$

$$\sum_{d \in \mathcal{D}} x_{kd0} \geq 1 \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (4.30)$$

$$\sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{j=0}^{|\mathcal{T}_{kd}|} e_{kdj} \times x_{kdj} < h_k \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (4.31)$$

$$z_{kp} \geq y_{dp}^s \times \sum_{j=0}^{|\mathcal{T}_{kd}|} x_{kdj} \times b_{kdj}^s \quad \forall p \in \mathcal{P}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad \forall d \in \mathcal{D}, \quad \forall s \in \mathcal{S}_d \quad (4.32)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} z_{kp} \leq \tau_p \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad (4.33)$$

$$x_{kdj} \in \{0, 1\} \quad \forall d \in \mathcal{D}, \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad \forall j \in \{1..T_{kd}\} \quad (4.34)$$

$$z_{kp} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad \forall p \in \mathcal{P} \quad (4.35)$$

Notre objectif est de minimiser les temps d'attente (ou l'amplitude, ou encore les temps de trajet) (4.27).

Un tour exactement est assigné à chaque intervenant chaque jour (4.28), et tous les services requis par les patients au cours de l'horizon considéré sont délivrés (4.29). La contrainte (4.30) permet d'assurer que chaque intervenant bénéficie de son jour de repos. Le temps de travail effectif hebdomadaire est limité par la contrainte (4.31). Le nombre d'intervenants maximum délivrant des soins à chaque patient est borné par les contraintes (4.32) et (4.33). Enfin, les contraintes (4.34) et (4.35) précisent les domaines de définition des variables de décision.

4.5.4 Retour sur la prise en compte des contraintes

Ainsi, à chaque étape de l'algorithme SRO, nous garantissons certaines contraintes, comme résumé dans la Figure 4.6

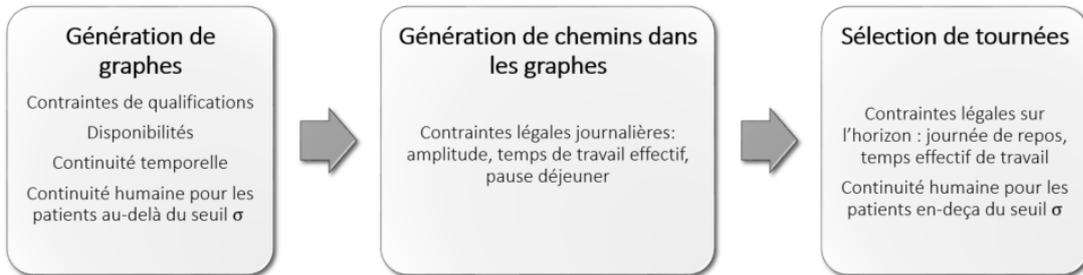


FIGURE 4.6 – Prise en compte des contraintes dans l'algorithme SRO

Etant donné que nous avons généré toutes les tournées admissibles dans la deuxième étape, la solution optimale du MILP est également la solution optimale de notre problème global. Notre méthode est donc bien exacte.

4.6 Expérimentations

Nous avons testé notre algorithme sur des instances construites à partir de données réelles ainsi que sur des données de la littérature, que nous avons adaptées à notre problème. Notre méthode a été implémentée en Java, et le MILP a été résolu avec Cplex. Toutes les expérimentations ont été menées sur une machine avec les caractéristiques suivantes : Intel ®Core™ i5-7440HQ CPU 2.80GHz and 16 GO of RAM.

4.6.1 Instances

Données réelles

Nous travaillons sur une série d'instances issues de données réelles fournies par une agence de service à domicile française. Nous travaillons à partir de plannings prévisionnels et d'informations sur l'évolution des patients et du personnel entre le moment où ces plannings prévisionnels ont été construits, et le moment où ils auraient dû être appliqués. Les caractéristiques de ces instances (set 1 à 3) sont détaillées dans la Table 4.1. Nous notons K le nombre d'intervenants disponibles, P le nombre de patients, et S le nombre de services requis au moment où on applique le planning. Δ_K , Δ_P et Δ_S représentent les variations par rapport aux données du planning initial. Par exemple, si $\Delta_K = +3/-5$, cela signifie que depuis que le planning prévisionnel a été construit, 3 nouveaux intervenants ont intégré la structure, mais 5 intervenants en sont partis. Toutes les instances s'étalent sur un horizon temporel d'une semaine.

Données de la littérature

Nous avons choisi d'adapter les instances proposées par Bredström et Rönnqvist [36] puisqu'elles ont été conçues spécifiquement pour des problèmes de planification dans le domaine du soin à domicile. Etant donné que nous étudions un problème avec horaires fixes, nous avons restreint nos tests aux instances du benchmark avec fenêtres fixes. Afin d'obtenir des demandes hebdomadaires, nous avons dupliqué les données journalières, puis nous avons bâti de manière naïve un premier planning. Les caractéristiques des instances (cas 1 à 6) se trouvent dans la Table 4.1

Nous avons ensuite aléatoirement tiré au sort les intervenants qui devaient être absents, généré de nouveaux intervenants avec des caractéristiques similaires et généré des demandes venant de nouveaux patients. Nous avons conservé le même nombre de patients, d'intervenants et de services pour maintenir la charge de travail constante, et faire en sorte que les instances ainsi modifiées soient réalisables. Pour cette même raison, pour les tests sur les données du benchmark, il a été nécessaire de relâcher la contrainte imposant un jour de repos durant l'horizon considéré, ainsi que la pause déjeuner. Le lecteur notera

également l'importante symétrie présente dans ces instances à cause de la manière dont elles ont été générées. Même si ces symétries auraient pu être exploitées pour améliorer les performances de l'algorithme, la méthode n'a pas été adaptée dans ce sens, puisque les cas réels que nous traitons ne disposent pas de ces propriétés, et nous souhaitons développer une méthode fonctionnelle en pratique.

Instance	Données réelles	Δ_K	K	Δ_P	P	Δ_S	S
set 1	✓	+2/-3	5	+0/-1	11	+0/-22	85
set 2	✓	+2/-3	8	+2/-7	26	+10/-52	156
set 3	✓	+3/-5	15	+7/-10	92	+33/-16	337
cas 1		+1/-1	4	+2/-2	20	+14/-14	140
cas 2		+1/-1	4	+2/-2	20	+14/-14	140
cas 3		+1/-1	4	+2/-2	20	+14/-14	140
cas 4		+1/-1	4	+2/-2	20	+14/-14	140
cas 5		+2/-2	10	+5/-5	50	+35/-35	350
cas 6		+2/-2	10	+5/-5	50	+35/-35	350

TABLE 4.1 – Caractéristiques des instances

4.6.2 Résultats numériques

Pour chaque instance, nous observons individuellement chacun des trois critères optimisés. Nous avons également implémenté un MILP pour le problème complet, afin de comparer les performances de notre algorithme exact en ce qui concerne les temps d'exécution. Nous observons que sur les petites et moyennes instances, les performances sont semblables, mais sur les plus grandes instances, notre algorithme obtient de meilleurs résultats. Les résultats sont détaillés dans la table 4.2.

Dans la colonne **Objectifs**, nous spécifions le critère minimisé : **A** pour l'amplitude, **W** pour le temps d'attente, et **T** pour les temps de trajet. Pour chaque objectif choisi, nous observons également les valeurs atteintes par les deux autres critères (valeurs exprimées en heures). Pour chaque instance, nous avons grisé les meilleures valeurs atteintes par chaque critère. Ensuite, pour chaque configuration, nous regardons les taux d'évolution des deux critères non-optimisés par rapport à leur meilleure valeur pour cette instance (résultats en pourcentages). Par exemple, le taux d'évolution de A se calcule comme

$$\Delta_A = \frac{\text{meilleure valeur de A} - A}{\text{meilleure valeur de A}}$$

où la “meilleure valeur de A” correspond à la valeur de la fonction objectif lorsque l’objectif optimisé est l’amplitude.

Ensuite, nous notons les temps d’exécution (exprimés en secondes) de notre algorithme, et le temps moyen des exécutions du MILP (HHCRSP2) pour les 3 configurations. Rappelons que notre algorithme est une méthode exacte, les temps d’exécution exprimés dans la colonne *CPU* sont donc les temps nécessaires pour atteindre la solution optimale. Lorsque le temps d’exécution est noté **X**, cela signifie qu’aucune solution n’a été trouvée, soit parce que la capacité de Cplex a été dépassée (nombre de variables trop grand), soit parce que la mémoire de l’ordinateur utilisé était insuffisante pour traiter les instances en question.

Pour chaque instance étudiée, notre algorithme atteint la solution optimale. Sur les instances de petite taille (sets 1 et 2, cas 1 à 4), nous observons des performances similaires entre notre méthode et le MILP. Pour les instances les plus grandes, le MILP ne trouve pas de solution alors que notre algorithme atteint la solution optimale en moins de 13 minutes.

Sur la première ligne de la Table 4.2, nous pouvons lire que pour le set 1, la solution optimale quand l’amplitude est minimisée est telle que : l’amplitude vaut 129.2 heures, il y a 25.9 heures de temps d’attente au total, et 11.5h de temps de trajet. Sur la deuxième (respectivement troisième) ligne, nous pouvons lire les caractéristiques de la solution optimale lorsque les temps d’attente (respectivement temps de trajet) sont minimisés.

4.6.3 Analyse des résultats

Pour les instances réelles (sets 1 à 3), nous observons que l’amplitude et les temps d’attente augmentent de manière drastique et atteignent leur valeur la plus haute quand les temps de trajets sont minimisés. Les temps de trajets quant à eux sont à leur maximum quand le critère optimisé est l’amplitude pour les sets 1 et 3, et les temps d’attente pour le set 2.

Sur les grandes instances construites à partir du benchmark (cas 5 et 6), les temps d’attentes se comportent de la même manière. Toutefois, c’est la minimisation des temps d’attente qui engendre les valeurs les plus hautes pour l’amplitude et le temps de trajet. Les variations des temps d’attente et temps de trajet sont beaucoup moins importantes sur les petites instances issues du benchmark (cas 1 à 4), car leur petite taille et la symétrie des données ne laissent pas beaucoup de marge pour créer des tournées différentes : pour chacune des trois configurations d’optimisation, les plannings créés sont toujours très semblables.

Pour rappel, l’amplitude se compose des temps de service, temps d’attente, et temps de trajets. Comme le temps de service total est incompressible, minimiser l’amplitude revient à minimiser conjointement les temps de trajet et les temps d’attente. Notons toutefois que tous les temps d’attente sont pris en compte dans le calcul de l’amplitude,

Instance	Objectif	A (h)	W (h)	T (h)	ΔA (%)	ΔW (%)	ΔT (%)	CPU (s)	CPU_{MILP} (s)
set 1	A	129,2	25,9	11,5	-	254,8	219,4	3,59	5,64
	W	188,7	7,3	8,5	46,1	-	136,1	3,42	
	T	215,7	47,1	3,6	67,0	545,2	-	3,53	
set 2	A	239,7	43,4	18,8	-	329,7	121,2	44,6	46,0
	W	366,8	10,1	19,5	53,0	-	129,4	58,9	
	T	402,5	65,6	8,5	67,9	549,5	-	45,2	
set 3	A	485,4	84,7	22,6	-	166,4	115,2	136,7	X
	W	663,7	31,8	18,3	36,7	-	74,3	102,0	
	T	737,3	133,8	10,5	51,9	320,8	-	94,4	
cas 1	A	266,0	23,0	35,9	-	18,6	14,7	9,70	10,50
	W	279,7	19,4	35,4	5,2	-	13,1	6,80	
	T	273,8	35,0	31,3	2,9	80,4	-	6,10	
cas 2	A	238,0	7,1	37,3	-	14,5	4,8	0,70	7,60
	W	268,6	6,2	38,9	12,9	-	9,3	1,00	
	T	268,6	7,0	35,6	12,9	12,9	-	0,70	
cas 3	A	216,4	10,4	36,9	-	42,5	10,5	1,40	10,80
	W	216,4	7,3	40,0	0,0	-	19,8	1,40	
	T	216,4	13,9	33,4	0,0	90,4	-	1,35	
cas 4	A	269,5	12,5	34,7	-	0,0	8,1	2,90	9,81
	W	269,5	12,5	34,7	0,0	-	8,1	3,50	
	T	272,5	22,5	32,1	1,1	80,0	-	2,90	
cas 5	A	567,9	44,9	97,3	-	65,7	30,6	579	X
	W	578,8	27,1	114,9	1,9	-	54,2	170	
	T	577,4	77,2	74,5	1,7	184,9	-	111	
cas 6	A	534,9	20,3	109,8	-	116,0	31,3	697	X
	W	623,8	9,4	114,3	16,6	-	36,7	446	
	T	605,0	77,3	83,6	13,1	722,3	-	778	

TABLE 4.2 – Résultats de la méthode SRO

alors que nous déduisons la plus grande pause supérieure à 90 minutes dans le calcul des temps d'attente en tant qu'objectif.

Ainsi, dans le cas 3, l'amplitude est la même dans les trois solutions optimales quel que soit le critère optimisé ; tout comme la somme des temps d'attente et temps de trajet. Cela signifie qu'aucune tournée des solutions optimales de cette instance ne contient de pause supérieure à 90 minutes. Dans le cas 4, la solution est exactement la même que l'on minimise l'amplitude ou les temps d'attente, mais lorsqu'on optimise les temps d'attente, l'amplitude augmente de 1.1% alors que les temps de trajet augmentent de 80% : des pauses additionnelles supérieures à 90 minutes sont apparues dans cette dernière configuration.

Globalement, nous observons que les temps d'attente et temps de trajet sont beaucoup plus impactés par le choix de l'objectif que l'amplitude, même si elle peut également varier de manière significative en particulier pour les données réelles. Les plus grandes variations concernent les temps d'attente lorsqu'on optimise les temps de trajet : dans le cas 6 par exemple, ils augmentent de 722 % ! Dans cette configuration plusieurs cas montrent une augmentation de 100% ou plus (sets 1,2,3, cas 5 et 6).

Enfin, il convient de noter que les variations les plus importantes pour les 3 critères apparaissent sur les données réelles. Une première explication réside dans le fait que l'intervalle de temps sur lesquels s'étalent les services requis est plus large dans les cas réels. Ainsi, les journées de travail peuvent démarrer plus tôt et finir plus tard, donc l'amplitude des tournées est susceptible de varier beaucoup plus. Pour la même raison, les temps d'attente sont susceptibles d'être plus élevés. La deuxième explication vient du fait que, dans les données réelles, beaucoup de services durent moins de 30 minutes. Les tournées sont donc composées de plus de services, ce qui implique plus de déplacements, donc encore une fois, plus de variabilité possible dans les temps de trajets.

4.7 Conclusion et perspectives

Dans ce chapitre nous avons présenté une méthode exacte pour réoptimiser des tournées lorsque le roulement du personnel et les évolutions dans la patientèle ont rendu le planning prévisionnel infaisable. Nous avons pris en compte des contraintes légales issues des CCN mais aussi des contraintes issues du terrain, et induites par l'importance de la dimension humaine dans le problème que nous étudions. Deux aspects de la continuité ont été préservés : la continuité humaine, et la continuité temporelle qui est rarement étudiée à notre connaissance.

Quand la plupart des méthodes de la littérature sont des méthodes approchées, nous avons pu proposer une méthode exacte, conçue spécialement pour répondre aux contraintes du problème, et capable de résoudre rapidement des instances de taille réelle (13 minutes dans le pire cas, quelques secondes sur la majorité des instances traitées).

L'observation des différents critères liés à la satisfaction des intervenants a montré

que la minimisation des temps de trajets, qui est souvent étudiée dans la littérature et qui représente aussi un intérêt économique majeur pour la structure, impacte l'amplitude des journées de travail, et les temps d'attente dans la journée.

Dans la mesure où ces trois objectifs semblent essentiels pour assurer le bien être au travail des intervenants, il serait intéressant d'étudier un compromis avec une méthode multi-objectif.

Aussi, afin de résoudre des instances encore plus grandes, pour s'adapter à l'accroissement et au développement des structures de soin à domicile en pleine expansion, il serait pertinent de considérer une version heuristique du problème, en fixant entre autres de nouvelles bornes inférieures sur les longueurs des tournées générées. Ce point sera abordé plus tard dans le chapitre 6 mais gagnerait à être étudié plus amplement sur le plan théorique.

Caractéristiques générales du problème	
D/D	horizon de temps /nombre de jours composant l'horizon
σ	seuil de continuité
A_{max}	amplitude maximale
E_{max}	temps de travail effectif maximal
E_{min}	temps de travail effectif minimal
\mathcal{L}	intervalle de pause déjeuner
Caractéristiques de l'intervenant k	
\mathcal{K}/K	ensemble/nombre d'intervenants
q_k	niveau de compétence
I_k	intervalle de disponibilité
h_k	volume horaire maximal
Caractéristiques du patient p	
\mathcal{P}/P	ensemble/nombre de patients
\mathcal{K}_p	ensemble d'intervenants connus de p
$\hat{\mathcal{K}}_p$	ensemble d'intervenants incompatibles avec p
τ_p	nombre maximal d'intervenants toléré par p
\mathcal{P}_σ	ensemble de patients sous le seuil de continuité σ
Caractéristiques du service s	
\mathcal{S}/S	ensemble/nombre de services
\mathcal{S}_d/S_d	ensemble/nombre de services requis le jour d
\mathcal{S}_p	ensemble de services requis par le patient p
\mathcal{L}_{ij}	ensemble de couples de services entre lesquels une pause déjeuner est possible
δ_s	durée du service s
f_s, g_s	horaires de début et fin du service s
ρ_s	compétence requise
HHCSP2 /SRO	
$G(V, \mathcal{E})$	graphe
$\alpha; \beta$	sommets fictifs
$\mathcal{S}^* \mathcal{S}_d^* \mathcal{S}_p^*$	ensembles $\mathcal{S} \mathcal{S}_d \mathcal{S}_p$ auxquels on ajoute les sommets fictifs α et β
t_{ij}	temps de trajet entre les services i et j
w_{ij}	$= f_j - g_i - t_{ij}$ temps d'inactivité entre i et j
w_{ij}^{CCN}	temps d'attente au sens des CCN entre i et j (page 69)
e_{ij}	$= \delta_i + t_{ij} + w_{ij}^{CCN}$ temps de travail effectif impliqué par la succession de i et j au sens des CCN (page 69)
a_{ij}	amplitude impliquée par la succession de i et j
c_{uv}	chemin de u à v
$A_c; E_c$	amplitude et temps effectif de travail induits par un chemin c
c_{A+}^v	plus court chemin de v jusqu'à β au sens de l'amplitude
c_{E+}^v	plus court chemin de v jusqu'à β au sens du temps effectif de travail
c_{E-}^v	plus long chemin de v jusqu'à β au sens du temps effectif de travail
A_+, E_+, E_-	borne supérieure pour l'amplitude, pour le temps effectif de travail, borne inférieure pour le temps effectif de travail
A'_+, E'_+, E'_-	nouvelles valeurs de A_+, E_+, E_- après ajout d'un sommet
SP1/SRO - pour la tournée j de l'intervenant k le jour d	
\mathcal{T}_{kd}	ensemble des tournées admissibles de l'intervenant k le jour d
u_{kdj}^{OBJ}	temps d'attente au sens de l'objectif défini page 70
e_{kdj}	temps de travail effectif de la tournée
a_{kdj}	amplitude de la tournée
t_{kdj}	temps de trajet de la tournée
b_{kdj}^s	booléen indiquant si le service s est couvert par la tournée
y_{dp}^s	booléen indiquant si le service s est requis par le patient p

TABLE 4.3 – Tableau récapitulatif des notations utilisées dans le chapitre 4

Chapitre 5

Réoptimisation opérationnelle des tournées de soins

Sommaire

5.1	Introduction et motivation	96
5.2	Méthodes multi-objectif pour l'optimisation	97
5.2.1	Positionnement de nos travaux	98
5.3	Description du problème	99
5.3.1	Contraintes	99
5.3.2	Objectifs	100
5.3.3	Exemple illustratif	101
5.4	Formulation mathématique	102
5.5	Méthode de résolution : ORO	105
5.5.1	Génération de graphes	106
5.5.2	Génération de tournées	111
5.5.3	Réparation de tournées	114
5.5.4	Sélection de tournées	117
5.6	Expérimentations	122
5.6.1	Génération et classification des instances	122
5.6.2	Résultats numériques	123
5.6.3	Analyse des résultats	124
5.7	Conclusion	128

Dans ce chapitre, nous étudions un problème de réoptimisation de tournées journalières pour pallier l'absence ponctuelle et imprévue d'un ou plusieurs intervenants. Nous nous plaçons à un niveau décisionnel opérationnel, où la priorité est de préserver la qualité de service. Nous adoptons une approche multi-objectif pour prendre en compte la satisfaction des intervenants et des patients via des objectifs de stabilité originaux.

5.1 Introduction et motivation

Dans le chapitre précédent, nous avons étudié un problème de réoptimisation stratégique pour pallier les variations dans la composition du personnel et de la patientèle. Lorsque nous considérons le départ d'un intervenant par exemple, il s'agissait d'un départ permanent de la structure. Il était donc nécessaire de considérer un horizon long et d'envisager une replanification valable sur le long terme.

Toutefois, les structures de soins et services à domicile sont également confrontées à des perturbations ponctuelles pour lesquelles l'approche présentée précédemment ne convient pas. En effet, nous nous intéressons ici au problème de replanification des tournées de soins suite à l'absence ponctuelle d'un ou plusieurs intervenants. Le domaine du soin à domicile étant sujet à un fort absentéisme¹, ce problème est récurrent pour les planificateurs qui se doivent d'être réactifs et de proposer rapidement des solutions alternatives.

Contrairement au problème étudié dans le chapitre précédent, ces perturbations ne peuvent pas toujours être anticipées et n'impactent les plannings qu'à court terme. Il serait donc particulièrement inefficace d'appliquer la méthode SRO, qui implique une réoptimisation complète du planning alors que nous avons seulement besoin d'une réparation ponctuelle. De plus, puisque la structure n'a pas pu prévoir ces absences, il y a un risque de manque de personnel pour effectuer tous les services requis. Nous nous situons donc à un niveau de décision opérationnel où la priorité est de maintenir une certaine qualité de service.

Lorsqu'un intervenant est malade ou n'est pas en mesure d'effectuer sa tournée journalière, cette dernière ne peut pas simplement être annulée, mais doit plutôt être redistribuée parmi les intervenants présents. Toutefois, ces derniers ont généralement des tournées déjà très compactes et des journées de travail bien chargées, il est donc souvent impossible de complètement réaffecter la tournée concernée.

Si certains soins et services sont indispensables (aide au repas, soins médicaux, etc.), d'autres peuvent éventuellement être annulés (aide ménagère par exemple). D'autre part, certains moments de la journée sont particulièrement chargés, comme les moments des repas par exemple, où beaucoup de services sont requis simultanément. Afin de réduire les conflits d'emploi du temps, une flexibilité peut être introduite sur les horaires de certains services : ils pourront alors commencer un peu plus tôt ou un peu plus tard que prévu. En pratique, cette flexibilité dépend notamment de la nature du service fourni, de la pathologie et des exigences du patient.

La notion de continuité de soins, au centre de nos recherches jusque ici, doit être considérée différemment. En effet, la priorité étant de replanifier rapidement les tournées en gardant une certaine qualité de service, la continuité humaine ne peut désormais

1. Le journal du médecin "L'absentéisme crève le plafond dans le secteur des soins", 2017
<https://www.lejournaldumedecin.com/actualite/1-absenteisme-creve-le-plafond-dans-le-secteur-des-soins/article-normal-28455.html>

plus être aussi stricte. Si certains services ne peuvent pas être réaffectés à un nouvel intervenant en dernière minute (toujours de par le type de service, la pathologie ou la tolérance du patient), d'autres peuvent être réassignés à n'importe quel intervenant qualifié.

Nous tentons donc de replanifier les tournées de soins de manière à fournir le plus de services possibles, avec des contraintes plus flexibles en ce qui concerne la continuité de soins. Comme les perturbations impliquent des modifications de dernière minute sur les tournées, il convient de garder une certaine stabilité par rapport au planning initial car cela permet à la structure de gérer plus facilement les changements de planning sur le terrain. Après la couverture de services, l'objectif est donc de préserver la stabilité du planning, qu'elle soit vue du côté des patients avec la stabilité des horaires prévus, ou bien du côté des intervenants avec une stabilité des tournées générées et des affectations. Pour prendre en compte simultanément les différents points de vue des acteurs du problème, nous adoptons une approche multi-objectif.

Dans ce chapitre, nous introduisons quelques notions rencontrées dans la littérature multi-objectif (section 5.2). Après une description du problème en section 5.3, nous présentons une formulation mathématique du problème (section 5.4) ainsi qu'une nouvelle version de la méthode développée dans le chapitre précédent, adaptée aux contraintes et besoins du problème d'absence ponctuelle (section 5.5). Des expérimentations ont été menées sur des instances de la littérature, dont nous présentons les caractéristiques et principaux résultats dans la section 5.6, avant de conclure dans la section finale 5.7.

5.2 Méthodes multi-objectif pour l'optimisation

Les objectifs étudiés dans les tournées de véhicules sont divers et variés. Ils concernent en général les temps de trajets ou les coûts liés à l'exécution d'une tournée ou encore la maximisation de la satisfaction de certains acteurs du problème [137].

De manière générale dans les problèmes d'optimisation, les différents objectifs considérés sont divergents, il est donc difficile de les considérer conjointement dans une méthode initialement conçue pour un problème mono-objectif. Des stratégies sont alors mises en place pour traiter ces problèmes et proposer des compromis entre les différents objectifs. Les méthodes a priori imposent des préférences avant tout processus d'optimisation, les méthodes interactives requièrent des décisions pendant la phase d'optimisation, tandis que les stratégies a posteriori offrent un panel de solutions parmi lesquelles le preneur de décision choisit la plus adaptée à son problème ou ses préférences [70].

Nous présentons ci-dessous quelques-unes des méthodes multi-objectif les plus populaires dans la littérature, que nous avons pour certaines déjà évoquées dans le chapitre 2 dans la section 2.3.1.

Méthode d'agrégation

Dans ce type de méthode a priori, il s'agit de considérer la somme pondérée de tous les objectifs étudiés [187]. Plus le poids associé à un objectif est élevé, plus cet objectif est important pour le preneur de décision. Malgré le fait qu'elle soit très simple à implémenter, la difficulté de cette méthode réside dans le fait de trouver des poids adaptés à l'importance et aux valeurs atteintes par chacun des objectifs, qui représentent souvent des notions peu aisément comparables (temps, coûts, satisfaction, etc.).

Méthodes lexicographique [139]

Les méthodes lexicographiques consistent à établir une hiérarchisation des objectifs, elles rentrent donc dans la catégorie des méthodes a priori. Ensuite, les objectifs sont traités selon leur ordre de priorité. Une fois la meilleure valeur du premier objectif trouvée, sa valeur est fixée par une nouvelle contrainte, et on résout ce nouveau problème en optimisant le deuxième objectif. Le processus est répété jusqu'à ce que tous les objectifs aient été optimisés tour à tour.

Goal optimization

Une autre stratégie est de définir a priori un point dans l'espace des solutions qui correspond à un état cible. Ensuite, on cherche une solution qui minimise la distance à ce point. Là encore, la difficulté majeure réside dans le choix de l'état cible. Park et Koelling [189] utilisent cette méthode avec une heuristique dédiée, pour résoudre un problème où les distances parcourues ainsi que la détérioration des biens transportés sont minimisées, tout en maximisant la réalisation de services émergents.

Méthode ϵ -contrainte [171]

Dans cette stratégie a posteriori, plusieurs solutions sont trouvées en optimisant un des objectifs considérés et en imposant des contraintes sur les autres objectifs. La résolution de plusieurs problèmes successifs, avec différentes bornes imposées par les contraintes, permet de produire plusieurs solutions non-comparables, parmi lesquelles choisira le décisionnaire. Cette méthode sera expliquée plus en détail en section 5.5.4.

5.2.1 Positionnement de nos travaux

Comme nous le détaillerons dans la section suivante, nous avons choisi de traiter deux objectifs de stabilité peu étudiés ensemble (minimisation des changements des horaires de service, et minimisation des changements d'affectation de services), ainsi qu'un objectif classique de la littérature avec la minimisation des temps de trajet.

La plupart des travaux de la littérature utilisent des méthodes d'agrégation pour résoudre les problèmes d'optimisation multi-objectif de tournées de soins [59]. Pour traiter les trois objectifs que nous avons choisis, utiliser une telle méthode ne nous paraît pas

adéquat. En effet, l'attribution de poids à des notions si différentes serait complètement subjective, et probablement peu pertinente. Il semblerait que chaque preneur de décision ait ses préférences, ses contraintes "terrain", et que l'option la plus appropriée pour notre problème soit donc de fournir plusieurs alternatives, sans pondération a priori des différents objectifs.

5.3 Description du problème

Comme dans le chapitre précédent, nous considérons un ensemble de P patients (\mathcal{P}) qui requièrent un ensemble de S services (\mathcal{S}) caractérisés par une durée fixe δ_s , et une qualification ρ_s . Désormais les horaires de début f_s du service sont des horaires préférentiels. En effet, certains horaires sont flexibles et peuvent varier dans l'intervalle $[f_s - \hat{f}_s, f_s + \hat{f}_s]$. L'ensemble $\hat{\mathcal{S}}$ est l'ensemble des services flexibles, c'est-à-dire l'ensemble des services tels que $\hat{f}_s \neq 0$.

Certains services sont réaffectables, et peuvent être effectués par n'importe quel intervenant disponible et qualifié. Les services non-réaffectables doivent être impérativement effectués par l'intervenant auquel ils étaient initialement affectés, sauf évidemment dans le cas où ce même intervenant serait absent. Sans perte de généralité, nous considérerons que tous les services dont l'intervenant initial est absent sont réaffectables. L'ensemble des services réaffectables est noté \mathcal{S}_R . L'intervenant initialement affecté au service s est noté k_s .

Enfin, certains services sont obligatoires. L'ensemble des services obligatoires est noté \mathcal{S}_O . Les services n'appartenant pas à \mathcal{S}_O sont considérés comme non-essentiels, et peuvent donc ne pas figurer dans le planning final.

Les services qui sont à la fois obligatoires et non-réaffectables seront appelés **check-points** dans la suite du chapitre, et nous noterons \mathcal{S}_C l'ensemble des checkpoints.

Les intervenants de l'ensemble \mathcal{K} , sont désormais uniquement caractérisés par leur niveau de qualification q_k . Nous considérons désormais que les intervenants sont disponibles toute la journée.

Le temps de trajet entre deux services s et l est noté t_{sl} .

Toutes les notations utilisées dans le chapitre sont retranscrites dans le tableau 5.4.

5.3.1 Contraintes

Il s'agit de proposer un nouveau planning de telle sorte qu'un nombre maximal de services soit fourni malgré l'absence d'intervenants, tout en s'assurant que tous les services obligatoires soient réalisés. Ici encore, nous supposons qu'au moment où la planification a lieu toutes les perturbations sont connues, mais il s'agit à présent d'offrir

une réparation rapide qui permette d'intervenir rapidement au niveau opérationnel. Agir à ce niveau permet d'assurer un certain niveau de service malgré le manque de personnel.

Nous retrouvons certaines contraintes de construction, et certaines contraintes légales déjà étudiées dans le problème précédent.

1. L'intervenant doit commencer et finir sa tournée à son domicile
2. Deux services peuvent être exécutés de manière consécutive par un même intervenant si leurs horaires sont compatibles, à savoir que l'intervenant a le temps de se déplacer du lieu du premier service jusqu'au lieu du second service, en tenant compte de la flexibilité éventuelle des horaires.
3. L'intervenant doit avoir au moins le niveau de qualification requis pour exécuter un service. Le travail surqualifié est autorisé.
4. L'amplitude et le temps effectif d'une journée de travail sont limités. Notons que le premier et dernier trajet de la tournée ne sont jamais comptés dans les calculs de temps de trajet, amplitude, ou temps de travail effectif.

Certaines contraintes sont toutefois modifiées :

5. Tous les services obligatoires doivent être fournis, les autres services peuvent ne pas être couverts.
6. Les services non-reffectables peuvent être effectués uniquement par l'intervenant initialement prévu. Si cet intervenant est absent, le service est considéré comme étant réaffectable à n'importe quel intervenant qualifié.
7. Les horaires de début peuvent être décalés des horaires préférentiels, en restant dans la fenêtre de flexibilité.

5.3.2 Objectifs

Nous considérons plusieurs objectifs. Notre objectif premier est de couvrir un maximum de services. Sachant que les services obligatoires doivent forcément être fournis, cela revient à couvrir un maximum de services non-obligatoires.

Ensuite, nous considérons trois objectifs secondaires, qui représentent différents enjeux pour les trois acteurs du problème :

1. La minimisation des temps de trajets. Les employés des structures à domicile utilisent leur propre véhicule pour se déplacer. Les temps de trajets sont à la fois peu rémunérés et considérés comme du temps perdu, donc particulièrement mal vécus par les intervenants. De plus, cet objectif représente aussi un intérêt économique pour la structure de soin et service à domicile.
2. La minimisation de la somme totale des décalages des horaires des services par rapport à leur horaire préférentiel. Cet objectif permet d'évaluer les changements du planning et de maximiser la stabilité du point de vue de la patientèle.

3. La minimisation du nombre de changements dans les tournées. Cet objectif permet d'évaluer les changements du planning et de maximiser la stabilité du point de vue des intervenants.

Exemple : un intervenant devait effectuer les services (4-18-9-7-8-3), et effectue finalement les services (4-2-7-9-14-3). Nous comptons chaque service supprimé, et chaque service rajouté entre les deux tournées. Pour cette configuration, nous comptons 4 changements pour l'intervenant concerné ((4-18-9-7-8-3) et (4-2-7-9-14-3)). Les horaires de début des services n'interviennent pas dans le calcul des changements.

Nous choisissons de traiter le premier objectif en priorité (de manière lexicographique), et les objectifs secondaires seront traités de manière conjointe avec une méthode ϵ -contrainte. Cela permet de proposer plusieurs solutions au décideur qui choisira la plus appropriée selon ses contraintes du terrain ou selon des critères qui n'auraient pas été pris en compte dans la modélisation.

5.3.3 Exemple illustratif

La figure 5.1 expose un exemple sur lequel nous nous appuyerons tout au long de ce chapitre pour illustrer les différentes étapes de notre méthode. Nous considérons 13 services, étalés sur un axe temporel. La longueur des segments pleins représente la durée du service, positionnée sur l'horaire préférentiel du patient. La partie du segment en pointillés représente la flexibilité horaire du service. Par exemple, le service 1 dure 1h30 et était initialement prévu entre 7h et 8h30, mais peut être effectué n'importe quand entre 6h30 et 9h (sans préemption). Le service 10 quant à lui ne peut être effectué que de 7h à 9h30, sans possibilité de modifier l'horaire.

Pour simplifier l'exemple, les informations relatives aux patients requérant les services n'apparaissent pas ici ; les intervenants sont simplement désignés par des couleurs ; nous considérons qu'il n'y a qu'un seul niveau de qualification possible et que tous les temps de trajet sont égaux à 15 minutes.

Les services colorés sont les services non-réaffectables qui ne peuvent être effectués que par les intervenants associés aux couleurs. Ainsi les services 3, 4 et 6 ne peuvent être effectués que par l'intervenant associé à la couleur orange, les services 2, 7 et 12 par l'intervenant associé à la couleur verte, et tous les autres services peuvent être effectués par n'importe quel intervenant.

Les services obligatoires sont signalés par une croix (\times) : ce sont les services 1, 3, 7, 8, 9 et 12.

Pour rappel, les checkpoints sont les services non-réaffectables et obligatoires : ils sont donc colorés et signalés par une croix. Ce sont les services 3, 7 et 12.

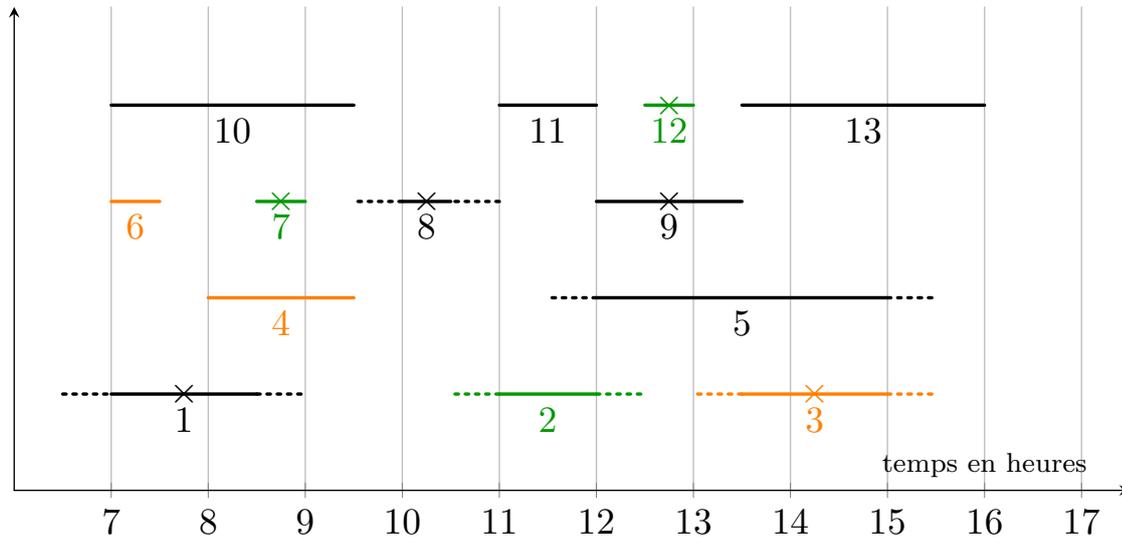


FIGURE 5.1 – Exemple d'un planning initial perturbé

5.4 Formulation mathématique

Modèle HHCRSP3 : Réoptimisation opérationnelle

Données et notations

Les notations de cette formulation peuvent être retrouvées dans le tableau 5.4. Comme les tournées des intervenants doivent impérativement commencer et finir depuis leur lieu de résidence, nous introduisons deux services fictifs, α et β , représentant respectivement un début et une fin de tournée. Nous notons $\mathcal{S}^* = \mathcal{S} \cup \{\alpha, \beta\}$ l'ensemble des services incluant les services fictifs. Les temps de trajets entre un service fictif et un service "réel" sont nuls ($t_{\alpha s} = t_{s\beta} = 0, \forall s \in \mathcal{S}$) car les trajets domicile-travail ne sont pas comptabilisés d'après les CCN.

Variables de décision

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{si l'intervenant } k \text{ effectue consécutivement les services } i \text{ et } j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

$s_{ik} \in \mathbb{N}$: horaire de début du service i fourni par l'intervenant k

Variables auxiliaires

$e_{ij} \in \{0, 1\}$ sont des variables auxiliaires qui servent à calculer les temps effectifs de travail au sens des CCN. Elles valent 1 si le temps d'attente entre i et j est compté

comme du temps de travail, *i.e* s'il est inférieur à 15 minutes.

$w_{ij}^{CCN} \in \mathbb{N}$ sont des variables auxiliaires qui servent à calculer les temps d'attente au sens des **CCN**. Elles valent le temps d'inactivité entre i et j si il est inférieur à 15 minutes.

$\Delta_i \in \mathbb{N}$ sont des variables auxiliaires permettant de calculer les déviations des horaires préférentiels.

Fonctions objectifs

$$\max \sum_{i \in \mathcal{S}} \sum_{j \in \mathcal{S}^*} \sum_{k \in \mathcal{K}} x_{ijk} \quad (5.1)$$

$$\min \sum_{i \in \mathcal{S}} \sum_{j \in \mathcal{S}^*} \sum_{k \in \mathcal{K}} t_{ij} \times x_{ijk} \quad (5.2)$$

$$\min \sum_{i \in \mathcal{S}} \Delta_i \quad (5.3)$$

$$\min \sum_{i \in \mathcal{S}} \sum_{j \in \mathcal{S}^*} \sum_{k \in \mathcal{K} \setminus k_i} x_{ijk} + \sum_{i \in \mathcal{S}} \sum_{j \in \mathcal{S}^*} (1 - x_{ijk_i}) \quad (5.4)$$

Contraintes liés aux calcul de l'objectif (5.3)

$$\Delta_i \geq f_i - \sum_{k \in \mathcal{K}} s_{ik} \quad \forall i \in \mathcal{S} \quad (5.5)$$

$$\Delta_i \geq \left(\sum_{k \in \mathcal{K}} s_{ik} \right) - f_i \quad \forall i \in \mathcal{S} \quad (5.6)$$

Contraintes de flot

$$\sum_{i \in \mathcal{S}} x_{\alpha ik} \leq 1 \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (5.7)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{S}} x_{i\beta k} \leq 1 \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (5.8)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{S}^*} x_{ijk} = \sum_{j \in \mathcal{S}^*} x_{jik} \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad \forall i \in \mathcal{S} \quad (5.9)$$

Contraintes terrain

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{j \in \mathcal{S}^*} x_{ijk} = 1 \quad \forall i \in \mathcal{S}_O \quad (5.10)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{j \in \mathcal{S}^*} x_{ijk} \leq 1 \quad \forall i \in \mathcal{S} \setminus \mathcal{S}_O \quad (5.11)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{S}^*} x_{ijk} \times (q_k - \rho_j) \geq 0 \quad \forall j \in \mathcal{S}, \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (5.12)$$

$$s_{ik} + x_{ijk}(\delta_i + t_{ij}) \leq s_{jk} + (1 - x_{ijk}) \times M \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad \forall i, j \in \mathcal{S}^* \quad (5.13)$$

avec M un entier suffisamment grand

$$(f_i - \hat{f}_i) \sum_{j \in \mathcal{S}^*} x_{ijk} \leq s_{ik} \leq (f_i + \hat{f}_i) \sum_{j \in \mathcal{S}^*} x_{ijk} \quad \forall i \in \mathcal{S}, \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (5.14)$$

Contraintes légales

$$s_{\beta k} - s_{\alpha k} \leq A_{max} \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (5.15)$$

$$15 - \left(\sum_{k \in \mathcal{K}} s_{jk} - \left(\sum_{k \in \mathcal{K}} s_{ik} + \delta_i \right) - t_{ij} \right) \leq 15 \times e_{ij} \quad \forall i, j \in \mathcal{S}^* \quad (5.16)$$

$$w_{ij}^{CCN} = e_{ij} \times \left(\sum_{k \in \mathcal{K}} s_{jk} - \left(\sum_{k \in \mathcal{K}} s_{ik} + \delta_i \right) - t_{ij} \right) \quad \forall i, j \in \mathcal{S}^* \quad (5.17)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{S}^*} \sum_{j \in \mathcal{S}^*} x_{ijk} \times (\delta_i + t_{ij} + w_{ij}^{CCN}) \leq E_{max} \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (5.18)$$

Contrainte de continuité humaine

$$\sum_{k \in \mathcal{K} \setminus k_i} \sum_{j \in \mathcal{S}^*} x_{ijk} = 0 \quad \forall i \in \mathcal{S} \setminus \mathcal{S}_R \quad (5.19)$$

Domaines de définition

$$x_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathcal{S}^*, \quad \forall j \in \mathcal{S}^*, \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (5.20)$$

$$s_{ik} \in \mathbb{N} \quad \forall i \in \mathcal{S}, \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (5.21)$$

$$w_{ijk}^{CCN} \in \mathbb{N} \quad \forall i \in \mathcal{S}^*, \quad \forall j \in \mathcal{S}^*, \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (5.22)$$

$$e_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in \mathcal{S}^*, \quad \forall j \in \mathcal{S}^*, \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (5.23)$$

$$\Delta_i \in \mathbb{N} \quad \forall i \in \mathcal{S} \quad (5.24)$$

Les différentes fonctions objectif sont détaillées dans les équations (5.1) à (5.3). Dans (5.1), nous maximisons le nombre de services fournis. Ensuite, nous détaillons les objectifs secondaires : la minimisation des temps de trajet (excepté les premiers et derniers trajets des tournées) (5.2) ; la minimisation des déviations par rapport aux horaires préférentiels (5.3) (calculée à l'aide des contraintes (5.5) à (5.6)) ; et enfin la minimisation des changements dans les tournées.

Rappelons qu'un changement dans une tournée correspond à une suppression d'un service, ou un ajout de service. Ainsi, le remplacement du service i par le service j dans une tournée vaut 2 changements : la suppression de i , et l'ajout de j . Pour compter le nombre de changements, nous comptons d'abord tous les ajouts, c'est-à-dire les services qui sont effectués par un autre intervenant que celui initialement prévu, puis les suppressions, c'est-à-dire les services réaffectés à un nouvel intervenant (qui sont donc bien comptés deux fois) mais également les services non réaffectés (5.4).

Les contraintes (5.7) à (5.9) sont les contraintes de flot.

La couverture des services est garantie par les contraintes (5.10) et (5.11). La contrainte de qualification est exprimée en (5.12).

Les horaires de début de service doivent être compris dans la fenêtre autorisée, et de telle manière que deux services consécutifs ne se chevauchent pas (5.13, 5.14). Avec cette formulation, $\sum_{k \in \mathcal{K}} s_{ik}$ représente l'horaire de début du service i . Typiquement, on donne au big M la valeur correspondant à la fin maximale de la tournée de travail, c'est-à-dire l'horaire de service requis le plus tardif.

L'amplitude est limitée par (5.15), et le temps effectif de travail par (5.16, 5.17, 5.18). La contrainte 5.16 force la variable e_{ij} à 1 si le temps d'attente entre i et j , calculé avec la formule $(\sum_{k \in \mathcal{K}} s_{jk} - (\sum_{k \in \mathcal{K}} s_{ik} + \delta_i) - t_{ij})$, est inférieur à 15 minutes. D'après les CCN, si ce temps d'attente est inférieur à 15 minutes, alors il compte comme du temps de travail. Nous stockons la valeur du temps d'attente au sens des CCN dans w_{ij}^{CCN} (5.17). Dans la contrainte 5.18, nous vérifions que les temps effectifs de travail des tournées n'excèdent pas la valeur légale. Notons toutefois que ces deux dernières contraintes ne sont pas linéaires : la formulation n'est donc pas un MILP.

Dans nos expérimentations (section 5.6), nous supprimerons ces contraintes afin de pouvoir résoudre la formulation à l'aide d'un solveur linéaire.

La contrainte (5.19) permet d'interdire la réassignation des services non réaffectables.

Enfin, la nature des variables est fixée dans les contraintes (5.20) à (5.24).

5.5 Méthode de résolution : ORO

Nous utilisons la même approche de décomposition que dans le chapitre précédent : modélisation en graphes, génération de tournées, sélection de tournées. Toutefois, à cha-

cune de ces étapes, la nature du problème et les objectifs considérés imposent des modifications algorithmiques non-négligeables que nous détaillons dans cette section en présentant la méthode **Operational Re-Optimization (ORO)**. Du fait de la possibilité de décaler les horaires des services, nous devons prendre des décisions additionnelles dans la construction des graphes et dans la génération de chemins qui ne garantissent plus l'exactitude de la solution comme c'était le cas dans le chapitre précédent. Nous avons aussi dû ajouter un module de filtrage et de réparation avant la sélection des tournées pour s'assurer de l'admissibilité des tournées générées qui n'est désormais plus garantie lors de la génération des chemins.

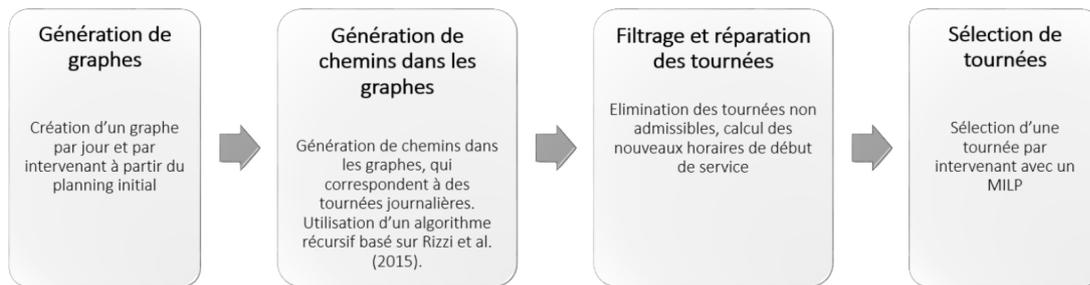


FIGURE 5.2 – Déroulé global de l'algorithme ORO

5.5.1 Génération de graphes

Comme dans le chapitre précédent, nous modélisons le problème par une série de graphes (un par intervenant), dans lesquels les sommets représentent des services et les arcs, des enchaînements de services. Certaines règles de construction sont identiques et nous les rappelons brièvement, avant de nous attarder sur les différences dans la stratégie de résolution pour chaque étape.

Intéressons-nous à la construction du graphe $G = (V, \mathcal{E})$ associé à un intervenant k . Nous illustrons cette étape dans la figure 5.5, où nous construisons le graphe correspondant à l'intervenant **vert** de l'exemple présenté dans la figure 5.1.

Sommets

Les sommets du graphe correspondent aux services pouvant être fournis par l'intervenant k . Si le service s n'est pas réassignable et que l'intervenant k initialement affecté est présent, alors nous ajoutons le sommet v_s au graphe G_k , et uniquement à ce graphe.

Si le service s est réassignable, ou que k_s fait partie des intervenants absents pour la journée, alors on peut réaffecter le service, et donc l'ajouter au graphe de tous les intervenants compatibles.

Toutefois, l'ajout de ces sommets est parfois inutile. En effet, si les horaires de s intersectent un des checkpoints v_c du graphe, l'ajout d'un sommet associé v_s n'est pas pertinent puisqu'aucun chemin de la source jusqu'au puits ne pourra contenir à la fois v_c et v_s . Or, par définition, le checkpoint est obligatoire et non-réassignable, donc toute tournée faisant partie de la solution contient forcément v_c . Ainsi, nous savons que le service s ne pourra pas être effectué par l'intervenant en question.

Pour calculer ces intersections, il faut tenir compte de l'éventuelle flexibilité des horaires. Un service s débute au plus tard à l'heure $f_s + \hat{f}_s$, et finit au plus tôt à l'heure $f_s + \delta_s - \hat{f}_s$. Si le service s est affecté à un intervenant, nous savons que celui-ci sera forcément mobilisé au moins dans l'intervalle $[f_s + \hat{f}_s, f_s + \delta_s - \hat{f}_s]$. Nous désignons désormais cet intervalle comme l'**intervalle fixe** du service.

Dans la figure 5.3, le service s est initialement prévu de 8h30 à 10h (segment noir). Comme il est flexible, on peut décaler les horaires du service de 30 minutes (flexibilité indiquée par les segments gris en pointillé). De ce fait, quelle que soit l'heure de début du service, l'intervenant affecté sera forcément mobilisé entre 9h et 9h30 (segment rouge) : c'est l'intervalle fixe du service.

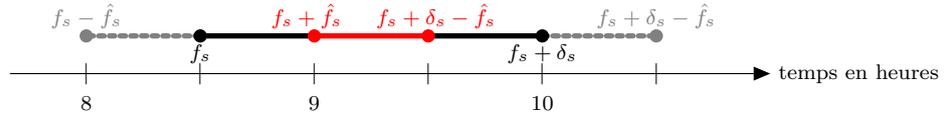


FIGURE 5.3 – Illustration d'un service avec début au plus tôt/au plus tard

Si l'une des conditions suivantes est vraie, alors l'ajout du sommet est refusé :

i)

$$f_s + \hat{f}_s < f_c + \hat{f}_c < f_s + \delta_s - \hat{f}_s + t_{sc}$$

(voir Figure 5.4a)

ii)

$$f_c + \hat{f}_c < f_s + \hat{f}_s < f_c + \delta_c - \hat{f}_c + t_{cs}$$

(voir Figure 5.4b)

iii)

$$f_c + \hat{f}_c < f_s + \hat{f}_s \text{ et } f_s + \delta_s - \hat{f}_s < f_c + \delta_c - \hat{f}_c + t_{cs}$$

(voir Figure 5.4c)

La figure 5.4 propose un cas d'illustration pour chacune des conditions ci-dessus. Sur chaque figure, nous représentons les intervalles fixes d'un service s (en noir) et d'un checkpoint c (en violet). Pour simplifier les exemples, nous ne matérialisons pas le temps de trajet t_{sc} .

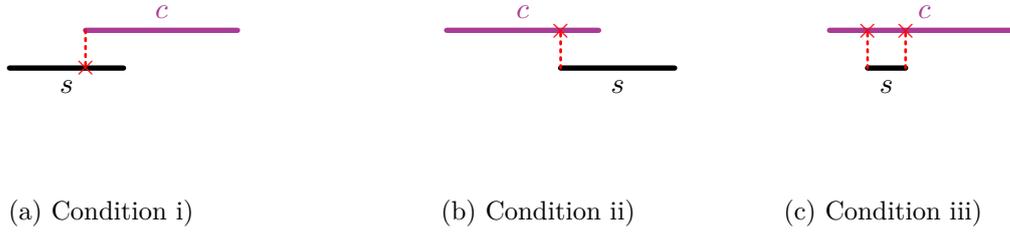


FIGURE 5.4 – Conditions d'intersections avec un checkpoint

Dans l'exemple présenté dans la figure 5.1, pour le graphe de l'intervenant *vert* :

- les services 2, 7 et 12 ne peuvent être réalisés que par l'intervenant *vert*, les sommets associés sont donc dans le graphe. Les sommets 7 et 12, signalés en rouge, correspondent aux checkpoints du graphe.
- les services 3, 4 et 6 ne peuvent être effectués que par l'intervenant *orange*, on n'ajoute donc pas les sommets associés.
- les sommets 5, 9 et 10 chevauchent des checkpoints (respectivement les services 12, 12 et 7) et n'apparaissent donc pas dans le graphe.
- les autres sommets (1, 8, 11, 13) sont réassignables et ne chevauchent pas de checkpoint, on les ajoute donc également dans le graphe.

Arcs

Les arcs permettent de relier les sommets associés aux services pouvant être enchaînés de manière consécutive. Comme les horaires des services sont flexibles, certains chevauchements sont autorisés. Deux services i et j sont potentiellement compatibles ils peuvent être affectés au même intervenant en débutant i au plus tôt et j au plus tard, *i.e* si

$$f_j + \hat{f}_j \geq f_i - \hat{f}_i + \delta_i + t_{ij}$$

Lorsque les services i et j peuvent être effectués dans n'importe quel ordre par le même intervenant, nous créons l'arc depuis le service ayant le plus petit horaire de début au plus tôt (si c'est le même pour les deux services, nous imposons un ordre arbitraire). Ainsi, nous évitons les cycles dans nos graphes, ce qui compromettrait les calculs de chemins les plus longs dans l'étape suivante.

Les checkpoints étant des points de passage obligatoire pour des chemins sélectionnés dans une solution finale, nous pouvons éliminer des arcs inutiles entre deux services pourtant potentiellement compatibles. Sont à proscrire les arcs reliant un service ayant lieu avant un checkpoint, et un service après ce même checkpoint. Plus précisément : l'arc entre i et j n'est pas construit s'il existe un checkpoint c tel que :

$$f_j + \hat{f}_j > f_c - \hat{f}_c + \delta_c$$

et

$$f_i - \hat{f}_i + \delta_i < f_c + \hat{f}_c$$

L'arc entre 1 et 2 est donc interdit dans l'exemple puisqu'il empêche l'exécution du checkpoint 7 (cf arc (i) dans le graphe de la figure 5.5)

Ces règles restent valables pour la source et le puits, auxquels les services ne sont plus forcément reliés. S'il existe un arc dans le graphe $(v_s v_c)$, tel que c est un checkpoint, alors le sommet v_s n'est pas relié au puits. De la même manière, s'il y a un arc $(v_c v_s)$ alors v_s n'est pas relié à la source.

Les arcs entre α et 2, et entre 2 et β sont par exemple interdits dans l'exemple puisqu'ils empêchent l'exécution des checkpoints 7 et 12 (cf arcs (ii) et (iii) dans la figure 5.5)

Le graphe correspondant à l'exemple pour l'intervenant **vert** apparaît dans la figure 5.5. Les arcs rouges sont des arcs interdits.

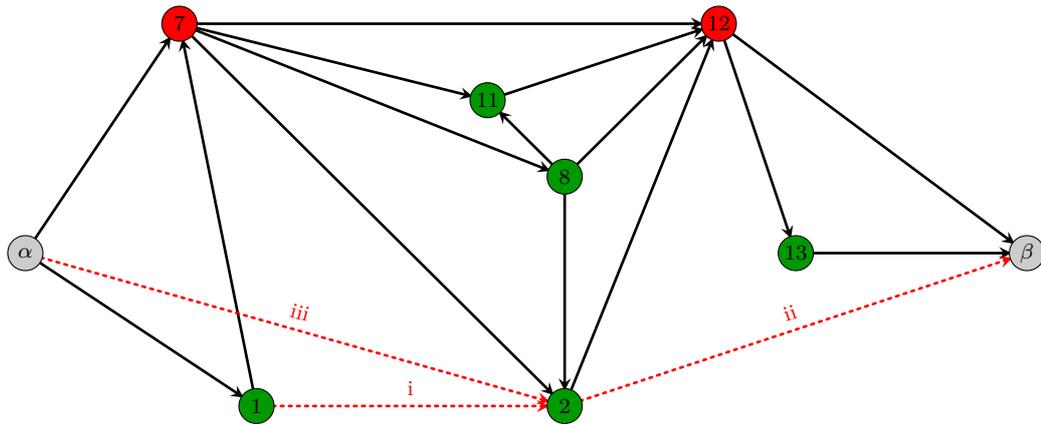


FIGURE 5.5 – Graphe correspondant à l'exemple 5.1 pour l'intervenant **vert**

Poids

Comme les horaires des services ne sont pas encore fixés au moment de la création du graphe, les poids sur les arcs ne sont pas absolus. Il convient pour chaque arc de calculer les amplitudes minimale et maximale impliquées, ainsi que les temps de travail effectif

minimal et maximal impliqués (eux-mêmes calculés à partir des temps d'inactivité minimal et maximal).

Considérons un arc entre deux services i et j compatibles.

Inactivité minimale $inact^-$: l'inactivité minimale correspond au temps non travaillé entre les deux services dans le cas où le service i finit au plus tard, et le service j commence au plus tôt.

$$inact_{ij}^- = \max(0, f_j - \hat{f}_j - (f_i + \hat{f}_i) - \delta_i - t_{ij})$$

Dans l'exemple 5.1, l'inactivité minimale entre les services 8 et 2 vaut 0min.

Inactivité maximale $inact^+$: l'inactivité maximale correspond au temps non travaillé entre les deux services dans le cas où le service i finit au plus tôt, et le service j commence au plus tard.

$$inact_{ij}^+ = \max(0, f_j + \hat{f}_j - (f_i - \hat{f}_i) - \delta_i - t_{ij})$$

Dans l'exemple 5.1, l'inactivité maximale entre les services 8 et 2 vaut 75min = 1h15.

Amplitude maximale a^+ : l'amplitude maximale impliquée par la succession des services i et j correspond au cas où le service i commence au plus tôt, et le service j finit au plus tard. Cela correspond au cas où le temps d'inactivité est maximal

$$a_{ij}^+ = \delta_i + t_{ij} + inact_{ij}^+$$

Dans l'exemple 5.1, l'amplitude maximale entre les services 8 et 2 vaut $30 + 15 + 75 = 120min = 2h$.

Amplitude minimale a^- : l'amplitude minimale impliquée par la succession des services i et j correspond au cas où le service i commence au plus tard et j finit au plus tôt tout en respectant les contraintes de succession. Cela correspond au cas où le temps d'inactivité est le plus court.

$$a_{ij}^- = \delta_i + t_{ij} + inact_{ij}^-$$

Dans l'exemple présenté sur la figure 5.1, l'amplitude minimale entre les services 8 et 2 vaut $\delta_8 + t_{8,2} = 30 + 15 = 45min$.

Temps effectif de travail minimal e^- : le temps de travail effectif minimal impliqué par i et j vaut la durée de i , la durée de trajet entre i et j , et le temps

d'attente minimal au sens des CCN.

$$e_{ij}^- = \begin{cases} \delta_i + t_{ij} + inact_{ij}^- & \text{si } inact_{ij}^+ < 15\text{min} \\ \delta_i + t_{ij} & \text{sinon} \end{cases}$$

Dans l'exemple présenté sur la figure 5.1, le temps effectif minimal entre les services 8 et 2 vaut $30 + 15 = 45\text{min}$.

Temps effectif de travail maximal e^+ : le temps de travail effectif maximal impliqué par i et j vaut la durée de i , la durée de trajet entre i et j , et le temps d'attente maximal au sens des CCN. Rappelons que le temps d'attente est égal au temps d'inactivité si celui-ci est strictement inférieur à 15, et 0 sinon.

$$e_{ij}^+ = \begin{cases} \delta_i + t_{ij} & \text{si } inact_{ij}^- \geq 15\text{min} \\ \delta_i + t_{ij} + inact_{ij}^+ & \text{si } inact_{ij}^+ < 15\text{min} \\ \delta_i + t_{ij} + 15 & \text{sinon} \end{cases}$$

Dans l'exemple présenté sur la figure 5.1, le temps effectif maximal entre les services 8 et 2 vaut $30 + 15 + 15 = 60\text{min}$.

5.5.2 Génération de tournées

L'algorithme `genTour(G)` (Algorithme 5) nous permet de générer des tournées potentiellement admissibles pour l'intervenant associé au graphe G . Nous menons une recherche récursive sur les sommets du graphe, qui nous permet de construire des chemins dont les amplitudes et temps de travail sont bornées par les valeurs légales.

Calcul de bornes : `minBoundEff`, `minBoundA`

Comme dans le chapitre précédent, on peut calculer des bornes inférieures sur le temps effectif minimal d'une tournée admissible d'un graphe, en comparant le nombre de services obligatoires requis simultanément, et le nombre d'intervenants en capacité d'intervenir à ce moment-là. De plus, rappelons que les checkpoints sont des points de passage incontournables dans le graphe, donc $E_{min} \geq \sum_{c \in \mathcal{S}_C} \delta_c$.

La borne inférieure ainsi calculée n'est donc pas toujours de bonne qualité, notamment si le graphe étudié contient peu de checkpoints, si l'instance contient peu de services obligatoires, ou encore si la flexibilité est grande.

Il peut être également intéressant de déterminer une borne inférieure A_{min} pour l'amplitude. Elle est simplement calculée en considérant les premiers et derniers (en terme d'horaires) checkpoints du graphe, et en calculant l'amplitude minimale entre les

Algorithme 5 Génération de tournées : $\text{genTour}(G)$ **Input:** G : graphe**Global variables :** A_{max} : borne supérieure pour l'amplitude E_{max} : borne supérieure pour le temps de travail effectif**Output:** ensemble de chemins potentiellement admissibles $E_{min} \leftarrow \text{MINBOUNDEFF}(G)$

▷ Calcul de bornes

 $A_{min} \leftarrow \text{MINBOUND A}(G)$ **for all** $v \in V$ **do :** $c_{A_+}^v \leftarrow \text{SHORTAMPLITUDE}(v, G)$

▷ Calcul de plus courts/longs chemins

 $c_{A_-}^v \leftarrow \text{LONGAMPLITUDE}(v, G)$ $c_{E_+}^v \leftarrow \text{SHORTEFFWT}(v, G)$ $c_{E_-}^v \leftarrow \text{LONGEFFWT}(v, G)$ **return** $\text{RECGENTOUR}(\alpha, \beta, A_{max}, A_{min}, E_{max}, E_{min}, \max_{v \in V} \{f_v\}, 0, \{\alpha\})$

▷ voir Algorithme 6

deux services (départ au plus tard du premier, fin au plus tôt du dernier).

*Exemple : pour l'intervenant *vert*, $A_{min} \geq a_{7.12} = 13 - 8.5 = 4.5h$*

Calcul de plus courts / longs chemins : **shortAmplitude**, **longAmplitude**, **shortEffWT**, **longEffWT**

Pour chaque sommet du graphe, nous calculons en temps linéaire [25] :

- le plus court chemin de v jusqu'à β au sens de l'amplitude en utilisant les poids a^- , noté $c_{A_-}^v$
- le plus long chemin de v jusqu'à β au sens de l'amplitude en utilisant les poids a^+ , noté $c_{A_+}^v$
- le plus court chemin de v jusqu'à β au sens du temps de travail effectif en utilisant les poids e^- , noté $c_{E_-}^v$
- le plus long chemin de v jusqu'à β au sens du temps de travail effectif en utilisant les poids e^+ , noté $c_{E_+}^v$

Notons ici que les poids sur les chemins sont calculés au minimal ou maximal de leur valeur possible, puisqu'au moment du calcul, on ne connaît pas encore les horaires de début et de fin des services, qui dépendent du chemin complet.

Lors de l'ajout d'un sommet v à un chemin $c_{\alpha u}$, la nouvelle limite supérieure pour l'amplitude A_+ est diminuée de la valeur de l'amplitude minimale impliquée par l'arc uv (a_{uv}^-) tandis que la nouvelle valeur inférieure pour l'amplitude A_- est augmentée de la valeur de l'amplitude maximale impliquée par l'arc uv (a_{uv}^+). Ainsi, les poids calculés pour les chemins sont les poids dans les meilleurs cas, et nous devons vérifier qu'ils respectent bien les valeurs légales une fois entièrement générés et avec les horaires de services fixés.

Recherche récursive : **recGenTour**

Le principe de l'algorithme récursif et de la vérification des bornes à chaque appel a été présenté dans le chapitre 4 section 4.5. Une nouvelle étape est toutefois ajoutée au cours de la récursion, afin de détecter des chemins non-admissibles pour chevauchement d'horaires (Algorithme 6). En effet, du fait de la flexibilité des services, nous avons créé des arcs entre des services compatibles sous réserve de décaler les horaires. Une succession de services compatibles deux à deux ne forme pas toujours une tournée compatible. Il convient donc de détecter ces chevauchements invalides.

Au fur et à mesure de la création du chemin, nous calculons la flexibilité globale dont nous disposons pour les services du chemin. Autrement dit, nous regardons la marge dont nous disposons pour décaler les services "vers la gauche" (avancer l'horaire de début) sans violer les fenêtres horaires ou les contraintes de succession. Cette marge à gauche est notée Δ_L . Au contraire, on peut être amené à décaler des services "vers la droite" lors de l'ajout d'un service, c'est-à-dire de retarder l'horaire de début. Auquel cas, on

stocke ce décalage dans la variable Δ_R .

À chaque fois que l'on souhaite ajouter un service v au chemin courant $c_{\alpha u}$, on vérifie bien entendu que les bornes relatives à l'amplitude et au temps effectif de travail sont respectées, mais on doit aussi vérifier que les horaires de v sont compatibles avec l'enchaînement des services de α à v (chemin déjà construit).

Pour cela, on calcule le chevauchement (`overlap`) entre les services u et v , en considérant leurs horaires préférentiels.

- Si il n'y avait pas de décalage en cours vers la droite, et que le chevauchement éventuel est inférieur à la marge à gauche, le sommet est accepté (Figure 5.6, cas 1)
- Si il y avait un décalage à droite, qui peut soit être compensé par l'ajout de l'arc (uv), soit propagé grâce à la flexibilité de v , alors le sommet est accepté (Figure 5.6, cas 2)
- Sinon, l'ajout du sommet est incompatible avec le chemin partiel déjà construit, on sort de l'appel récursif (Figure 5.6, cas 3)

Avec ces règles de calcul, seule l'une des deux valeurs peut-être non nulle à chaque étape de la récursion.

La figure 5.6 illustre quelques cas rencontrés. Nous supposons que nous avons déjà construit un chemin depuis la source jusqu'au sommet u , et nous étudions la possibilité d'ajouter v au chemin. Sur chaque figure, nous indiquons les valeurs des marges à gauche (Δ_L) et à droite (Δ_R) impliquées par le chemin de α à u . Nous calculons les nouvelles valeurs Δ'_L et Δ'_R qu'impliquerait l'ajout de v et en déduisons la validité du chevauchement.

5.5.3 Réparation de tournées

Étant donné les contraintes de flexibilité horaire, les tournées issues de l'étape précédente ne sont pas forcément admissibles avec les horaires de service initialement prévus. De plus, il n'est pas garanti que l'amplitude et le temps effectif maximaux soient respectés, puisqu'ils dépendent de la valeur des horaires de début et de fin. Lors de la génération des tournées, seules les valeurs des amplitudes et temps effectifs dans le "meilleur cas" ont été considérés, afin de ne pas éliminer des tournées admissibles.

Suppression des chevauchements : `deleteOverlaps`

Dans cette étape, il convient donc de vérifier dans un premier temps que la tournée ne contient pas de services qui se chevauchent (`overlaps`), et de décaler les horaires de début de service le cas échéant. Notons que si une tournée contient des chevauchements,

Algorithme 6 $\text{recGenTour}(u, t, A_+, A_-, E_+, E_-, \Delta_L, \Delta_R, c_{\alpha u})$

Input:

u, t : sommets du graphe
 A_+ : borne supérieure pour l'amplitude
 A_- : borne inférieure pour l'amplitude
 E_+ : borne supérieure pour le temps effectif de travail
 E_- : borne inférieure pour le temps effectif de travail
 Δ_L : décalage disponible à gauche
 Δ_R : décalage utilisé à droite
 $c_{\alpha u}$: chemin de α à u dans le graphe

Variables globales :

$c_{A_+}^v$: le plus court chemin de v à β au sens de l'amplitude
 $c_{A_-}^v$: le plus long chemin de v à β au sens de l'amplitude
 $c_{E_+}^v$: le plus court chemin de v à β au sens du temps effectif de travail
 $c_{E_-}^v$: le plus long chemin de v à β au sens du temps effectif de travail

Output: des chemins c_{ut} potentiellement (A_+, A_-, E_+, E_-) -bornés du graphe

if $u = t$ **then**

return $c_{\alpha u}$

for all $v \in V$ such that $(uv) \in \mathcal{E}$ **do**

$A'_+ \leftarrow A_+ - a_{uv}^-$ ▷ mise à jour des bornes

$A'_- \leftarrow A_- - a_{uv}^+$

$E'_+ \leftarrow E_+ - e_{uv}^-$

$E'_- \leftarrow E_- - e_{uv}^+$

$overlap \leftarrow f_u + \delta_u + t_{uv} - f_v$ ▷ détection des chevauchements impossibles

if $(0 < overlap \leq \Delta_L \ \& \ \Delta_R \leq 0)$ **then** ▷ mise à jour des décalages

$\Delta'_L \leftarrow \min(\Delta_L - overlap, \hat{f}_v)$

$\Delta'_R \leftarrow 0$

else if $(0 < overlap + \Delta_R \leq \Delta_L + \hat{f}_v)$ **then**

$\Delta'_R \leftarrow overlap + \Delta_R - \Delta_L$

$\Delta'_L \leftarrow 0$

else if $(\Delta_R + overlap \leq 0)$ **then**

$\Delta'_R \leftarrow \min(\Delta_L - \Delta_R - overlap, \hat{f}_v)$

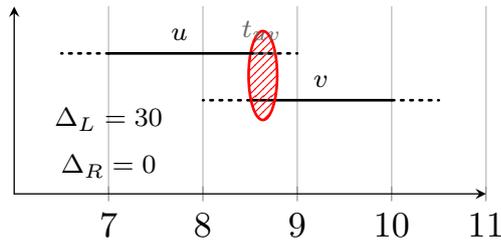
$\Delta'_L \leftarrow 0$

else

$\Delta'_L \leftarrow -1$ ▷ chevauchement impossible : critère d'arrêt

if $((A_{c_{A_+}^v} \leq A'_+) \ \& \ (A_{c_{A_-}^v} \geq A'_-) \ \& \ (E_{c_{E_+}^v} \leq E'_+) \ \& \ (E_{c_{E_-}^v} \geq E'_-) \ \& \ \Delta'_L \neq -1)$ **then** ▷ appel récursif

$\text{RECPATHGENERATION}(v, t, A'_+, A'_-, E'_+, E'_-, \Delta'_L, \Delta'_R, c_{\alpha u} \cdot (uv))$

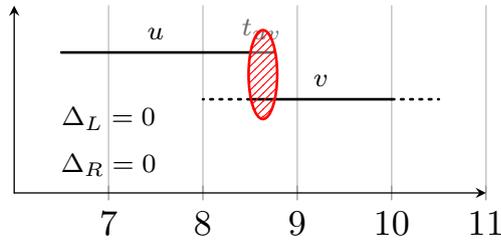


Cas 1 :

$\text{overlap} = 15\text{min}$

$\Delta'_L = 15, \Delta'_R = 0$

→ Chevauchement (uv) valide

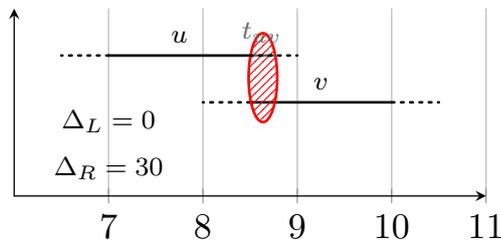


Cas 2 :

$\text{overlap} = 15\text{min}$

$\Delta'_L = 0, \Delta'_R = 15 \leq \hat{f}_v$

→ Chevauchement (uv) valide



Cas 3 :

$\text{overlap} = 15\text{min}$

$\Delta'_L = 0, \Delta'_R = 45 > \hat{f}_v$

→ Chevauchement (uv) invalide

FIGURE 5.6 – Détection des chevauchements invalides

nous sommes certains de pouvoir trouver de nouveaux horaires de début respectant les différentes contraintes du problème puisque les chevauchements invalides auraient été détectés à l'étape précédente.

Décalage des horaires de service : `shiftStart`

Dans un second temps, il convient de calculer l'amplitude et le temps effectif de la tournée, pour vérifier que les limites légales ne sont pas dépassées (`isAdmissible`). Si la tournée n'est pas admissible, nous tentons une réparation de la tournée pour réduire l'amplitude et le temps de travail effectif. Pour cela, nous retardons autant que possible les services qui précèdent le premier service non-flexible de la tournée. De même, nous avançons autant que possible les services effectués après le dernier service non-flexible de la tournée. Si au moins un service peut être décalé, l'amplitude de la tournée en est systématiquement réduite. En revanche, pour le temps de travail effectif, les effets de cette opération ne sont pas aussi évidents. Rappelons que seuls les temps d'attente inférieurs à 15 minutes sont comptabilisés. En réduisant les temps d'inactivité entre deux services, ces décalages peuvent réduire les temps d'attente comptés dans le temps de

travail effectif, ou avoir l'effet inverse.

Dans le cas où cette opération de décalage ne suffirait pas à diminuer l'amplitude et/ou le temps de travail effectif pour que la tournée respecte les limites légales, la tournée est simplement éliminée. Notons également que dans le cas où une tournée serait admissible sans modification, nous ne cherchons pas à décaler les horaires même si cela pourrait réduire le temps effectif de travail ou l'amplitude de la journée.

Cette opération de réparation et de filtrage est détaillée dans l'algorithme 7.

Algorithme 7 Réparation de tournées : `fixTour`

Input: $v_1..v_n$ enchaînement de n sommets (services)

Output: *true* si la tournée est admissible *false* sinon

for all $v \in V$ **do**

$s_v \leftarrow f_v$

▷ initialisation des débuts aux horaires préférentiels

if `OVERLAPS`($s_1..s_n$) **then**

$(s_1..s_n) \leftarrow \text{DELETEOVERLAPS}(s_1..s_n)$

▷ réparation des horaires si il y a chevauchement

if (`! ISADMISSIBLE`($s_1..s_n$)) **then**

$(s_1..s_n) \leftarrow \text{SHIFTSTART}(s_1..s_n)$

▷ décalage horaire si contraintes légales non respectées

return `ISADMISSIBLE`($s_1..s_n$)

5.5.4 Sélection de tournées

Toutes les tournées ayant passé le filtrage de l'étape précédente sont désormais admissibles. Nous cherchons à présent à affecter une tournée à chaque intervenant présent : il s'agit de trouver un partitionnement de l'ensemble \mathcal{S}_O qui offre une couverture la plus grande possible de \mathcal{S} . La formulation mathématique SP2 nous permet de résoudre ce problème.

Formulation mathématique

Modèle SP2 : Modèle de partitionnement

Données et notations

\mathcal{T}_k	ensemble des tournées admissibles de l'intervenant k
$e_{kj} \in \mathbb{N}$	temps effectif de travail de la tournée j de l'intervenant k
$a_{kj} \in \mathbb{N}$	amplitude de la tournée j de l'intervenant k
$t_{kj} \in \mathbb{N}$	temps de trajet de la tournée j de l'intervenant k
$flex_{kj} \in \mathbb{N}$	décalage total des horaires préférentiels dans la tournée j de l'intervenant k
$\Delta_{kj} \in \mathbb{N}$	nombre de changements entre la tournée j de l'intervenant k et sa tournée initiale
$b_{kj}^s \in \{0, 1\}$	vaut 1 si le service s est couvert par la tournée j de l'intervenant k , 0 sinon

Variables de décision

$$x_{kj} = \begin{cases} 1 & \text{si l'intervenant } k \text{ effectue la tournée } j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Objectif primaire

$$\min \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{j=0}^{|\mathcal{T}_k|} b_{kj}^s \times x_{kj} \quad (5.25)$$

Objectifs secondaires

$$\min \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{j=0}^{|\mathcal{T}_k|} t_{kj} \times x_{kj} \quad (5.26)$$

$$\min \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{j=0}^{|\mathcal{T}_k|} flex_{kj} \times x_{kj} \quad (5.27)$$

$$\min \sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{j=0}^{|\mathcal{T}_k|} \Delta_{kj} \times x_{kj} \quad (5.28)$$

Contraintes

$$\sum_{j=0}^{|\mathcal{T}_k|} x_{kj} = 1 \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (5.29)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{j=0}^{|\mathcal{T}_k|} b_{kj}^s \times x_{kj} = 1 \quad \forall s \in \mathcal{S}_O \quad (5.30)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \sum_{j=0}^{|\mathcal{T}_k|} b_{kj}^s \times x_{kj} \leq 1 \quad \forall s \in \mathcal{S} \setminus \mathcal{S}_O \quad (5.31)$$

$$x_{kj} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in \mathcal{K}, \quad \forall j \in \{1..T_k\} \quad (5.32)$$

Notre objectif est de maximiser dans un premier lieu le nombre de services fournis (5.25). Ensuite, nous considérons de multiples objectifs, que nous traiterons deux à deux avec une méthode ϵ -contrainte : la minimisation des temps de trajet (5.26), la minimisation des décalages des horaires de début des services par rapport à leur horaire préférentiel (5.27), et la minimisation du nombre de changements dans les tournées des intervenants (5.28).

Chaque intervenant effectue une unique tournée (5.29), tous les services obligatoires doivent être fournis (5.30). Les services non-obligatoires doivent être effectués une seule fois au maximum (5.31). La contrainte 5.32 définit la nature des variables de décision.

Dominance de Pareto

Dans un problème multi-objectif, la notion d'optimalité au sens usuel peut être difficile à définir, puisque le preneur de décisions peut être intéressé par plusieurs solutions offrant différents types de compromis entre tous les objectifs considérés. On utilise alors la notion d'optimalité de Pareto, dont nous donnons les définitions de base pour un problème bi-objectif dans cette section [188].

Considérons un problème de minimisation de deux fonctions objectifs o_1 et o_2 , et un X l'ensemble des solutions réalisables. Le problème est décrit comme suit :

$$\begin{cases} \min o(x) = (o_1(x), o_2(x)) \\ x \in X \end{cases} \quad (5.33)$$

Soient $x \in X$ et $y \in X$ deux solutions de (5.33).

Définition 1 x domine fortement y ($x \succ y$) si et seulement si

$$o_1(x) < o_1(y) \text{ et } o_2(x) < o_2(y)$$

Définition 2 x domine faiblement y ($x \succeq y$) si et seulement si

$$o_1(x) \leq o_1(y) \text{ et } o_2(x) < o_2(y)$$

ou

$$o_1(x) < o_1(y) \text{ et } o_2(x) \leq o_2(y)$$

Définition 3 x est une **solution Pareto-optimale** (resp. **solution Pareto-optimale faible**) si et seulement si $\nexists y \in S/y \succeq x$ (resp. $\nexists y \in S/y \succ x$)

Définition 4 L'ensemble **Pareto-optimal** (resp. **Pareto-optimal faible**) est composé de toutes les solutions Pareto-optimales (resp. Pareto-optimales faibles)

Définition 5 Le **front de Pareto** (resp. **front de Pareto faible**) est l'image de l'ensemble Pareto-optimal (resp. Pareto-optimal faible)

Si deux solutions n'ont pas de relation de dominance entre elles, alors elles ne peuvent pas être comparées, et toutes deux sont susceptibles de revêtir un intérêt pour le preneur de décision. Notons que le front de Pareto peut être **exact** ou **approximé**, selon que l'algorithme utilisé pour trouver les solutions est lui-même exact ou approximé. Dans la suite du chapitre, lorsque nous parlerons de front de Pareto sans plus de précision, nous ferons référence au front approximé, puisque notre méthode est heuristique.

La Figure 5.7 illustre les notions de dominance et de front de Pareto.

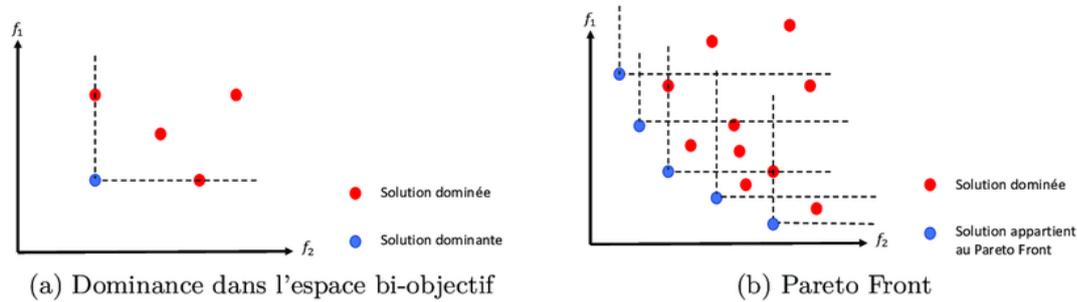


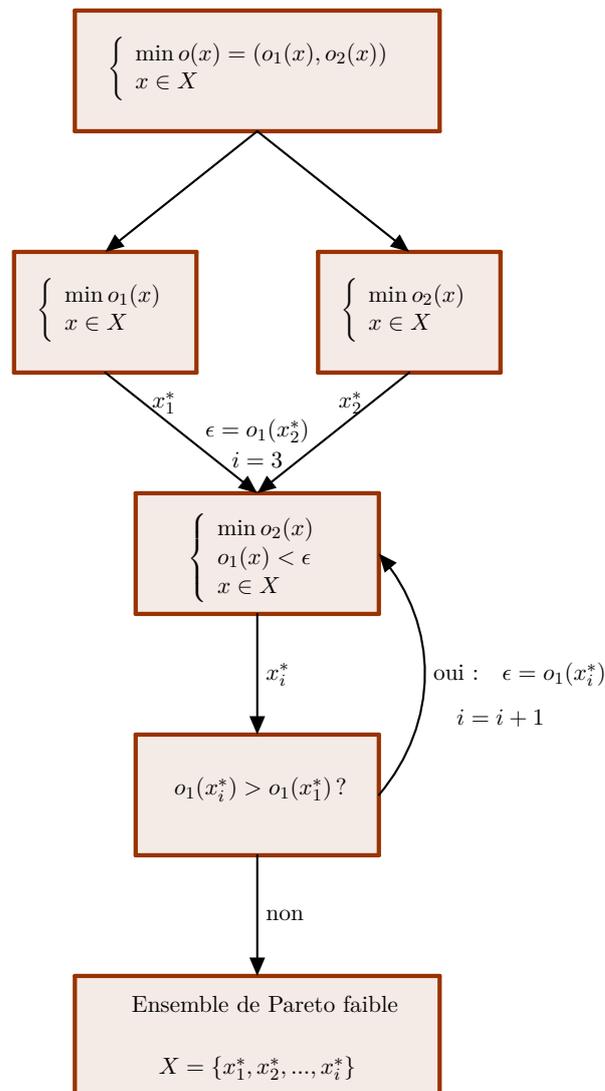
FIGURE 5.7 – Illustration des notions de dominance et de front de Pareto. *Image extraite de la thèse [190]*

Méthode ϵ -contrainte

Nous avons choisi de considérer chaque paire d'objectifs, et de résoudre chacun des trois problèmes bi-objectifs ainsi formés avec une méthode ϵ -contrainte. Pour ce faire, on commence par résoudre les deux problèmes mono-objectifs, qui constituent les deux extrémités du front de Pareto. Ensuite, on minimise une série de problèmes mono-objectifs en ajoutant des contraintes sur la valeur deuxième objectif. La figure 5.8 détaille le fonctionnement de l'algorithme.

Cette méthode permet de calculer un ensemble Pareto-optimal faible. Notons que les

solutions faiblement dominées sont toutefois souvent ignorées des preneurs de décisions, car la solution qui les domine leur est logiquement préférée. Pour cette raison, nous filtrons ensuite l'ensemble des solutions pour ne garder que les solutions non dominées de l'ensemble de Pareto.

FIGURE 5.8 – Méthode ϵ -contrainte

Hypervolume

Pour comparer la qualité des fronts de Pareto trouvés, nous utilisons l'indicateur d'hypervolume (HV) introduit par [247] qui mesure la taille de l'espace de recherche

collectivement dominé par l'ensemble des solutions. Cet indicateur varie entre 0 et 1. Plus sa valeur est élevée, meilleur est le front de Pareto car cela signifie que les solutions offrent un meilleur compromis entre les différents objectifs. Comme il est classiquement d'usage pour les optimisations bi-objectif, nous utilisons le point de référence (1,1). La figure 5.9 donne une illustration de cet indicateur.

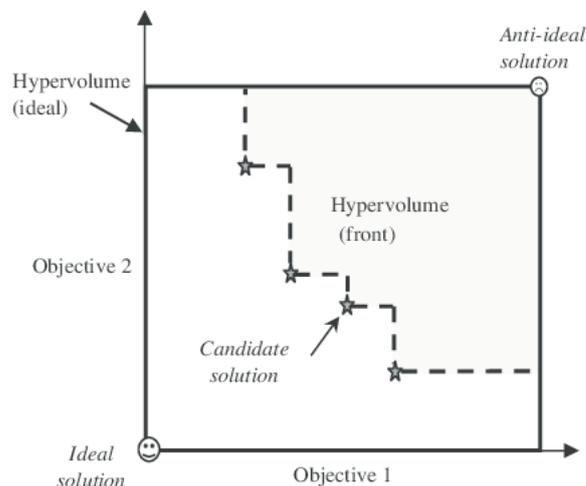


FIGURE 5.9 – Exemple d'hypervolume pour une optimisation bi-objectif. *Schéma extrait de l'article [2]*

5.6 Expérimentations

Nous avons conduit un plan de tests sur des instances générées à partir des instances proposées par Bredström et Rönnqvist [36]. L'algorithme est implémenté en Java, et le solveur Cplex nous a permis de résoudre les différents MILP. Les résultats présentés ci-dessous ont été obtenus avec une machine aux caractéristiques suivantes : Intel®Core™ i5-7440HQ CPU 2.80GHz et 16 GO de RAM.

5.6.1 Génération et classification des instances

Nous utilisons une nouvelle fois les instances de Bredström et Rönnqvist, classiquement utilisées pour les problèmes de tournées de soins. Trois tailles d'instances sont proposées :

- Petites instances (T_1) : 4 intervenants, 20 services
- Moyennes instances (T_2) : 10 intervenants, 50 services
- Grandes instances (T_3) : 16 intervenants, 80 services

Pour chacune de ces instances, nous disposons des matrices de distance entre chaque patient et des durées des services. Pour ces expérimentations, nous ne considérons que les

instances à horaires fixes, qui constitueront les horaires préférentiels de notre problème.

Nous générons ensuite les caractéristiques manquantes :

- Nous considérons 3 niveaux de qualification différents. Les qualifications des intervenants sont aléatoirement générées et équiréparties $(1/3, 1/3, 1/3)$ tandis que pour les services, la répartition est la suivante : $(1/2, 1/4, 1/4)$. Nous avons choisi des répartitions représentatives des répartitions réelles.
- Le taux de services flexibles varie entre 25 % et 75 % du nombre total de services. La taille de la fenêtre de flexibilité est de 15, 30, ou 60 minutes. Elle est identique pour tous les services d'une même instance.
- Le taux de services réassignables varie entre 25 % et 75 % du nombre total de services
- Le taux de services obligatoires varie entre 25 % et 75 % du nombre total de services
- Un intervenant est aléatoirement retiré

Cela nous amène à considérer 349 instances, que nous répartissons en plusieurs familles selon la taille et les différentes caractéristiques, notées $T - F - C$ où

- T représente la taille de l'instance : T_1 (petite), T_2 (moyenne), T_3 (grande).
- F représente le degré de flexibilité : F_1 (peu flexible), F_2 (flexible), F_3 (très flexible)
- C représente le degré de contrainte : C_1 (très contrainte), C_2 (contrainte), C_3 (peu contrainte)

Les critères de catégorisation dans les différentes familles sont détaillés dans les tableaux 5.1 et 5.2.

		Taux de services obligatoires		
		25%	50%	75%
Taux de services réassignables	25%	C_2	C_1	C_1
	50%	C_3	C_2	C_1
	75%	C_3	C_3	C_2

TABLE 5.1 – Catégorisation des instances selon le degré de contraintes

5.6.2 Résultats numériques

Pour toutes les instances, nous tentons une première résolution avec Cplex en utilisant la formulation mathématique présentée en section 5.4, de laquelle nous retirons les contraintes non-linéaires (5.16 5.17 5.18) qui correspondent à la limitation du temps de

		Taille de la fenêtre de flexibilité		
		15	30	60
Taux de services flexibles	25%	F_1	F_1	F_2
	50%	F_1	F_2	F_3
	75%	F_2	F_3	F_3

TABLE 5.2 – Catégorisation des instances selon le degré de flexibilité

travail effectif. En effet, le solveur n'est pas en mesure de résoudre des problèmes comportant ce type de contraintes. La formulation devient donc un MILP. Nous considérons uniquement l'objectif primaire, à savoir la maximisation de la couverture des services. Comme c'est un problème moins contraint que celui que nous résolvons avec notre algorithme, la valeur objectif optimale obtenue avec Cplex est une borne supérieure pour la couverture des services.

D'autre part, il se peut que Cplex trouve une solution sur une instance qui est en fait irréalisable lorsque l'on considère la contrainte que l'on a relâchée.

Les résultats numériques obtenus se trouvent dans le tableau 5.3. Pour chaque famille d'instance, nous notons le nombre d'instances total N ; le pourcentage d'instances N_{solv} pour lequel nous trouvons une solution ; le gap moyen (GAP) à la borne supérieure pour la couverture fournie par la formulation relâchée du problème ; et le temps d'exécution moyen pour le MILP (CPU_{MILP} , en ms). Le nombre d'instances par famille est très variable car la génération aléatoire a produit de nombreuses instances infaisables que nous avons détectées avec le MILP, et donc écartées des expérimentations que nous présentons ici.

Pour chaque paire d'objectifs, nous notons le nombre moyen de solutions NS_{avg} qui composent le front de Pareto faible approximé de chaque instance, le nombre moyen de solutions non dominées NS_{avg}^* , puis le temps moyen pour résoudre chaque instance (en ms). L'objectif noté O_T représente la minimisation des temps de trajets en minutes ; O_D représente la minimisation des décalages horaires en minutes, et O_R , la minimisation des réaffectations (ou changements dans les tournées).

La colonne HV indique la valeur moyenne des hypervolumes des fronts de Pareto, calculés à partir du point de référence (1,1).

5.6.3 Analyse des résultats

De manière générale, notre algorithme a de bonnes performances puisque sur les 349 instances testées, nous en résolvons 336, avec un gap moyen à la borne fournie par Cplex de 0,7 % sur toutes les instances, et de 3.3 % dans le pire cas (instances $T_2 - F_3 - C_1$). Les temps d'exécution sur les instances de petite taille (T_1) sont semblables à ceux du MILP, alors qu'ils sont généralement plus courts sur les instances de taille moyenne, mais plus élevés sur les grandes instances. Notons que de par l'implémentation de notre méthode, la génération des tournées admissibles est une phase commune à toutes les solutions

Famille d'instance	N	N _{solve} %	GAP %	CPU _{MILP} (ms)	O _T /O _D			O _T /O _R			O _D /O _R						
					N _{avg}	N _{S*} N _{avg}	HV	CPU (ms)	N _{avg}	N _{S*} N _{avg}	HV	N _{avg}	N _{S*} N _{avg}	HV	CPU (ms)		
T1	T ₁ - F ₁ - C ₁	9	100	0	35	2,11	1,22	0,98	10	2,56	1,56	0,60	17	2,56	1,00	1,00	13
	T ₁ - F ₁ - C ₂	13	100	0	90	2,38	1,31	0,88	63	2,69	1,62	0,56	67	26,08	1,23	0,77	61
	T ₁ - F ₁ - C ₃	24	100	0	88	2,29	1,25	0,88	106	3,13	1,71	0,45	124	3,38	1,13	0,98	117
	T ₁ - F ₂ - C ₁	23	100	0,2	48	2,48	1,04	0,74	20	2,48	1,39	0,73	16	2,87	1,13	0,95	18
	T ₁ - F ₂ - C ₂	47	100	0,2	72	2,62	1,60	0,73	51	2,87	1,64	0,72	49	2,89	1,64	0,71	46
	T ₁ - F ₂ - C ₃	59	94,92	0,09	125	2,82	1,75	0,72	116	3,23	2,05	0,61	116	2,07	1,36	0,76	105
	T ₁ - F ₃ - C ₁	10	70	0	67	3,71	2,86	0,29	79	2,71	1,57	0,50	55	2,86	1,57	0,60	63
T ₁ - F ₃ - C ₂	16	93,75	1,5	75	3,07	2,00	0,56	42	2,80	1,73	0,60	50	2,67	1,47	0,64	48	
T ₁ - F ₃ - C ₃	25	100	1,3	161	4,36	3,24	0,33	365	4,00	2,60	0,19	240	3,60	1,60	0,53	240	
T2	T ₂ - F ₁ - C ₁	5	100	0	531	2,20	2,20	0,92	335	6,60	6,00	0,54	673	6,40	1,20	0,97	681
	T ₂ - F ₁ - C ₂	6	100	0,6	1225	5,83	5,83	0,70	11513	10,00	9,67	0,74	8971	5,83	1,67	0,50	8650
	T ₂ - F ₁ - C ₃	5	100	0	1810	4,40	4,00	0,93	7865	20,00	11,80	0,65	10585	8,00	1,20	0,80	7192
	T ₂ - F ₂ - C ₁	9	100	0,5	941	5,33	5,22	0,83	451	7,11	6,44	0,67	567	6,44	1,22	0,96	580
	T ₂ - F ₂ - C ₂	14	100	0,4	3656	9,00	8,29	0,86	13868	13,00	12,14	0,69	12967	7,29	2,86	0,87	11108
	T ₂ - F ₂ - C ₃	13	100	0,5	8115	10,15	9,77	0,82	36798	14,46	13,54	0,76	25784	8,23	2,92	0,85	25677
	T ₂ - F ₃ - C ₁	4	75	3,3	1471	9,67	9,00	0,75	884	7,00	6,33	0,64	920	7,00	3,67	0,78	1072
T ₂ - F ₃ - C ₂	4	100	1	5232	8,25	7,75	0,57	1267	7,50	6,75	0,60	11821	6,25	4,25	0,73	14043	
T ₂ - F ₃ - C ₃	5	100	0,8	39938	18,60	17,20	0,75	52414	9,80	9,20	0,58	46357	6,20	4,00	0,76	58840	
T3	T ₃ - F ₁ - C ₁	6	83,33	1	3546	5,20	5,20	0,80	2214	7,00	6,60	0,79	1806	6,00	2,00	0,91	1990
	T ₃ - F ₁ - C ₂	6	100	1	15486	7,33	7,17	0,72	13952	10,33	10,17	0,72	8332	8,50	3,00	0,90	11141
	T ₃ - F ₁ - C ₃	6	100	1,3	35224	5,83	5,50	0,88	33926	9,33	8,83	0,41	11556	9,00	2,33	0,92	18684
	T ₃ - F ₂ - C ₁	15	86,67	1,2	5884	11,62	10,77	0,82	3785	8,62	8,08	0,70	2216	6,92	2,46	0,78	2942
	T ₃ - F ₂ - C ₂	14	92,86	1,3	44772	11,15	10,92	0,69	28049	10,15	9,92	0,62	19110	9,00	4,23	0,75	26977
	T ₃ - F ₂ - C ₃	2	100	0,6	34837	14,50	14,50	0,85	15695	8,50	8,00	0,71	13393	6,50	3,50	0,44	6987
	T ₃ - F ₃ - C ₁	4	100	0,6	4957	15,50	14,75	0,80	12070	8,25	8,25	0,63	4235	5,50	2,75	0,90	4612
T ₃ - F ₃ - C ₂	5	80	1,6	85842	30,50	30,25	0,88	21318	13,50	12,50	0,70	18684	8,25	4,25	0,93	23887	

TABLE 5.3 – Résultats numériques pour la méthode ORO

composant le front de Pareto d'une instance. Ainsi, pour chaque instance, nous ne générons en réalité qu'une seule fois les chemins, et nous relançons uniquement le MILP de partitionnement d'ensemble. Le temps moyen nécessaire pour trouver l'ensemble des solutions d'un front de Pareto est donc inférieur à $NS_{avg} \times CPU$. Notons également que pour les exécutions du MILP, nous n'avons considéré que l'objectif de couverture, qui nous donne une borne supérieure. Une résolution avec des objectifs secondaires serait forcément plus chronophage.

Les familles pour lesquelles nous résolvons moins d'instances, ou celles présentant les *GAP* les plus élevés sont majoritairement les instances avec une flexibilité élevée. Les instances de Bredström et Rönnqvist telles qu'elles ont été construites produisent des tournées relativement denses. Ainsi, les tournées que nous générons ont des temps de travail effectif élevés, puisqu'il y a peu de pauses supérieures à 15 minutes, et beaucoup de temps de service dans la journée. Comme cette contrainte est relâchée dans le MILP, sur une instance avec une flexibilité élevée, cela peut se traduire par une tournée qui commence plus tôt, finit plus tard, et contient plus de services. Le nombre de services augmentant, il en est de même pour le nombre de déplacements, et le nombre de périodes d'inactivité entre deux services : autant de facteurs qui augmentent le temps effectif de travail.

Deux hypothèses peuvent donc expliquer nos performances. Premièrement, nous pouvons supposer que la borne proposée par Cplex est moins bonne, et que les solutions contiennent des tournées non-admissibles dont les temps de travail effectif dépassent les valeurs légales, puisque nous avons relâché les contraintes associées. Deuxièmement, il convient de noter que notre opération de réparation des tournées (`shiftStart`) a ses limites lorsqu'il s'agit de diminuer le temps de travail effectif. En effet, nous n'arrivons pas toujours à réparer des tournées qui pourraient pourtant être admissibles sous réserve de décaler certains services. Il est donc possible que nous éliminions des tournées admissibles qui auraient dûes être considérées dans la phase de sélection finale.

Intéressons-nous désormais aux différents résultats obtenus avec chaque paire d'objectifs considérée. Remarquons dans un premier temps que pour les instances de petite taille, le nombre de solutions moyen constituant le front de Pareto est très faible, et proche de 1, d'autant plus lorsque la flexibilité est faible ou que l'instance est très contrainte. Cela s'explique par le fait que les instances ayant peu de tournées (3 chacune), une fois la couverture des services maximisée, il y a peu de solutions possibles. Ainsi, seule une ou deux solutions constituent la majorité des ensembles de Pareto de ces instances. On peut généraliser la remarque aux tailles supérieures : quels que soient les objectifs considérés, les ensembles de Pareto des familles C_1 et F_1 sont les plus restreints, et contiennent plus de solutions lorsqu'on augmente la flexibilité et/ou on relâche les contraintes de priorité et de réaffectation.

Dans la figure 5.10, nous comparons les valeurs de l'indicateur d'hypervolume pour chaque configuration selon chaque famille d'instance. La figure 5.11 montre le nombre

moyen de solutions non dominées composant le front de Pareto approximé.

La configuration bi-objectif “décalage des horaires des services/réaffectations” (O_D/O_R) est celle qui offre les ensembles de Pareto les plus réduits, quelle que soit la taille d’instance considérée. On note d’ailleurs que pour les instances $T_1 - F_1 - C_1$, il y a très exactement une solution par front de Pareto : cela signifie que les optimisations mono-objectif de chacun des deux objectifs donnent la même solution. Cela explique donc la valeur de l’hyper volume qui vaut 1.

Nous notons que pour les instances de taille 1, le nombre moyen de solutions non dominées est faible quelle que soit la configuration observée. Toutefois, la minimisation conjointe du décalage des horaires et des réaffectations est celle qui offre le plus grand hypervolume, c’est-à-dire des solutions qui offrent un bon compromis entre les deux objectifs considérés. Globalement, la minimisation des temps de trajets et des réaffectations offre des hypervolumes plus réduits, c’est-à-dire que la prise en compte des deux objectifs impacte plus fortement la qualité des solutions.

Un nombre élevé de solutions dans le front de Pareto est un indicateur de qualité du front : le décideur a ainsi plus d’options à considérer. Toutefois, la mesure de l’hyper-volume permet d’apporter une autre information, sur la qualité du compromis. La figure 5.12 permet de comparer les fronts de Pareto de deux instances de la même famille (en l’occurrence $T_2 - F_2 - C_2$) pour la configuration temps de trajets/réaffectations. Pour l’instance 1, l’hyper-volume calculé est de 56,4 %, alors qu’il est de 83% pour l’instance 2. Cela signifie que les compromis entre temps de trajets et réaffectations sont meilleurs pour l’instance 2 que pour l’instance 1.

L’objectif des temps de trajet est celui pouvant varier le plus du fait de la nature des instances, il est logique que les configurations impliquant l’optimisation des temps de trajet impliquent plus d’itérations de la méthode ϵ -contrainte. Cela justifie le fait que les ensembles de Pareto des configurations O_T/O_D et O_T/O_R soient plus peuplés que pour la configuration O_D/O_R

On peut noter que les ensembles de Pareto faibles générés pour la configuration O_D/O_R contiennent beaucoup de solutions dominées en comparaison des deux autres configurations. La figure 5.13 illustre ce phénomène, et montre un exemple de front de Pareto faible, dans lequel nous distinguons les solutions faiblement dominées et les solutions non-dominées.

Dans la figure 5.14, nous donnons un exemple représentatif des différents fronts de Pareto observés. Nous observons les trois fronts de Pareto normalisés obtenus pour chacune des trois configurations bi-objectif sur une instance avec 9 intervenants, 50 services dont 37 sont obligatoires, 37 sont réassignables et 37 ont une fenêtre de flexibilité de $+/- 15$ minutes. Si le décideur souhaite privilégier la stabilité du planning, il peut choisir une des solutions du front O_D/O_R qui offre peu d’options mais un très bon compromis entre les deux objectifs. Si le décideur préfère maintenir une certaine stabilité tout en préservant des temps de trajets faibles, il pourra choisir une solution parmi celles composant l’un des

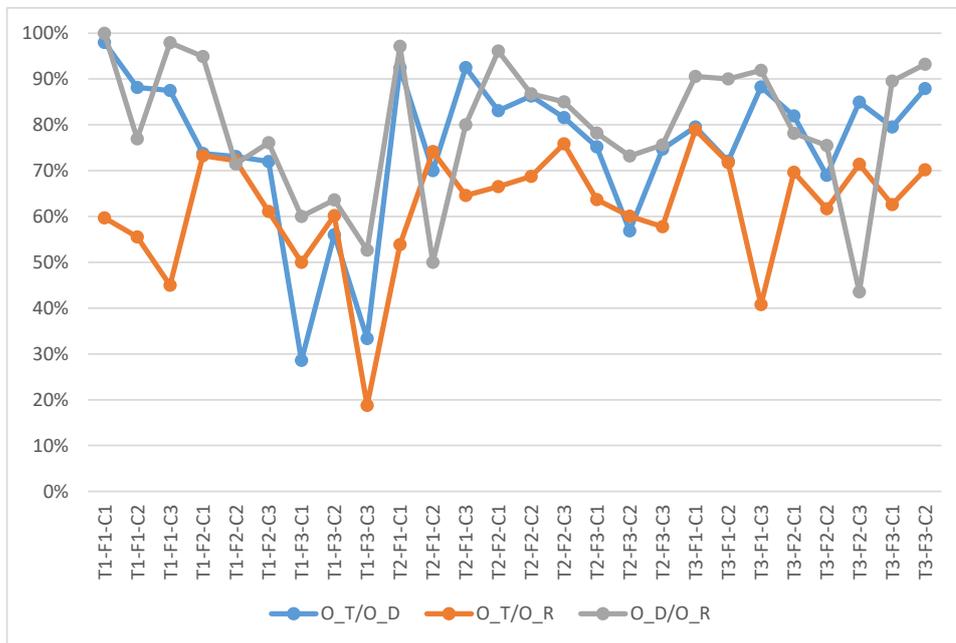


FIGURE 5.10 – Hypervolume moyen des fronts de Pareto approximés pour chaque famille d'instance, pour chaque configuration bi-objectif

deux autres fronts de Pareto. Une solution du front O_T/O_D serait en faveur de la satisfaction des patients, tandis qu'une solution du front O_T/O_R favoriserait les intervenants.

5.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthode heuristique dédiée à la réoptimisation des tournées pour pallier l'absentéisme ponctuel du personnel. Nous avons gardé des contraintes légales issues des CCN et avons adapté les contraintes de continuité humaine et temporelle aux réalités du terrain. Ainsi, nous avons étudié des possibilités de flexibilité horaire, et relâché la continuité humaine dans certains cas.

Comme les enjeux d'un tel problème sont multiples, nous avons adopté une approche multi-objectif, mêlant une hiérarchisation de certains objectifs, et une optimisation jointe d'objectifs secondaires, via une méthode ϵ -contrainte. En générant les fronts de Pareto, nous proposons diverses options au preneur de décision, qui pourra décider de privilégier la stabilité face au planning initial, ou des objectifs plus classiques comme les temps de trajet. Nous parvenons à proposer des solutions avec une bonne couverture de service, même sur des instances de grande taille, avec un temps d'exécution très rapide.

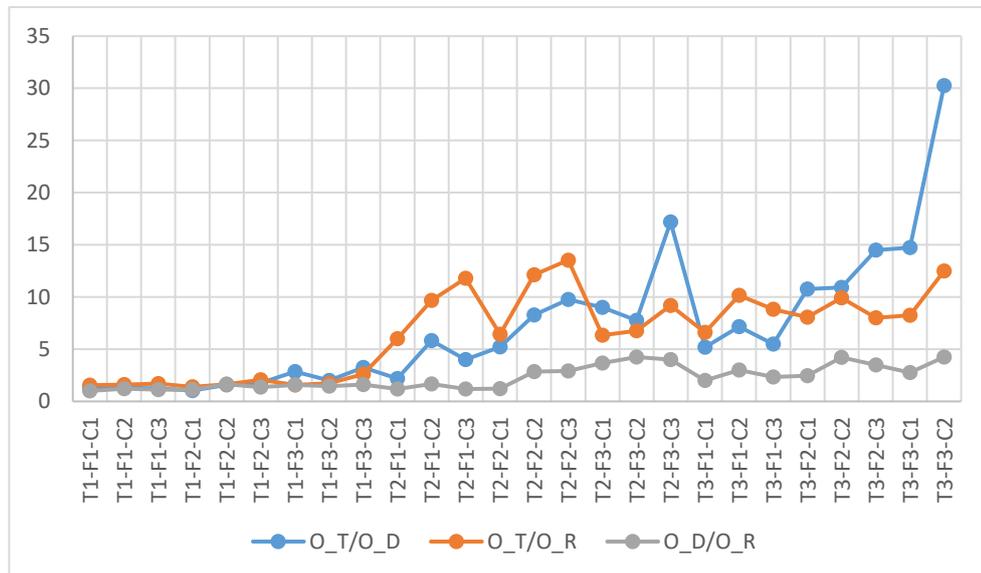


FIGURE 5.11 – Nombre moyen de solutions non dominées composant les fronts de Pareto approximés pour chaque famille d’instance, pour chaque configuration bi-objectif

Une amélioration de l’heuristique de réparation des tournées permettrait de ne pas éliminer des tournées admissibles lors du filtrage. Aussi, l’adaptation de la méthode à des graphes contenant des cycles pourrait permettre de trouver des meilleures solutions sur des instances où les services sont courts et où la flexibilité est élevée. Cela correspond à des cas où des services consécutifs peuvent être interchangés.

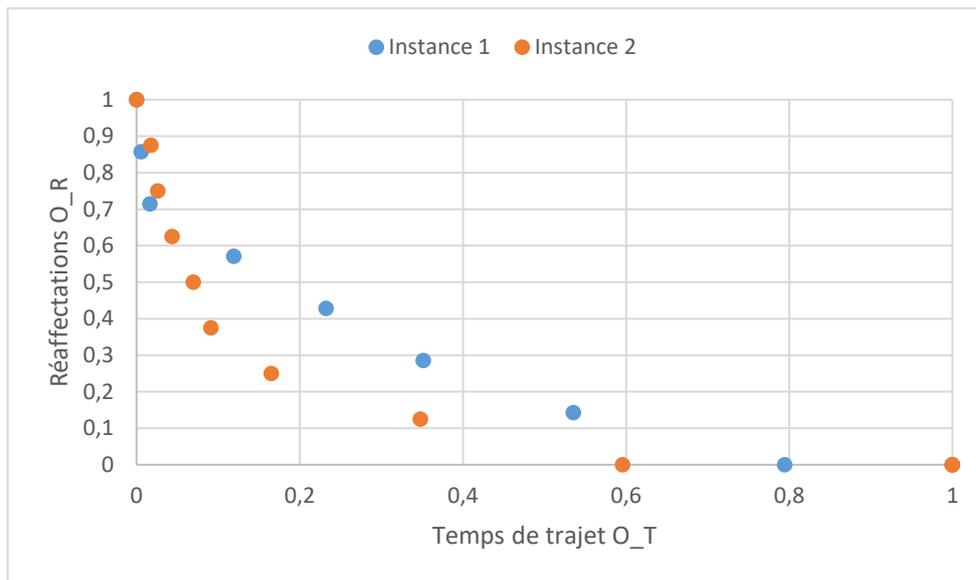


FIGURE 5.12 – Fronts de Pareto normalisés pour deux instances de la même famille

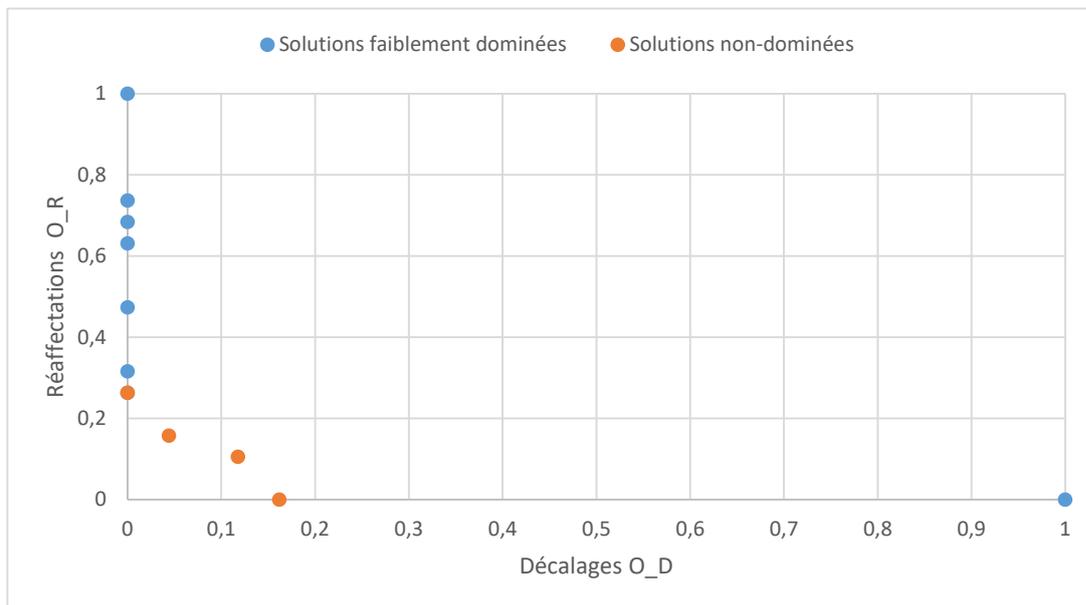


FIGURE 5.13 – Front de Pareto faible normalisé pour une instance $T_3 - F_1 - C_2$ dans la configuration O_D/O_R

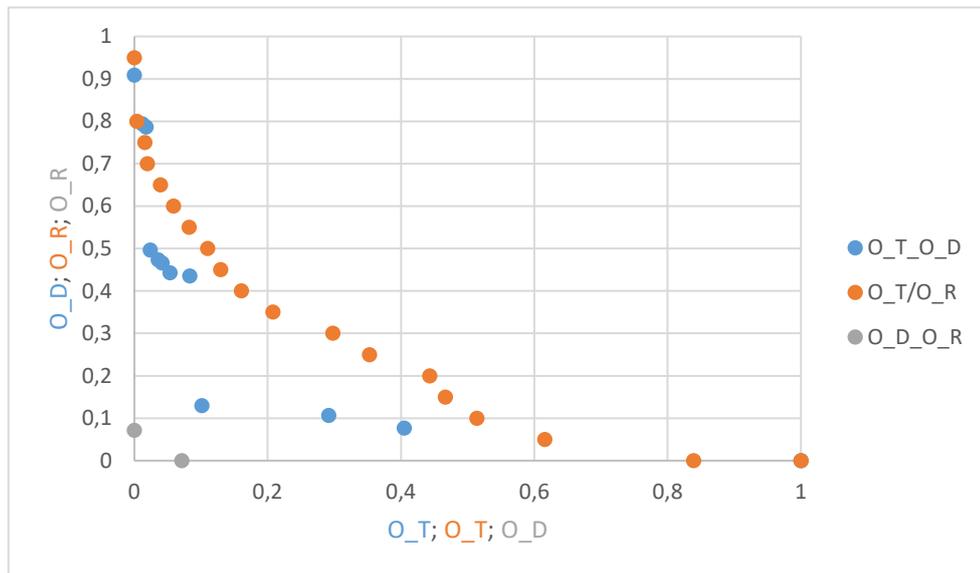


FIGURE 5.14 – Fronts de Pareto normalisés pour chaque configuration objectif d'une même instance

Général	
A_{max}	amplitude maximale
E_{max}	temps de travail effectif maximal
E_{min}	temps de travail effectif minimal
\mathcal{L}	intervalle de pause déjeuner
Intervenant k	
\mathcal{K}/K	ensemble/nombre d'intervenants
q_k	niveau de compétence
Patient p	
\mathcal{P}/P	ensemble/nombre de patients
k_s	intervenant initialement affecté au service s
Service s	
\mathcal{S}/S	ensemble/nombre de services
\mathcal{S}_O	ensemble de services obligatoires
\mathcal{S}_R	ensemble de services réaffectables
\mathcal{S}_C	ensemble de checkpoints (services obligatoires et non réaffectables)
δ_s	durée de service
f_s	horaire de début préférentiel
\hat{f}_s	flexibilité autorisée
ρ_s	compétence requise
HHCRSP3/ORO	
$G(V, \mathcal{E})$	graphe
$\alpha; \beta$	sommets fictifs
$\mathcal{S}^* \mathcal{S}_p^*$	ensembles $\mathcal{S} \mathcal{S}_p$ auxquels on ajoute les sommets fictifs α et β
t_{ij}	temps de trajet entre les services i et j
w_{ij}^{CCN}	temps d'attente au sens des CCN entre i et j (page 69)
ORO	
$inact_{ij}^-$	inactivité minimale entre les services i et j
$inact_{ij}^+$	inactivité maximale entre les services i et j
a_{ij}^-	amplitude minimale impliquée par la succession des services i et j
a_{ij}^+	amplitude maximale impliquée par la succession des services i et j
e_{ij}^-	temps de travail effectif minimal impliqué par la succession de i et j au sens des CCN (page 110)
e_{ij}^+	temps de travail effectif minimal impliqué par la succession de i et j au sens des CCN (page 110)
c_{uv}	chemin de u à v
A_c, E_c	amplitude et temps effectif de travail induits par un chemin c
c_{A-}^v / c_{A+}^v	plus court chemin de v jusqu'à β au sens de l'amplitude minimale/maximale
c_{E-}^v / c_{E+}^v	plus court chemin de v jusqu'à β au sens du temps effectif de travail minimal/maximal
Δ_L, Δ'_L	marge de décalage "à gauche" avant/après ajout du sommet courant
Δ_R, Δ'_R	décalage utilisé "à droite" avant/après ajout du sommet courant
$A_+/A-, E_+/E-$	borne supérieure / inférieure pour l'amplitude et pour le temps effectif de travail
A'_+, A'_-, E'_+, E'_-	nouvelles valeurs de A_+, A_-, E_+, E_- après ajout d'un sommet
SP2/ORO - pour la tournée j de l'intervenant k	
\mathcal{T}_k	ensemble des tournées admissibles de l'intervenant k
e_{kj}	temps de travail effectif de la tournée
a_{kj}	amplitude de la tournée
t_{kj}	temps de trajet de la tournée
$flex_{kj}$	décalage total des horaires préférentiels
Δ_{kj}	nombre de changements entre la tournée j et la tournée initiale de l'intervenant k
b_{kj}^s	booléen indiquant si le service s est couvert par la tournée

TABLE 5.4 – Tableau récapitulatif des notations utilisées dans le chapitre 5

Chapitre 6

Cas d'étude : Adomni-Quemera, une entreprise de services à domicile en Nord-Isère

Sommaire

6.1	Préambule	134
6.2	Présentation d'Adomni-Quemera	135
6.2.1	Élaboration manuelle des plannings	135
6.2.2	Automatisation de la planification	136
6.3	Description des problèmes	137
6.3.1	Caractéristiques générales	137
6.3.2	Contraintes additionnelles	137
6.3.3	Objectifs pour la réoptimisation stratégique	140
6.4	Adaptation des méthodes SRO et ORO	140
6.4.1	Prise en compte des nouvelles contraintes	140
6.4.2	Prise en compte des nouveaux objectifs	143
6.4.3	Adaptation pour passer à l'échelle	143
6.5	Interface et traitement des données	144
6.5.1	Construction de la base de données	144
6.5.2	Utilisation de l'interface	145
6.5.3	Processus de replanification	148
6.5.4	Maintenance	150
6.6	Expérimentations	150
6.6.1	Expérimentations pour le problème stratégique	150
6.6.2	Expérimentations pour le problème opérationnel	153
6.7	Discussion	158

Ce chapitre présente le cas d'étude pour lequel nous avons proposé une preuve de concept pour l'application pratique des méthodes théoriques introduites dans les deux chapitres précédents.

L'étude menée sur le terrain a fait l'objet d'une publication en conférence internationale francophone [167].

6.1 Préambule

Les travaux présentés dans cette thèse ont été motivés par la volonté de résoudre des problèmes de recherche opérationnelle proches de la réalité du terrain. Tout au long des chapitres présentés, nous nous sommes attachées à prendre en compte l'aspect humain et des contraintes de la vie réelle. Les problématiques explorées, les contraintes et objectifs étudiés ont été en partie inspirés par un cas réel que nous présentons dans ce chapitre. Nous avons en effet établi un partenariat qui a mené à un contrat de collaboration de recherche avec une entreprise de services à domicile basée à Bourgoin-Jallieu (Isère), Adomni-Quemera.

Cette collaboration nous a permis de dégager de nouvelles pistes de recherche et des contraintes peu étudiées dans la littérature, que nous avons évoquées dans les chapitres précédents. Malgré notre intention de rester proches de la réalité, les problèmes traités sont simplifiés par rapport au cas réel, comme dans la plupart des travaux de la littérature (cf chapitre 2) et les méthodes développées précédemment ne peuvent être appliquées telles quelles à notre cas d'étude. Ce chapitre présente les adaptations de nos travaux à un cas réel, les réflexions et pistes de recherche nées de cette collaboration.

Comme évoqué dans la section 2.3.4 du chapitre 2, les études de terrain sont de plus en plus nombreuses dans la littérature. La plupart du temps, il s'agit de prendre en compte quelques contraintes pratiques avec des expérimentations sur des données réelles. Dans cette étude, nous considérons toutes les contraintes légales issues des CCN, mais également toutes les spécificités intrinsèques au domaine du service à domicile. En particulier, nous adoptons la politique de planification menée par Adomni-Quemera qui vise à améliorer les conditions de travail des intervenants. Cela se traduit par l'ajout de contraintes de planification plus strictes que les recommandations des CCN. Cet aspect n'est pas étudié dans les travaux de la littérature dont nous avons connaissance.

Nous commençons par présenter Adomni-Quemera, l'entreprise avec laquelle nous avons collaboré. Nous énonçons ensuite les difficultés liées au terrain, les modifications qu'elles imposent dans les problèmes étudiés et enfin les méthodes mises en place. Nous présentons brièvement le prototype développé pour répondre aux besoins de l'entreprise, suivi de quelques expérimentations menées sur des données réelles. Nous concluons enfin ce chapitre avec une réflexion sur la démarche mise en place, les difficultés survenues notamment pour faire le lien entre recherche et vie réelle, et une discussion sur les perspectives de recherche issues de cette collaboration.

Notons que dans ce chapitre, nous parlons exclusivement de service à domicile, nous utiliserons donc la terminologie adaptée, à savoir "bénéficiaires" pour désigner les clients de la structure, et "services" pour les actes fournis lors des interventions, même pour les quelques cas relevant de l'hospitalisation à domicile. Pour des raisons de confidentialité, nous ne pouvons pas entrer dans le détail du fonctionnement interne de l'entreprise et

nous passons délibérément sous silence certaines valeurs numériques et certaines spécificités de fonctionnement.

6.2 Présentation d'Adomni-Quemera

La société Adomni-Quemera est un centre de services à domicile basé à Bourgoin-Jallieu qui propose des “prestations personnalisées aux personnes fragilisées, c'est-à-dire âgées, dépendantes, atteintes d'un handicap ou d'une maladie” [1]. Au moment de notre collaboration, en 2019, la société employait près de 80 intervenants, et opérait auprès d'environ 250 bénéficiaires.

Environ 2000 heures de services sont requises par semaine, avec environ moitié moins d'heures les jours de week-end par rapport aux jours de semaine : étant donné que moins d'intervenants travaillent le week-end, seuls les services quotidiens et indispensables sont proposés à ce moment-là. Les services sont classés dans une vingtaine de catégories différentes, allant de l'aide au ménage à des actes d'hospitalisation à domicile, en passant par de la garde active ou de l'accompagnement. Les types d'intervention les plus demandées sont les aides à la mobilisation (environ 50% des services en semaine, plus de 60% en week-end) et les aides au repas (environ 10 %).

Notons enfin qu'Adomni-Quemera a divisé le territoire sur lequel ses salariés interviennent en plusieurs secteurs géographiques (une vingtaine au moment de notre collaboration). Chaque intervenant est affecté à un secteur, et est supposé ne desservir que des bénéficiaires résidant à l'intérieur de ce secteur. Tous les secteurs ne sont pas de taille identique, tant en termes de surface qu'en termes de nombre d'intervenants/bénéficiaires associés. Les secteurs les plus étendus ne sont d'ailleurs pas forcément les plus “peuplés”, puisque le territoire global couvre à la fois des zones urbaines et rurales, avec des demandes très variables. Bien que primordiale au premier abord, nous verrons plus tard dans le chapitre que la sectorisation est finalement assez peu respectée en pratique, et soulève différents questionnements.

6.2.1 Élaboration manuelle des plannings

En plus des aides à domicile, le groupe de sociétés dont Adomni-Quemera fait partie emploie une dizaine de salariés supplémentaires, chargés de différentes tâches administratives (comptabilité, secrétariat, recrutement, support technique, etc.). Parmi eux, des employées ont pour mission de réaliser les plannings : ce sont les planificatrices.

La planification des tournées est réalisée à la main, et représente une tâche extrêmement chronophage. En théorie, les planificatrices ont pour objectif de remanier complètement les plannings plusieurs fois par an, mais en pratique, la tâche est beaucoup trop lourde pour permettre une reconstruction totale, donc seuls des ajustements sont

réalisés. La réoptimisation stratégique que nous évoquons dans le chapitre 4 est donc réalisée au fil de l'eau. Ainsi, même en supposant que le tout premier planning conçu et mis à exécution ait été optimal, il devient au bout de quelques mois (voire quelques semaines) très éloigné de l'optimal à cause des dégradations successives qu'il subit pour répondre aux continues perturbations.

La population de bénéficiaires est par nature extrêmement changeante. Les décès, hospitalisations ou départs en maison de retraite sont réguliers. La demande étant très forte, de nouveaux bénéficiaires intègrent régulièrement la structure pour contrebalancer ces départs. Face à une forte charge de travail, des conditions stressantes et une faible reconnaissance du métier, le personnel est lui aussi soumis à un fort roulement.

L'élaboration des plannings demande une très grande connaissance métier pour identifier les contraintes du terrain et les prendre en compte afin de créer des tournées réalisables en pratique. Les planificatrices doivent également connaître les intervenants et les bénéficiaires, leurs habitudes, leurs contraintes, leur personnalité, leur pathologie, pour adapter les plannings selon les compatibilités et incompatibilités qui peuvent se créer au fil du temps.

Au niveau opérationnel, la nécessité de modifier les plannings suite à des imprévus survenus à la dernière minute est quotidienne. Le plus souvent, un intervenant signale le matin par téléphone qu'il est en incapacité de venir travailler la journée même. Alors, les planificatrices doivent rapidement trouver une solution pour re-distribuer la tournée impactée (ou du moins ses services prioritaires) sur d'autres tournées, quitte à modifier des affectations ou des horaires d'interventions.

Là encore, la connaissance du terrain, des intervenants et des bénéficiaires est essentielle pour réagir de manière efficace aux imprévus. Même si le turnover sur ces postes est très faible, il faut former les nouveaux arrivants à chaque recrutement et le temps d'adaptation nécessaire à leur bonne connaissance de la structure freine la fluidité de ce processus de réoptimisation opérationnelle.

6.2.2 Automatisation de la planification

Il est primordial de créer des plannings satisfaisants pour les intervenants, afin de limiter le turnover et de créer un environnement de travail plus stable. Bien entendu, il faut également assurer un équilibre économique à l'entreprise. Adomni-Quemera étant une structure de taille importante, il est difficile pour les planificatrices d'avoir une vue d'ensemble et d'imaginer des tournées complètement différentes de celles déjà en exécution. Le besoin d'un outil d'aide à la décision est bien réel.

Au niveau stratégique, il permettrait de décharger les planificatrices d'une tâche colossale, mais aussi de suggérer de nouvelles organisations des tournées en considérant éventuellement plusieurs possibilités de plannings selon différents critères à optimiser ou plusieurs types de contraintes. Au niveau opérationnel, un tel outil améliorerait la réactivité des planificatrices face aux imprévus ainsi que la fluidité des processus de réoptimisation.

Nous avons donc entrepris d'adapter les méthodes présentées dans les chapitres précédents, pour développer un prototype logiciel pouvant proposer des réoptimisations de tournées à partir de plannings existants ayant subi des perturbations. Cet outil n'a pas vocation à remplacer le travail des planificatrices, mais vise plutôt à constituer un outil d'aide à la décision en proposant rapidement différentes options de replanification.

6.3 Description des problèmes

Dans cette section, nous précisons les caractéristiques des problèmes soumis régulièrement aux planificatrices, tant sur le plan stratégique qu'opérationnel. Nous avons déjà formellement décrit les problèmes étudiés dans les chapitres précédents. Même si nous avons la volonté de résoudre des problèmes proches de la réalité, la grande quantité de contraintes légales spécifiques au domaine ou issues du terrain ne pouvait être complètement prise en compte. En effet, nous souhaitons tester nos méthodes sur des instances de la littérature, qui devenaient irréalisables si l'on essayait de tenir compte de toutes les contraintes identifiées. Ici, nous nous attardons sur les nouveaux aspects pris en compte. Le lecteur pourra se référer aux sections 4.3 et 5.3 pour compléter les éléments de description des problèmes donnés ci-après.

6.3.1 Caractéristiques générales

Les horaires des interventions sont programmés entre 6h et 21h. Les plages de disponibilités pour les intervenants s'étalent donc entre 6h et 21h également. Le jour de repos hebdomadaire obligatoire peut être fixe, ou bien être laissé libre auquel cas il sera choisi durant le processus de replanification.

On distingue 4 niveaux de qualification, dont les compétences sont hiérarchisées : les intervenants de niveau 3 sont les plus qualifiés et sont en mesure d'effectuer tous types de service, alors que les intervenants de niveau 0 ne peuvent réaliser que des actes de plus bas niveau.

6.3.2 Contraintes additionnelles

Contraintes additionnelles des conventions collectives

Que ce soit dans le problème de réoptimisation stratégique ou opérationnelle, nous prenons en compte des contraintes légales issues des conventions collectives. Nous en avons déjà évoqué plusieurs dans les chapitres correspondants (4, 5), mais certaines avaient été simplifiées, d'autres non prises en compte. Dans le paragraphe ci-dessous, nous les listons de manière exhaustive et en profitons pour rappeler les notions d'amplitude, de temps effectif de travail, de temps d'attente, mais également pour introduire la

notion de coupure.

Définition 6 L'**amplitude** d'une tournée correspond au temps écoulé entre le début du premier service de la journée et la fin du dernier service de la journée. Le premier et dernier trajet de la tournée ne sont donc pas comptabilisés dans le calcul de l'amplitude.

Définition 7 Le **temps d'attente, ou temps d'inactivité** correspond au temps non-travaillé entre deux services, temps de trajet exclu.

Définition 8 Le **temps effectif de travail** correspond au temps durant lequel l'employé est au service de l'employeur, c'est-à-dire à la durée totale des services effectués, des temps de trajet, et des temps d'attente inférieurs à 15 minutes

Définition 9 Une **coupure** correspond à un temps d'inactivité supérieur à 30 minutes entre deux services.

1. L'amplitude horaire d'une journée ne doit pas dépasser 13h.
2. Le temps de travail effectif d'une journée ne doit pas dépasser 10h.
3. Le temps de travail effectif d'une semaine ne doit pas dépasser 48h.
4. Un intervenant ne peut travailler plus de 6 heures consécutives. Il doit bénéficier d'une pause de 20 minutes au minimum toutes les 6h.
5. Une tournée ne peut pas contenir plus de quatre coupures.
6. Une tournée ne peut pas contenir plus de deux coupures de plus de 2 heures.

Contraintes d'usage à Adomni-Quemera

Les contraintes d'usage à Adomni-Quemera ont été établies à la demande des planificatrices, dans le but de réaliser des tournées satisfaisantes pour les intervenants, ou de transposer des habitudes de fonctionnement dans la planification. Certaines sont systématiquement utilisées dans les plannings, d'autres sont appliquées dès que possible, et d'autres encore sont des contraintes que les planificatrices souhaiteraient intégrer dans les processus de planification grâce à notre méthode d'optimisation. Pour des raisons de confidentialité, nous ne pouvons entrer dans le détail des contraintes. Nous restons donc intentionnellement vagues quant aux valeurs numériques utilisées dans les contraintes. Pour éviter d'introduire de nouvelles notations, nous les désignons par "X" lorsque nous ne les utilisons pas dans la suite du chapitre, les valeurs de X étant bien sûr différentes dans chaque contrainte. Nous expliquons quelle est la nécessité de ces règles internes, et quels sont les risques éventuels de leur prise en compte. Mis à part les contraintes 7, 8 et 9, toutes les autres n'interviennent que dans la réoptimisation stratégique. En effet, les contraintes 10 à 13 concernent des planifications sur horizon long, et les contraintes 14 à 16 ne sont pas forcément pertinentes dans un contexte de réparation urgente de planning perturbé.

7. Les trajets dépassant une valeur T_{max} définie par les planificatrices ne sont pas autorisés entre deux services consécutifs.
8. La tournée doit comporter une pause déjeuner dans un créneau en milieu de journée, sauf si la tournée commence tard le matin, ou finit tôt l'après-midi
9. S'il y a une coupure de plus de C_{max} minutes entre deux services consécutifs, alors elle n'est pas comptée comme du temps de travail et les trajets dans cet intervalle ne sont pas non plus comptabilisés dans le temps de travail.
10. Les heures supplémentaires sont autorisées dans une limite de H_{max} % du volume horaire contractuel de l'intervenant.
Cette règle vise à équilibrer la charge d'heures supplémentaires.
11. Lorsque le planning est réalisé sur un horizon plus court qu'un mois, le volume horaire contractuel mensuel est ramené à un volume sur la durée de l'horizon en utilisant un coefficient de proportionnalité adapté.
Cela permet de répartir la charge de travail d'un employé sur le mois, et d'éviter de déséquilibrer complètement une semaine de travail par rapport à la suivante.
12. Le temps de travail effectif d'un intervenant sur l'horizon complet doit être supérieur ou égal à son volume horaire contractuel (volume défini sur l'horizon).
Étant donné que la charge de services demandée est très importante, et que le personnel est souvent surchargé, Adomni-Quemera doit recourir très régulièrement à l'utilisation d'heures supplémentaires. Cette contrainte permet d'éviter que des intervenants fassent des heures supplémentaires alors que certains de leurs collègues ne remplissent pas complètement leur volume horaire contractuel. Dans le cas où la charge de travail ne serait pas très élevée, on risque une augmentation artificielle et contre-productive du temps de travail effectif des tournées (sélection de trajets plus longs, plus de temps d'attente inférieurs à 15 minutes...).
13. Pour une planification sur plusieurs semaines, tout intervenant doit bénéficier d'un certain ratio de week-ends de repos.
Cette contrainte vise à améliorer les conditions de travail de l'intervenant.
14. Pour chaque créneau de X heures de temps de travail effectif, le temps d'attente est limité par un seuil défini par les planificatrices.
15. Il doit y avoir au moins X heures de travail effectif entre deux coupures, entre le début de la journée et la première coupure éventuelle, entre la dernière coupure éventuelle et la fin de la journée.
Les contraintes 14 et 15 ont pour but d'éviter la création de tournées "hâchées", avec une grande amplitude mais avec peu de services ou beaucoup de temps d'attente. Le but est de créer des tournées compactes. Dans le cas où la charge globale de travail ne serait pas très élevée, le risque est de créer des tournées extrêmement denses pour certains intervenants, et au contraire des tournées très courtes pour d'autres, créant ainsi un déséquilibre de la charge de travail.
16. Un chevauchement/retard de quelques minutes dû au temps de trajet est acceptable entre deux services consécutifs.

Comme les horaires des services sont fixés sur des horaires multiples de 15 minutes et qu'en milieu urbain, il n'est pas rare que des bénéficiaires habitent dans la même rue, ou à seulement quelques minutes les uns des autres, cela permet de les faire exécuter par un seul intervenant. On évite ainsi de faire attendre les intervenants sans impacter pour autant la qualité du service fourni. On évite également de faire se déplacer un deuxième intervenant dans une zone où un collègue est déjà présent, et d'augmenter inutilement les temps de trajets de chacun.

Exemple : si le patient A requiert un service qui finit à 9h, le patient B requiert un service qui débute à 9h, et le temps de trajet entre A et B est de 2 minutes, alors il est possible d'affecter les deux services à un même intervenant.

6.3.3 Objectifs pour la réoptimisation stratégique

Plusieurs objectifs ont été envisagés avec les planificatrices de Adomni-Quemera :

- Minimisation globale des kilomètres parcourus (au lieu de la minimisation des temps de trajets précédemment étudiée)
- Minimisation globale des heures supplémentaires
- Minimisation globale des temps d'attente (tous les temps d'inactivité hors coupures plus longues que C_{max} , correspondant aux coupures définies dans la contrainte 9)

Les deux premiers critères étant des critères de coûts, on peut envisager une agrégation de ces objectifs en minimisant la somme des coûts totaux engagés.

Pour la réoptimisation opérationnelle, nous gardons l'objectif primaire étudié dans le chapitre 5, à savoir la maximisation des services couverts. Dans un second lieu, nous minimisons le temps de trajet.

6.4 Adaptation des méthodes SRO et ORO

6.4.1 Prise en compte des nouvelles contraintes

Dans cette section, nous présentons la manière dont ces nouvelles contraintes ont pu être intégrées à la méthode SRO présentée dans le chapitre 4 et la méthode ORO présentée dans le chapitre 5. Nous utilisons les mêmes notations que dans les chapitres précédents et renvoyons le lecteur au tableau des notations introduits en pages 59, 93 et 132.

Les contraintes 1, 2, 8 sont déjà traitées dans les problèmes précédemment étudiés. Les valeurs définies précédemment comme A_{max} , E_{max} et \mathcal{L} correspondent toujours aux valeurs légales.

Modifications dans la génération du graphe (contraintes 7 et 16)

Lors de la génération des graphes, nous ajoutons des arcs supplémentaires entre les sommets dont les horaires de service ne se chevauchent pas, mais dont le temps de trajet

peut créer un chevauchement dans la limite autorisée par les planificatrices (16). Au contraire, nous supprimons les arcs entre deux services dont le temps de trajet excède T_{max} (7).

Modification dans la génération des tournées (contraintes 5 et 6)

Nous introduisons deux compteurs pour dénombrer le nombre de coupures dans le chemin en cours de génération (5), et le nombre de coupures de plus de 2 heures (6). À chaque fois que nous ajoutons un arc à notre chemin, nous incrémentons les compteurs si nécessaire. Une fois que les seuils définis sont dépassés, nous interrompons l'appel récursif en cours et remontons dans l'arbre de récursion, puisque le chemin n'est pas admissible.

Filtrage des tournées (contraintes 4, 14 et 15)

Une fois que toutes les tournées ont été générées, nous vérifions que les contraintes 4, 14 et 15 sont effectivement respectées. Dans le cas contraire, les tournées violant au moins l'une de ces contraintes ne sont pas admissibles, et nous ne les considérons pas dans la phase de sélection des tournées.

Modification du MILP pour sélectionner les tournées (contraintes 3, 9, 10, 11, 12, 13)

Pour les dernières contraintes, nous ajoutons/modifions/supprimons les modèles de partitionnement SP1 et SP2 introduits respectivement en page 85 pour le problème stratégique et en page 117 pour le problème opérationnel.

Le calcul du poids e_{kdj} qui représente le temps effectif de la tournée j de l'intervenant k le jour d (cf section 4.5.3) est modifié pour correspondre à la contrainte 9.

Rappelons que x_{kdj} est une variable de décision qui vaut 1 si l'intervenant k réalise la tournée j durant le jour d .

Dans ce chapitre, h_k désigne le volume horaire contractuel de l'intervenant k sur l'horizon entier. Selon que l'on travaille sur une planification hebdomadaire, quinzomadaire ou mensuelle pour la réoptimisation stratégique, on adapte le calcul de h_k suivant la règle énoncée en contrainte 12. Par souci de simplicité et de cohérence avec les chapitres précédents, nous écrivons la plupart des contraintes suivantes pour un horizon hebdomadaire.

La contrainte des jours de repos (13) initialement définie dans 4.5.3 (contrainte 4.30) est facilement ajustée pour s'adapter à l'horizon étudié.

En cas de planification hebdomadaire, elle reste inchangée :

$$\sum_{d \in \mathcal{D}} x_{kd0} \geq 1 \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (6.1)$$

Rappelons que la tournée indexée par 0 est la tournée vide.

Prenons désormais l'exemple d'une planification quinzomadaire, où le ratio imposé est d'un week-end libre sur deux. Alors la contrainte devient :

$$we_k^1 + we_k^2 \geq 1 \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (6.2)$$

$$2 \times we_k^1 \leq x_{kd_s^1 0} + x_{kd_d^1 0} \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (6.3)$$

$$2 \times we_k^2 \leq x_{kd_s^2 0} + x_{kd_d^2 0} \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (6.4)$$

$$we_k^1, we_k^2 \in \{0, 1\} \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (6.5)$$

où we_k^1 et we_k^2 sont des variables booléennes valant 1 si le premier (respectivement le deuxième) week-end est accordé comme repos pour l'intervenant k ; et d_s^i (respectivement d_d^i) est l'indice correspondant au samedi (resp. dimanche) de la semaine i .

Pour les contraintes 3 et 10, on ajoute la contrainte suivante (exemple pour un horizon hebdomadaire) :

$$\sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{j=0}^{|\mathcal{T}_{kd}|} e_{kdj} \times x_{kdj} < \max((1 + H_{max}) \times h_k, 48h) \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (6.6)$$

On s'assure ainsi que la somme des temps effectifs des tournées de la semaine ne dépasse ni la limite légale d'une semaine, ni le volume horaire hebdomadaire augmenté des H_{max} % d'heures supplémentaires autorisées.

Pour la contrainte 12, on supprime la contrainte 4.31 et on la remplace par (exemple pour un horizon hebdomadaire) :

$$\sum_{d \in \mathcal{D}} \sum_{j=0}^{|\mathcal{T}_{kd}|} e_{kdj} \times x_{kdj} \geq h_k \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (6.7)$$

Dans le modèle initial, le volume horaire contractuel était une limite au temps de travail effectif. Ici, cette contrainte garantit au contraire que le temps effectif de travail atteint le volume horaire contractuel de l'intervenant.

6.4.2 Prise en compte des nouveaux objectifs

Pour la réoptimisation stratégique, nous changeons simplement les fonctions objectif du MILP 4.5.3.

- Minimisation des kilomètres parcourus, avec km_{kdj} le nombre de kilomètres parcourus dans la tournée j de l'intervenant k le jour d

$$\min \sum_{d \in D} \sum_{k \in K} \sum_{j=0}^{N_{kd}} km_{kdj} \times x_{kdj} \quad (6.8)$$

- Minimisation des temps d'attente, avec w_{kdj} le temps d'attente de la tournée j de l'intervenant k le jour d

$$\min \sum_{d \in D} \sum_{k \in K} \sum_{j=0}^{N_{kd}} w_{kdj} \times x_{kdj} \quad (6.9)$$

Ici le calcul des temps d'attente est différent de celui du chapitre 4 puisqu'on prend en compte tous les temps d'inactivité.

- Minimisation des heures supplémentaires, avec e_{kdj} le temps effectif de travail de la tournée j de l'intervenant k le jour d et h_k le volume horaire contractuel de l'intervenant k (exemple pour un horizon hebdomadaire)

$$\min \sum_{k \in K} \left(\sum_{d \in D} \sum_{j=0}^{N_{kd}} e_{kdj} \times x_{kdj} \right) - h_k \quad (6.10)$$

6.4.3 Adaptation pour passer à l'échelle

Pour la réoptimisation stratégique nous avons développé une méthode exacte. Cependant, l'entreprise n'a pas forcément besoin d'obtenir la solution optimale mais a seulement besoin d'une solution de bonne qualité. L'un des moyens de réduire la complexité algorithmique est de réduire le nombre de tournées générées. Ainsi, lorsque l'instance est trop grande pour être résolue de manière exacte, nous pouvons ajouter des valeurs limites pour l'amplitude et le temps effectif minimum des tournées journalières. Si ces bornes étaient calculées de manière exacte dans le chapitre 4 pour garantir l'optimalité de la solution, nous pouvons ici proposer des valeurs limites plus élevées pour les amplitudes minimales et temps de travail minimaux des tournées. En effet, nous savons de manière empirique que la plupart des tournées des intervenants d'Adomni-Quemera sont globalement plus chargées puisque la structure manque de personnel et est souvent dans l'obligation de recourir aux heures supplémentaires. De ce fait, il semble pertinent de proposer des seuils plus élevés pour diminuer le nombre de chemins à générer, quitte à perdre la garantie d'optimalité de la solution. Ces bornes ont été déterminées de manière empirique suite à des tests préliminaires, lorsque la méthode exacte n'était pas en

mesure de résoudre les instances.

Pour la réoptimisation opérationnelle, nous travaillons sur le territoire complet et non pas sur des secteurs de taille réduite comme pour la partie stratégique. Ainsi, pour passer à l'échelle, nous devons limiter la taille des graphes construits en première phase de notre algorithme. À cette fin, si un service n'est pas prioritaire et si il peut être effectué par plus de n intervenants, nous insérons le sommet uniquement dans n graphes aléatoirement choisis parmi les graphes possibles. Étant donné que le service n'est pas obligatoire, ce tirage aléatoire n'impacte pas la faisabilité des instances, mais il peut éventuellement diminuer la couverture de services. La valeur de n a été définie empiriquement lors des expérimentations présentées en section 6.6.2 et fixée à 7.

6.5 Interface et traitement des données

Afin que les planificatrices puissent elles-mêmes utiliser nos méthodes d'optimisation de tournées, nous avons mis en place un prototype permettant, à partir de plannings existants, de replanifier les tournées de services à domicile respectant les normes imposées par les CCN [151] et les contraintes émanant du terrain exposées précédemment. Dans cette section, nous présentons le prototype développé et les processus d'utilisation requis pour sa mise en service.

6.5.1 Construction de la base de données

Extraction automatique des données relatives aux intervenants et bénéficiaires

Les données de Adomni-Quemera sont stockées dans le logiciel de gestion et de paye de la société. En juin 2019, nous avons réalisé une extraction automatique de la liste des intervenants et des bénéficiaires de la structure, qui a permis d'établir une base de données initiale. Les données brutes ainsi recueillies ont ensuite été traitées et nettoyées. Notons que certaines informations n'étant pas renseignées dans le logiciel (car il ne le permet pas), il revient à l'utilisateur du prototype de fournir des renseignements supplémentaires pour avoir une base de données complète.

Dans le tableau 6.1, nous notons les informations nécessaires à la résolution du problème. Nous indiquons celles directement obtenues et automatiquement traitées suite à l'extraction de données, et celles qui nécessitent une intervention de la part des planificatrices. Lorsque ces dernières données ne sont pas renseignées, nous leur attribuons les valeurs par défaut précisées dans ce même tableau. Les valeurs possibles ont été introduites en section 6.3.1.

À partir des adresses postales des bénéficiaires, nous utilisons l'API Google pour calculer les distances et temps de trajets en voiture entre toutes les paires de bénéficiaires.

Données		Automatique	Manuel	Valeur par défaut
Bénéficiaires	Nom et prénom	✓	-	-
	Adresse	✓	-	-
	Secteur	✓	-	-
	Qualification requise	-	✓	0
	Nombre maximal d'intervenants	-	✓	X
	Intervenants connus	-	✓	∅
	Intervenants incompatibles	-	✓	∅
Intervenant	Nom et prénom	✓	-	-
	Volume horaire mensuel	✓	-	-
	Secteur	✓	-	-
	Compétences	-	✓	3
	Disponibilités	-	✓	6h-21h , 7j/7

TABLE 6.1 – Données relatives aux intervenants et bénéficiaires

Extraction et traitement d'un planning initial

Nous extrayons plusieurs informations du logiciel de gestion des plannings prévisionnels de la structure. Nous disposons d'une liste de services requis caractérisés par : la date du service, les horaires de début et fin, le type de service, le bénéficiaire requérant et l'intervenant affecté. Le type de service requis permet d'identifier la qualification nécessaire pour effectuer l'intervention.

Paramètres divers

La construction des plannings dépend de nombreux paramètres, que ce soient des paramètres légaux ou des paramètres d'usage à Adomni-Quemera. Le tableau 6.2 liste les différents paramètres et les valeurs par défaut que nous leur attribuons (notées X ou désignées par une variable nécessaire à la modélisation si elles sont confidentielles).

6.5.2 Utilisation de l'interface

La page d'accueil du prototype (cf. Figure 6.1) présente une première section *Fichiers de données*, dans laquelle l'utilisateur indique le chemin d'accès jusqu'au fichier contenant la liste des services, obtenu par extraction automatique depuis le logiciel de gestion. L'utilisateur peut spécifier le chemin absolu dans lequel il souhaite placer le fichier de sortie produit par notre algorithme. Par défaut, le fichier de résultats est placé dans le même répertoire que le fichier contenant le planning initial.

Enfin, comme nous travaillons sur un secteur à la fois, la planificatrice choisit sur quel secteur elle souhaite lancer l'optimisation.

Paramètre	Valeur
Amplitude maximale d'une journée de travail	13h
Durée maximale de travail quotidien	10h
Durée maximale de travail hebdomadaire	48h
Pourcentage maximal d'heures sup par rapport au nombre d'heures contractuelles	H_{max} %
Coût d'une heure supplémentaire	X €
Coût d'un km	X €

TABLE 6.2 – Paramètres du problème

La seconde section permet de changer certains paramètres. Un premier bouton *Convention collective* fait apparaître un formulaire (cf Figure 6.2) permettant de modifier les valeurs de certains des paramètres utilisés dans l'algorithme. La liste des paramètres modifiables a été établie en accord avec les planificatrices, qui souhaitent pouvoir modifier certaines valeurs seulement, pour éviter de gérer une trop grande liste de paramètres et simplifier au maximum l'utilisation du prototype. Il est possible de modifier les valeurs déterminées par les conventions collectives, pour les rendre plus restrictives (amplitude ou temps effectif plus courts que les valeurs légales), et proposer des conditions de travail plus favorables aux intervenants.

Le deuxième bouton *Secteurs* permet aux utilisateurs de supprimer, ajouter ou modifier le nom d'un secteur. L'ajout et la suppression ne doivent avoir lieu qu'en cas de re-sectorisation du territoire. Alors, l'utilisateur doit effectuer les modifications sur les intervenants et bénéficiaires concernés : si un secteur est ajouté, il convient de lui affecter des bénéficiaires et intervenants, sinon il sera vide et la planification sera vide en cas d'appel de l'algorithme sur ce secteur. À l'inverse, si un secteur est supprimé, il faut absolument réaffecter les intervenants et bénéficiaires concernés sinon ils ne seront pas intégrés à la planification.

La dernière section permet de gérer les données relatives aux intervenants et bénéficiaires. Pour chacun, l'utilisateur dispose de trois actions : *ajouter*, *modifier*, *supprimer*. Lorsqu'on souhaite ajouter un intervenant ou un bénéficiaire, un formulaire apparaît (cf Figures 6.3 et 6.4) avec tous les champs entièrement vierges. Charge est à l'utilisateur de les remplir. Si un des champs signalé comme "automatique" dans le tableau 6.1 n'est pas renseigné, la saisie n'est pas validée. Pour les autres champs non renseignés, les valeurs par défaut sont appliquées. Lorsque l'ajout est validé, l'intervenant ou le bénéficiaire en question est ajouté à la base de données, et dans le cas de l'ajout d'un bénéficiaire, les matrices de distances et trajets sont automatiquement mises à jour.

Pour les modifications, les mêmes formulaires apparaissent mais les champs sont pré-

The image shows a software interface titled "Outil de planification". It is organized into three main sections:

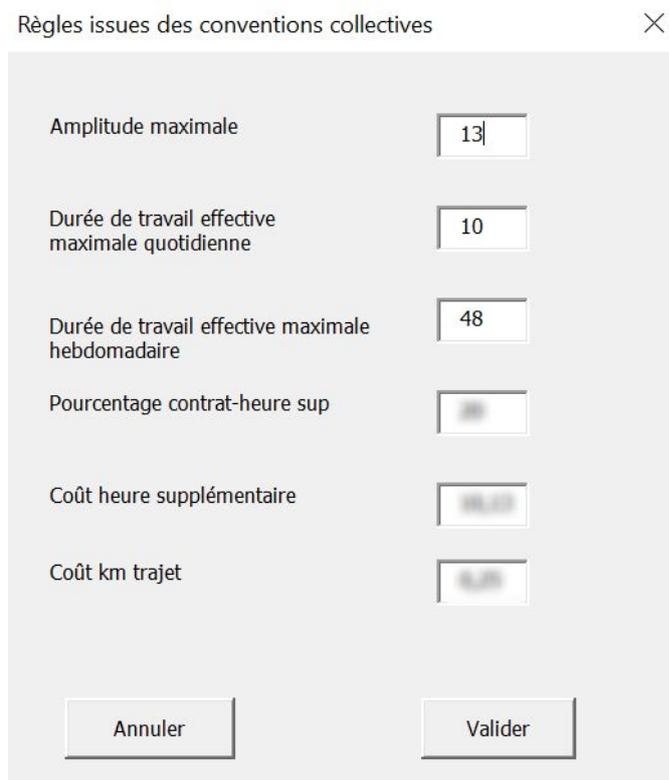
- Fichiers de données:** Contains three input fields: "Planning initial", "Planning optimisé", and "Secteur à optimiser". The "Planning initial" field has a "Parcourir" button to its right. The "Secteur à optimiser" field has a "Choisir" button to its right.
- Paramètres:** Contains two yellow buttons: "Convention collective" and "Secteurs".
- Base de données:** Divided into two columns: "Intervenants" and "Bénéficiaires". Each column has three buttons: "Ajouter", "Modifier", and "Supprimer". The "Intervenants" buttons are blue, and the "Bénéficiaires" buttons are light green.

At the bottom center of the interface is a red circular button.

FIGURE 6.1 – Page d'accueil du prototype

remplis avec les données actuelles. Il est alors possible de changer les informations relatives à l'intervenant ou au bénéficiaire mais également d'ajouter ou de supprimer des services requis par un bénéficiaire existant. Dans ce cas, nous sauvegardons les services avec la mention "à ajouter" ou "à supprimer".

Pour les suppressions, l'utilisateur sélectionne la personne à supprimer dans la liste des intervenants ou des bénéficiaires. Une fois l'opération validée, la personne est définitivement supprimée de la base de données. Si c'est un bénéficiaire, la matrice de distance est également mise à jour. Si c'est un intervenant, les champs "liste des intervenants connus" et "liste des intervenants incompatibles" de tous les bénéficiaires concernés sont également mis à jour.



Règles issues des conventions collectives

Amplitude maximale	<input type="text" value="13"/>
Durée de travail effective maximale quotidienne	<input type="text" value="10"/>
Durée de travail effective maximale hebdomadaire	<input type="text" value="48"/>
Pourcentage contrat-heure sup	<input type="text" value="0"/>
Coût heure supplémentaire	<input type="text" value="0,00"/>
Coût km trajet	<input type="text" value="0,00"/>

FIGURE 6.2 – Formulaire de modification des paramètres

6.5.3 Processus de replanification

Un bouton permet ensuite de lancer le processus de replanification. Le planning initial est lu et la liste des services qu'il contient est confrontée à la base de données existantes pour déterminer quels services sont à planifier.

- Si un service est requis par un bénéficiaire n'existant pas dans la base de données, cela signifie que le bénéficiaire a été supprimé depuis l'établissement du planning initial, le service n'est donc pas pris en compte.
- Si un service est initialement affecté à un intervenant n'existant pas dans la base de données, cela signifie que l'intervenant a été supprimé. Nous le prenons donc quand même en compte, en enlevant l'information relative à l'intervenant initialement affecté.
- Si un service requis par un bénéficiaire existant est marqué comme "à supprimer", cela signifie qu'il était prévu dans le planning initial mais ne doit pas être replanifié.
- Si un service est marqué comme "à ajouter", nous l'ajoutons à la liste des services à planifier.
- Dans tous les autres cas, le service est pris en compte dans la planification.

Une fois l'instance construite, l'algorithme de planification est appelé, et le résultat est fourni dans un fichier Excel. Dans un onglet "Résultats", nous fournissons la liste des services planifiés, avec la date, les horaires de début et de fin, le bénéficiaire requérant, et l'intervenant affecté. Dans un onglet "Statistiques" nous fournissons les calculs des temps de trajet, temps d'attente et de travail effectif de chaque intervenant du planning. Dans l'onglet "Anomalies", nous notons les anomalies concernant notamment la saisie des données que nous avons détectées. Il peut par exemple s'agir d'une adresse mal saisie pour laquelle les calculs de distance n'ont pas abouti, de disponibilités incohérentes avec un horaire de début supérieur à l'horaire de fin, etc. Nous les traitons en adoptant un comportement par défaut (mise à 0 des distances, disponibilités considérées comme totales) qui peut aboutir à un planning non-applicable en pratique. Lister ces anomalies permet de les notifier à l'intervenant, qui peut ensuite les corriger via l'interface.

6.5.4 Maintenance

Pour assurer un fonctionnement durable, la base de données doit impérativement être mise à jour, les données doivent être saisies soigneusement, et les anomalies détectées doivent être corrigées. Il est notamment nécessaire de mettre à jour la liste des intervenants/bénéficiaires à chaque fois qu'un changement se produit, pour éviter l'utilisation de données obsolètes lors de la planification. La saisie doit alors être minutieuse : il faut s'assurer que les noms soient toujours orthographiés de la même manière, puisque nous construisons les instances à partir de plusieurs fichiers, dont les données doivent être concordantes. Les adresses postales doivent aussi être correctement renseignées puisque les temps de trajet sont automatiquement calculés d'après les données de Google Maps.

6.6 Expérimentations

Les expérimentations que nous présentons dans cette section ont été menées sur les données et plannings utilisés par Adomni-Quemera durant une semaine de décembre 2019. Pour la partie stratégique, nous travaillons sur des districts distincts : nous avons dégagé 3 instances hebdomadaires.

Pour le problème opérationnel, nous ne considérons plus les districts mais bien l'ensemble du territoire couvert par Adomni-Quemera. Ainsi, les 7 jours de la semaine constituent nos 7 instances.

6.6.1 Expérimentations pour le problème stratégique

Des tests préliminaires nous ont permis de remarquer que les instances étaient systématiquement infaisables. Comme nous travaillons sur des instances hebdomadaires, nous ne pouvons pas prendre en compte les règles des CCN concernant les horizons de plusieurs semaines. Ces règles permettent notamment d'augmenter l'amplitude et le temps effectif de travail d'une semaine, sous réserve que ces dépassements soient compensés les semaines suivantes. Pour notre modélisation, nous avons choisi de ne pas autoriser ces

dépassements, nos contraintes sont donc plus strictes que les **CCN**. Ainsi, les plannings actuellement utilisés dans Adomni-Quemera, bien que respectant les **CCN**, peuvent présenter des incohérences dans notre modélisation.

En ce qui concerne les contraintes d’usage, ce sont des contraintes internes qui ont été introduites pour améliorer les conditions de travail des intervenants. Elles sont beaucoup plus restrictives que les contraintes des **CCN**, et ne peuvent donc pas systématiquement être prises en compte dans les plannings. Dans nos test préliminaires, nous avons cherché à résoudre les instances en prenant en compte toutes les contraintes, ce qui est en fait impossible. Ainsi, nous proposons d’observer l’impact de la prise en compte de différentes contraintes sur la faisabilité des instances, et le cas échéant sur les résultats obtenus.

Configurations d’exécution

Pour ces expérimentations, nous avons donc repris les 3 instances réelles utilisées dans le chapitre 4, et lancé notre algorithme en utilisant différentes configurations qui prennent en compte diverses contraintes. La composition de ces configurations est détaillée dans le tableau 6.3. Notons que nous ne prenons jamais en compte la contrainte 13 (ratio de week-ends libres sur plusieurs semaines) car les tests sont effectués sur un planning hebdomadaire. Les contraintes 10 et 12 (contraintes liées aux heures supplémentaires) sont également écartées de nos configurations car les instances dont nous disposons ne nécessitent pas le recours aux heures supplémentaires.

La configuration 1 regroupe les contraintes considérées par les planificatrices comme les contraintes “de base” lors de la construction des tournées légales, notamment les limitations d’amplitude et de temps effectif et la contrainte sur les chevauchements de services. Dans la configuration 2, nous ajoutons les contraintes liées aux pauses. La configuration 3 prend aussi en compte des contraintes concernant le nombre de coupures d’une tournée. La contrainte sur les temps de trajet est ajoutée pour la configuration 4. Nous ajoutons séparément à cette dernière configuration les contraintes limitant les temps d’attente pour les configurations 5 et 6. Le détail des compositions des configurations est repris dans le tableau 6.3.

Comme déjà évoqué, les instances étudiées ne nécessitent pas le recours aux heures supplémentaires donc nous ne considérons pas l’objectif de minimisation des heures supplémentaires. Nous étudions séparément la minimisation des kilomètres (KM) et la minimisation des temps d’attente (W, en minutes). Pour chaque configuration, nous indiquons, lorsque nous trouvons une solution, les valeurs des fonctions objectifs pour chacune des optimisations mono-objectif (W et KM), le temps moyen d’exécution (CPU_{avg} , en secondes), et le nombre de tournées admissibles n_t que nous avons générées.

Lorsque les tailles d’instance le permettent, nous pouvons utiliser l’algorithme exact (détaillé dans le chapitre 4, avec les modifications de la section 6.4). Les solutions ainsi trouvées sont donc optimales (statut *Optimal*). Dans le cas où nous ne trouvons pas de solution, cela signifie que l’instance est infaisable (statut *Infaisable*).

Pour l'instance 3, dans la configuration 1, l'exécution de l'algorithme exact n'aboutit pas car l'instance est trop grande pour être résolue de manière exacte. Nous avons donc utilisé des bornes sur le temps minimal de service par tournée et temps maximal d'attente par tournée, comme expliqué dans la section 6.4.3. Cela nous permet de trouver une solution malgré la grande taille de l'instance (401 services).

Analyse des résultats

Nous observons que les contraintes 14 et 15 d'usage à Adomni-Quemera pour créer des tournées compactes sont trop restrictives et absolument pas applicables en pratique. La prise en compte de toutes les règles légales (configuration 3) permet de diminuer le nombre de tournées générées, et donc d'accélérer la résolution. Notons que par rapport au chapitre 4, les chevauchements autorisés (contrainte 16) augmentent le nombre d'arcs dans les graphes, et donc la complexité du problème puisque le nombre de tournées admissibles n_t augmente aussi. C'est pour cette raison que nous n'avons pas pu résoudre l'instance 3 de manière exacte pour la configuration 1. Pour toutes les autres configurations de l'instance 3, nous avons pu utiliser l'algorithme de manière exacte, ce qui garantit le fait qu'il n'existe pas de solution réalisable.

Pour la première instance, tant qu'elle reste réalisable, les objectifs ne subissent pas de dégradation significative avec l'ajout de nouvelles contraintes. Cela s'explique par la petite taille des instances, et donc du nombre de solutions réalisables possibles.

Configuration	Contraintes					
	[1, 2, 3, 9, 11, 16]	[4, 8]	[5, 6]	[7]	[14]	[15]
1	✓	-	-	-	-	-
2	✓	✓	-	-	-	-
3	✓	✓	✓	-	-	-
4	✓	✓	✓	✓	-	-
5	✓	✓	✓	✓	✓	-
6	✓	✓	✓	✓	-	✓

TABLE 6.3 – Configurations de tests

Discussions

L'utilisation de notre algorithme requiert de nombreuses données concernant les caractéristiques des intervenants, des patients, et des services requis. Comme nous le détaillerons plus tard dans le chapitre (section 6.7), la collecte de telles données a posé de nombreux problèmes, a requis plusieurs discussions avec les planificatrices, et de nombreuses heures de nettoyage de données. Cela explique le faible nombre d'instances réelles dont nous disposons pour mener les expérimentations.

Instance	Config	Statut	CPU_{avg} (s)	n_t	W (min)	KM (km)
1	1	Optimal	1963	29925	3233	145,9
	2	Optimal	1532	23937	3363	149,9
	3	Optimal	1049	23448	3363	149,9
	4	Optimal	1036	23448	3363	149,9
	5	Infaisable	130	1193	-	-
	6	Infaisable	115	1509	-	-
2	1	Optimal	93238	896389	3612	306,2
	2	Optimal	66403	726463	3973	308,3
	3	Optimal	65280	677080	3973	308,3
	4	Optimal	59339	629408	4056	308,3
	5	Infaisable	5308	36502	-	-
	6	Infaisable	1993	6748	-	-
3	1	-	88973	835952	8103	294,7
	2	Infaisable	18592	725274	-	-
	3	Infaisable	17115	661586	-	-
	4	Infaisable	16627	661309	-	-
	5	Infaisable	2512	50332	-	-
	6	Infaisable	1650	9467	-	-

TABLE 6.4 – Influence de la prise en compte des contraintes sur la faisabilité des instances

Cet étude met en évidence les limites de la prise en compte de trop nombreuses caractéristiques et spécificités liées aux intervenants, qui sont informellement connues des planificatrices mais qui ne sont saisies et enregistrées dans aucun système de stockage de données.

6.6.2 Expérimentations pour le problème opérationnel

Compte tenu des difficultés rencontrées pour récupérer des données valides lors des expérimentations de la méthode de réoptimisation stratégique, la partie opérationnelle a été développée pour ne prendre en compte que les données présentes dans le planning initial, automatiquement extrait du logiciel de gestion utilisé par Adomni-Quemera. Ainsi, nous supposons que tous les intervenants présents le jour de la planification sont disponibles et qualifiés pour tous les services requis. Les niveaux de priorité et la réaffectabilité des services sont déterminés en fonction du type d'acte requis, et ne dépendent donc ni du bénéficiaire ni de l'intervenant initialement affecté. Nous ne les détaillons pas ici pour des raisons de confidentialité.

Vérification du planning initial

Nous avons tout d'abord tenu à nous assurer que les plannings initiaux dont nous disposons (sans perturbation), respectent bien les contraintes légales et les contraintes d'usage désignées comme prioritaires par les planificatrices (contraintes 8 et 16).

À cet effet, nous avons programmé un module de vérification qui permet de détecter les incohérences suivantes dans une tournée :

- non-respect de la limitation de l'amplitude (contrainte 1) : A_{err}
- non-respect de la limitation du temps effectif de travail (contraintes 2 et 3) : E_{err}
- chevauchements de services successifs (contrainte 16) : O_{err}
- non-octroi d'une pause déjeuner définie selon la contrainte 8 : PD_{err}

Nous retranscrivons dans le tableau 6.5 le nombre de tournées totales de l'instance nT , le nombre de tournées non-admissibles nT_{err} , puis le nombre de tournées par type d'incohérence, une tournée pouvant présenter plusieurs incohérences. Pour obtenir des instances réalisables, et pouvoir nous comparer avec le planning existant, nous supprimons les tournées présentant des incohérences. Ainsi, les intervenants et services associés aux tournées ne sont pas pris en compte dans nos expérimentations. Rappelons toutefois que les incohérences concernant les contraintes légales sont prévues dans les CCN mais ne peuvent pas être prises en compte dans notre modélisation sur horizon hebdomadaire, et que les contraintes d'usage sont des contraintes internes à l'entreprise instaurées pour favoriser les conditions de travail des intervenants, leur non-respect ne va donc pas à l'encontre des CCN.

Nous notons une proportion de tournées comprenant des incohérences particulièrement élevées pour les instances 6 et 7. Il s'agit des instances du week-end, pour lesquelles moins d'intervenants sont disponibles par rapport aux journées en semaine, et parmi eux beaucoup ont des disponibilités restreintes, ce qui rend plus difficile le respect systématique des contraintes d'usage.

Instance	nT	nT_{err}	PD_{err}	A_{err}	E_{err}	O_{err}
1	50	5	2	2	0	2
2	48	5	0	3	1	2
3	44	3	0	3	0	1
4	50	2	0	2	0	0
5	48	6	3	2	1	0
6	27	8	3	3	0	2
7	27	6	3	2	1	1

TABLE 6.5 – Recensement des incohérences dans les tournées du planning initial non perturbé

Démarche expérimentale

Ici, nous tentons d'observer l'impact de l'absence d'un ou plusieurs intervenants sur la réalisation d'un planning, et les possibilités qu'offre la flexibilité pour trouver de nouvelles solutions. Pour chacune des instances, nous retirons aléatoirement n_{out} intervenants, et nous observons les conséquences sur le planning lorsque les horaires des services

sont fixes. Pour cela, nous regardons le pourcentage de services couverts, le temps effectif moyen par intervenant, l'amplitude moyenne par intervenant, et le temps de trajet moyen par intervenant. Notons que pour les expérimentations, nous maximisons toujours la couverture dans un premier lieu, puis nous minimisons le temps de trajet global.

Nous commençons par retirer un seul intervenant ($n_{out} = 1$), puis nous augmentons la valeur de n_{out} jusqu'à ce que l'instance ne soit plus réalisable, ou que la couverture de service baisse significativement. Alors, nous augmentons les décalages de 15 minutes, pour voir si la flexibilité permet de rendre les plannings réalisables, ou d'améliorer la couverture des services. Si cela ne suffit pas, nous testons avec une flexibilité de 30 minutes sur les horaires des services. Pour chaque valeur de n_{out} , et chaque degré de flexibilité, nous lançons 10 exécutions.

Dans le tableau 6.6 nous reportons les résultats obtenus. Les lignes grisées représentent les valeurs calculées à partir des plannings existants, sans perturbation et tels qu'ils ont été exécutés. La colonne $\%sol$ montre le pourcentage d'instances pour lesquelles nous trouvons une solution. Les valeurs de colonnes suivantes sont calculées sur une moyenne des valeurs des instances résolues : la couverture de services cov (en %), le temps de trajet total (T_t), l'amplitude moyenne par intervenant (A_{moy}), le temps de travail effectif moyen par intervenant (E_{moy}).

Nous ne reportons pas les résultats obtenus pour toutes les valeurs de n_{out} pour une meilleure lisibilité du tableau. Nous consignons donc les résultats qui illustrent l'impact de l'absence des intervenants sur le planning, et l'apport de la flexibilité des horaires. En gras, nous signalons les valeurs améliorées par l'apport de la flexibilité (par rapport à la ligne précédente qui montre les résultats sur les mêmes instances avec une flexibilité moindre).

Analyse des résultats et des limites expérimentales

Globalement, nous arrivons à résoudre les instances malgré une proportion importante d'intervenants absents (plus de 25 % pour certaines instances) et en proposant une couverture des services extrêmement haute. Nous montrons que lorsque les absences des intervenants ne sont plus gérables car les plannings avec horaires fixes deviennent infaisables, ajouter de la flexibilité permet de résoudre quelques instances supplémentaires. Pour l'instance 6 par exemple, lorsque 4 intervenants sont absents, si nous résolvons 5 instances sur 10 avec les horaires fixes, ajouter 15 minutes de flexibilité aux horaires nous permet d'en résoudre 6, et ajouter 30 minutes fait grimper ce chiffre à 8 sur 10. Augmenter la flexibilité nous permet aussi d'augmenter la couverture des services. Pour l'instance 7, aucune instance n'est résolue lorsque 6 intervenants sont absents. Avec 15 minutes de flexibilité, nous résolvons une instance avec une couverture de 85%, contre 6 instances avec une couverture moyenne de 98% avec 30 minutes de flexibilité.

Comme nous pouvions nous y attendre, les amplitudes et temps de travail effectif moyens des intervenants augmentent avec le nombre d'intervenants absents. La charge

Instance	n_{out}	Flex (min)	%sol	%cov	T_t (min)	A_{moy} (min)	E_{moy} (min)
1	-	-	-	100,00	931,00	451,60	314,20
	3	0	100	99,91	905,60	533,51	334,18
	6	0	100	98,19	915,80	565,49	353,51
	9	0	100	99,91	970,90	614,84	392,33
	12	0	100	99,60	1068,50	640,70	426,89
	15	0	40	92,92	1151,00	628,62	433,63
	15	30	50	97,70	1240,80	662,03	465,38
2	-	-	-	100,00	1025,00	488,00	328,30
	3	0	100	99,87	943,30	562,69	349,08
	6	0	100	99,87	995,00	608,02	378,09
	9	0	90	99,66	1090,00	641,93	412,89
	12	0	40	95,31	1152,75	643,08	438,78
	12	30	50	96,42	1187,60	637,98	2201,23
	13	0	0	-	-	-	-
13	30	20	97,60	1202,50	673,63	460,60	
3	-	-	-	100,00	892,00	506,78	328,59
	3	0	100	99,86	893,70	597,82	352,85
	6	0	100	99,55	909,00	627,16	382,11
	9	0	100	98,51	965,90	656,36	413,90
	12	0	30	97,45	1114,33	689,44	453,31
	13	0	20	97,75	1122,00	700,89	467,98
	13	30	30	92,79	1206,33	635,75	448,07
	14	0	0	-	-	-	-
	14	30	10	82,43	974,00	600,74	409,37
4	-	-	-	100,00	1087,00	466,80	312,15
	3	0	100	99,27	1003,50	550,89	328,11
	6	0	100	99,15	1045,90	590,52	352,35
	9	0	90	97,58	1114,22	620,46	375,61
	9	15	100	99,80	1107,20	628,99	383,21
	12	0	90	96,64	1142,56	648,72	403,43
	16	0	-	-	-	-	-
	16	15	50	92,74	1280,00	631,58	434,57
	17	0	-	-	-	-	-
	17	15	20	96,98	1289,00	683,05	470,06
5	-	-	-	100,00	794,00	497,09	317,86
	3	0	100	99,53	779,70	573,13	340,05
	6	0	100	99,43	830,20	619,38	368,05
	6	15	100	99,48	794,60	606,98	367,81
	9	0	100	98,39	854,30	648,35	398,48
	15	0	10	95,26	1050,00	679,67	468,52
	15	15	30	94,94	1046,33	681,79	467,19
6	-	-	-	100,00	425,00	602,70	320,21
	1	0	100	98,58	437,00	660,06	334,04
	3	0	90	95,19	417,67	689,85	358,23
	3	15	100	99,58	464,80	713,11	380,06
	4	0	50	94,50	464,00	696,80	380,40
	4	15	60	97,22	452,67	710,22	396,51
	4	30	80	98,02	505,38	715,47	398,21
	5	0	0	-	-	-	-
	5	15	10	55,92	499,00	745,21	419,21
	6	15	0	-	-	-	-
6	30	20	55,69	642,00	746,15	458,62	
7	-	-	-	100,00	560,00	580,08	298,04
	1	0	100	99,86	559,70	636,14	310,45
	3	0	100	99,66	634,70	694,45	343,95
	6	0	0	-	-	-	-
	6	15	10	85,52	663,00	655,71	350,24
	6	30	50	98,07	801,80	730,39	400,73

TABLE 6.6 – Résultats numériques pour la réoptimisation opérationnelle

de travail globale restant la même mais étant répartie sur un nombre réduit de tournées, les amplitudes et temps effectifs moyens augmentent logiquement lorsque l'on garde une forte couverture de services. Les temps de trajet ont également tendance à augmenter pour deux raisons. D'une part, le premier objectif étant la couverture de services, lorsque beaucoup d'intervenants sont absents, il y a peu de solutions différentes permettant une couverture maximale, donc la marge pour optimiser les trajets est souvent assez faible. Ensuite, les trajets du domicile au premier et dernier patient d'une tournée ne sont pas comptabilisés. Plus le nombre d'intervenants absents augmente, plus le nombre de trajets non comptabilisés diminue. La flexibilité peut toutefois permettre de diminuer le temps de trajet global du planning (instance 5 avec 6 intervenants absents; instance 4 avec 9 intervenants absents).

Ces bons résultats numériques doivent toutefois être nuancés et confrontés aux réalités pratiques. En effet, ils semblent en contradiction avec certaines affirmations énoncées précédemment dans le chapitre sur la lourde charge de travail imposée aux intervenants, le recours aux heures supplémentaires, et la nécessité continue de recruter de nouveaux intervenants. Afin de pallier les problèmes de données rencontrés pour la réoptimisation stratégique, nous avons traité le problème avec les seules données dont nous disposons. Ainsi, nous considérons que les intervenants peuvent intervenir à tout moment de la journée alors qu'en pratique, la plupart d'entre eux travaille à temps partiel. Notons aussi que les compétences des intervenants n'interviennent pas dans le processus de réoptimisation. Leur prise en compte est primordiale dans la vie réelle, mais ces informations ne sont actuellement pas disponibles dans le logiciel de gestion utilisé par Adomni-Quemera. Ensuite, nous avons considéré que deux activités de même type avaient le même niveau de priorité et la même réaffectabilité. Évidemment, cela dépend en réalité généralement du bénéficiaire, qui peut être plus ou moins tolérant avec les annulations ou changements de dernière minute.

Finalement, le fait de ne pas considérer de secteurs géographiques a permis de s'affranchir des problèmes de définition de secteur rencontrés précédemment. Toutefois, les zones d'intervention géographiques sont définies contractuellement, et certains intervenants n'accepteraient pas de se déplacer sur la totalité du territoire que couvre Adomni-Quemera, car il est particulièrement étendu.

Ainsi, comme nous avons conçu le module d'optimisation opérationnelle de manière à ce qu'il n'ait besoin d'aucune intervention extérieure de la part des planificatrices pour fonctionner, pour pallier les problèmes détectés lors de la réoptimisation stratégique les plannings ainsi créés ne conviennent pas complètement pour une application dans la vie réelle.

Les contraintes de secteur, de disponibilité et de compétences nous permettent de réduire la taille des graphes, en réduisant le nombre de sommets. Ici, les graphes étant trop gros pour être complètement résolus, nous avons aléatoirement généré une partie des

sommets des graphes, qui correspondent aux services non-obligatoires. Cela n'intervient donc pas sur la faisabilité des instances, mais pourrait avoir un impact sur la qualité des solutions obtenues. Cependant, au vu de la couverture de services extrêmement haute, ce choix heuristique semble pertinent, puisqu'il nous permet de traiter des instances de très grande taille (jusqu'à 48 intervenants) par rapport aux travaux de la littérature.

6.7 Discussion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le cas d'application qui a inspiré la plupart des travaux de cette thèse. Nous avons adapté nos méthodes à toutes les contraintes légales et d'usage à Adomni-Quemera. Ces contraintes reflètent la réalité du terrain et ne sont pas prises en compte dans les travaux de la littérature à notre connaissance. Nous concluons ici avec une discussion relatant la démarche de projet mise en place, les difficultés rencontrées, et les phases de réflexions menées avec les planificatrices pour contourner ces obstacles et réduire le fossé entre recherche et application sur le terrain.

Cette collaboration a été menée en parallèle de tous mes travaux de thèse, à partir de juin 2018. Les premières discussions ont permis de recueillir les besoins d'Adomni-Quemera. Ensuite, la formulation du problème a constitué un sujet majeur de réflexion avec les planificatrices. Il a fallu prendre le temps de transmettre une idée de ce qu'est la recherche opérationnelle et du fonctionnement des algorithmes d'optimisation, pour que les planificatrices comprennent l'importance de formaliser et de quantifier les contraintes. À partir de ces premiers échanges, nous avons établi un cahier des charges pour l'élaboration d'un outil d'aide à la planification.

Par la suite, nous avons recueilli les données d'Adomni-Quemera, et avons effectué un important travail de traitement, de nettoyage et de tri des données. Après quelques visites sur site, un premier prototype a été réalisé et proposé aux planificatrices. Leurs retours ont permis de déceler des besoins ou contraintes non-exprimés. Nous avons donc ajusté la formulation du problème lorsque cela était possible, et effectué les modifications algorithmiques qui en découlaient.

Ce processus s'est répété plusieurs fois, car la formulation d'un tel problème n'est pas évidente. En effet, il peut être difficile pour des non-informaticiens de distinguer une vraie contrainte d'une simple habitude de planification. Ainsi, nous avons travaillé sur de nombreuses versions du problème, en prenant parfois en compte des contraintes d'usage qui limitaient notre espace de recherche. Très utiles lorsqu'on établit les plannings à la main, ces facilités de planification sont en fait superflues, souvent même contre-productives pour une planification automatisée. Au contraire, certaines contraintes n'ont pas été immédiatement formulées parce qu'évidentes pour quelqu'un ayant connaissance du terrain. Mon inexpérience dans le service à domicile m'a empêchée à plusieurs reprises de remarquer des aberrations dans des plannings qui respectaient bien les demandes exprimées, mais qui étaient absolument inutilisables en pratique.

Après de nombreux échanges sur le sujet, nous sommes parvenus à un ensemble plus réduit de contraintes. Toutefois, même en relâchant certaines d'entre elles, beaucoup d'instances restaient infaisables. Une analyse plus poussée des tournées de l'entreprise, nous a permis de remarquer que malgré la volonté de la structure de travailler sur des secteurs indépendants, ceux-ci sont en fait poreux. Il est en effet extrêmement fréquent que des intervenants soient affectés à des visites hors de leur district. Une fusion totale des secteurs n'est pas réalisable en pratique car le territoire couvert par Adomni-Quemera est trop étendu pour que les intervenants puissent le traverser entièrement. L'affectation à un secteur restreint est un argument important lors du recrutement de personnel. Notons par ailleurs que notre méthode a été conçue pour fonctionner sur des districts contenant une vingtaine d'intervenants au maximum, et non pas sur tout le territoire. Cette collaboration a donc permis de mettre en lumière un problème qui n'avait initialement pas été considéré, mais qui est en fait fondateur dans le fonctionnement de l'entreprise. La définition des différents secteurs et l'affectation des intervenants sur ces secteurs est une question complexe qui mérite d'être étudiée indépendamment de cette thèse. Aussi, même si nous avons identifié quelques éléments, la définition d'une "bonne" tournée reste encore un point-clé à caractériser avec précision.

En plus des problèmes de sectorisation, nous avons rencontré des difficultés dues au fait que toutes les données n'étaient pas initialement présentes dans le logiciel de gestion. Les planificatrices sont intervenues pour modifier manuellement les données (préciser les disponibilités, compétences, etc.). Comme Adomni-Quemera emploie beaucoup de salariés et fournit de nombreux bénéficiaires, la tâche est longue, et les planificatrices n'ont pas été en mesure de tout mettre à jour rapidement. Une fois la base de données initiale établie, le travail de maintenance peut être effectué au fur et à mesure, et n'est donc pas très lourd s'il est réalisé très fréquemment. Toutefois, le travail de mise en place de cette base demande un investissement considérable, que les planificatrices n'ont pas pu fournir en parallèle de toutes leurs autres missions. Sans initialisation propre et maintenance régulière, la base de données devient très rapidement obsolète, ce qui empêche la mise en service et l'utilisation de notre prototype.

Même si le prototype réalisé n'a pas pu être déployé et utilisé, cette collaboration a été très bénéfique puisqu'elle a permis de mettre en exergue l'important écart entre théorie et réalité. Bien que nous ayons tenté de le réduire en allant sur le terrain, la mise en service d'un outil d'aide à la décision fonctionnel aurait requis un travail à temps plein, en lien direct avec les planificatrices pour faire évoluer l'outil au fur et à mesure de l'identification de nouveaux besoins.

Pour conclure, cette collaboration s'achève sur une preuve de concept et non sur un prototype fonctionnel. Elle a néanmoins permis de mettre en évidence l'utilité et l'usage possible d'un logiciel d'aide à la planification, ainsi que ses limites. Les échanges avec les planificatrices ont levé la crainte que le prototype remplace leur travail. Nous

avons pu mieux définir les contraintes à prendre en compte, et ouvrir la discussion sur les objectifs à considérer. En plus d'avoir formalisé entièrement le problème, nous avons détecté un problème de sectorisation, et mis en place les bases pour d'éventuelles futures collaborations de recherche, mieux ciblées et donc plus efficaces. Enfin, nous avons identifié les verrous organisationnels, structurels et techniques à considérer en amont de la conception d'un outil de planification.

Conclusion générale et perspectives

Synthèse des contributions

Dans cette thèse, nous avons entrepris d'intégrer une dimension humaine dans des problèmes de planification des tournées de soins et services à domicile.

Nous avons tout d'abord proposé une heuristique à horizon glissant pour résoudre un problème de planification de tournées en maximisant la continuité de soins, et en prenant en compte des contraintes légales, mais également des contraintes temporelles et des contraintes de préférence. Bien que constituant un aspect fondamental des travaux de recherche en santé publique, la continuité de soins est rarement l'objectif principal des travaux de recherche opérationnelle. En nous appuyant sur des données réelles, nous avons montré qu'il était possible d'obtenir une meilleure continuité de soins sans pour autant dégrader les temps de trajets des tournées.

Grâce à une collaboration avec une entreprise de services à domicile, nous avons remarqué que les intervenants et les bénéficiaires étaient soumis à un fort roulement, créant des problèmes de réoptimisation peu étudiés dans la littérature. En effet, de nombreux événements peuvent perturber le bon déroulement d'un planning, et certains d'entre eux (démissions d'intervenants, départs en retraite, départs des patients en maison de retraite, etc.) peuvent être anticipés. Si la littérature en matière de planification avec prise en compte des incertitudes et perturbations est en train de se développer, les problèmes de planification avec contraintes de continuité sont assez peu étudiés à notre connaissance.

Nous avons étudié un problème au niveau décisionnel stratégique, où les départs et arrivées d'intervenants et de bénéficiaires doivent être pris en compte dans le processus de planification. Nous avons décomposé le problème en une phase de génération de tournées, puis une phase de sélection grâce à une modélisation du problème basée sur des graphes. En considérant des horaires de services fixes, des contraintes légales et des contraintes de continuité humaine, nous avons établi une méthode exacte capable de résoudre des problèmes de taille réelle sur un horizon hebdomadaire. Contrairement à

la majorité des travaux de la littérature, nous nous sommes intéressées à la satisfaction des intervenants, aspect habituellement délaissé par les auteurs.

Ensuite, nous nous sommes placées au niveau décisionnel opérationnel, et avons considéré un problème récurrent sur le terrain : la réoptimisation des tournées journalières pour pallier l'absence d'un ou plusieurs intervenants. Nous avons adopté une approche multi-objectif afin de prendre en compte les intérêts des différents acteurs du problème. Avec une méthode de hiérarchisation, nous avons priorisé le nombre de services fournis, et une méthode de Pareto nous a ensuite permis de proposer un compromis entre plusieurs objectifs secondaires représentant les intérêts de chacun des acteurs du problème. Afin de maximiser le nombre de services couverts malgré l'absence de personnel, nous avons introduit de la flexibilité dans les horaires des services et considéré une continuité de soins partielle. Nous avons proposé une version heuristique de la méthode développée pour le problème stratégique, que nous avons testée sur des instances de la littérature.

Finalement, nous avons présenté le cas d'étude qui a motivé certains aspects des problèmes théoriques étudiés dans cette thèse. Nous avons exposé la démarche mise en œuvre pour établir une preuve de concept avec une entreprise de services à domicile. Nous avons intégré de nombreuses contraintes inhabituelles dans la littérature, visant à retranscrire des habitudes de planification, des caractéristiques du fonctionnement interne de l'entreprise, ou bien des souhaits des planificatrices pour améliorer le confort des intervenants. Un prototype a été développé, mais n'a pu être déployé et utilisé sur le terrain. Nous avons mis en avant la difficulté pour passer d'une preuve de concept à une application pratique pour le problème réel.

Perspectives de recherche

Ces travaux de thèse ouvrent de nombreuses perspectives de recherche, à plus ou moins long terme, que nous détaillons pour conclure ce manuscrit.

Améliorations des méthodes proposées

Dans le chapitre 4, nous avons proposé une méthode exacte **SRO** pour un problème de réoptimisation stratégique des tournées. Rappelons que pour générer les tournées admissibles, nous avons utilisé une modélisation en graphes, dans lesquels nous générons des chemins dont le poids est borné. Si le poids maximal d'un chemin admissible est déterminé par les valeurs légales définies dans les **CCN**, nous calculons également des bornes inférieures pour le temps effectif minimal de travail. Ces bornes sont calculées de manière assez naïve, et il serait intéressant de trouver de nouvelles bornes, qui permettraient d'augmenter la longueur minimale des chemins, tant au niveau de l'amplitude que du temps effectif de travail.

La méthode **SRO** est limitée par la taille des instances qu'elle peut résoudre, puisque la génération des chemins est exhaustive, et donc de complexité exponentielle. On peut imaginer des versions heuristiques de cette méthode. Nous avons déjà évoqué les valeurs limites inférieures des chemins, mais nous pouvons ajouter à cela un nombre maximal de chemins générés par graphe, avec un ordre aléatoire de visites des voisins lors de la création des chemins.

Nous pouvons également imaginer une heuristique de sélection des chemins qui permettrait de réduire la complexité algorithmique.

Dans le chapitre 6, nous évoquons le fait que la garantie d'optimalité n'est pas primordiale dans le cas pratique. Pour réduire la complexité de l'algorithme et trouver des solutions plus rapidement, ou pour résoudre de plus grandes instances, nous avons utilisé des valeurs minimales pour la longueur des chemins générés. Elles ont été définies empiriquement grâce à des tests préliminaires mais nous pourrions déterminer des critères génériques qui permettraient d'automatiser les calculs.

Extensions des méthodes proposées

L'utilisation de ces valeurs inférieures permettrait également d'explorer un aspect que nous n'avons pas abordé dans cette thèse : l'équilibrage de charges. Imposer des valeurs minimales de temps de service permettrait de répartir la charge de travail de manière plus équitable. L'équilibrage de charges est d'ailleurs une notion qui peut être soumise à plusieurs interprétations. Elle peut être définie comme la répartition équitable des heures de services, mais la pénibilité des services peut aussi entrer en considération. Le critère de continuité de soins que nous avons imposé dans cette thèse peut dégrader cet équilibrage de pénibilité puisqu'un patient dont les services sont considérés comme pénibles va être affecté à un nombre réduit d'intervenants. Nous pouvons donc envisager de créer des poids relatifs à la pénibilité des services requis, et d'imposer de nouvelles contraintes sur la pénibilité globale d'une tournée lors de la génération de chemins.

Nous avons étudié la satisfaction des intervenants au travers de différents indicateurs tels que la minimisation de l'amplitude d'une tournée, la minimisation des temps d'attente, la minimisation des temps de trajets, etc. Toutefois, tous les intervenants n'ont pas les mêmes préférences quant à la composition de leur tournée de travail. En effet, si certains souhaitent une tournée compacte et donc une amplitude faible, certains apprécieront plutôt d'avoir une longue coupure en milieu de journée. De même, s'il y a une intervention de 20 minutes entre deux services, certains préfèrent passer les 20 minutes dans un trajet en voiture, d'autres préfèrent une attente de 20 minutes. Ainsi, selon les contraintes et préférences individuelles, deux tournées identiques ne seront pas vécues de la même manière par deux intervenants différents. Pour proposer des solutions satisfaisantes pour chacun, il serait intéressant de déterminer une fonction de satisfaction individuelle, de manière à pondérer chaque tournée selon l'intervenant auquel elle est

destinée, et ainsi d'utiliser cette fonction comme objectif lors de la phase finale de sélection des chemins.

Nous avons observé que les intérêts des intervenants, des patients ou de la structure sont souvent conflictuels dans les problèmes étudiés. Étendre la vision multi-objectif proposée dans le chapitre 5 aux autres méthodes développées dans cette thèse permettrait de trouver un compromis en assurant à la fois une certaine continuité de soins, des tournées favorisant la qualité de vie au travail et une rentabilité économique.

Perspectives à court terme pour le cas d'étude

Nous avons énoncé les nombreuses difficultés rencontrées pour déployer notre prototype sur le terrain. Une collaboration plus proche avec le personnel d'Adomni-Quemera permettrait certainement de franchir ces obstacles et de proposer des solutions quant à la récupération et gestion des données qui nous ont fait défaut. Nous pouvons envisager de redéfinir les priorités sur les contraintes d'usage à intégrer dans la planification, de manière à proposer des solutions qui ne satisfont pas toutes les contraintes mais qui peuvent facilement être ajustées a posteriori par les planificatrices.

Pistes de recherches à plus long terme

Cette étude de cas a mis en lumière des problèmes connexes mais tout aussi importants dans le fonctionnement d'une structure à domicile.

Lorsqu'un nouveau bénéficiaire intègre la structure, le nombre de visites, et les horaires sont définis contractuellement. Nous pouvons imaginer un algorithme qui détermine les meilleurs horaires auxquels effectuer les services requis par le nouveau bénéficiaire.

Lorsqu'un nouvel intervenant est recruté, son secteur d'intervention est également défini contractuellement. Nous avons vu que la politique de sectorisation menée par Adomni-Quemera n'était pas effective en pratique, et était à l'origine de nombreux problèmes lors du développement de notre prototype. Du fait des disparités démographiques dans le territoire couvert par Adomni-Quemera, on ne peut envisager des secteurs de taille ou de population égales et un fonctionnement complètement indépendant des secteurs est impossible à l'heure actuelle. Nous pourrions donc affecter les intervenants à des zones individuellement définies, mais dont les frontières sont fixes. Ainsi, les secteurs de différents intervenants pourraient se chevaucher. Cela imposerait de planifier tous les intervenants en même temps, et non plus secteur par secteur, causant une augmentation de la taille des instances considérées. Toutefois, ce système, plus représentatif du fonctionnement actuel de l'entreprise, résoudrait les problèmes de frontières et de sur/sous-population de secteur lorsque la population des bénéficiaires et/ou intervenants subit des changements.

Enfin, notons que la multi-modalité est assez peu étudiée dans la littérature malgré le fait que les structures de soins et services à domicile interviennent souvent dans des milieux semi-urbains où des intervenants sont véhiculés, d'autres évoluent à pied et d'autres encore utilisent les transports en commun. Pour des considérations environnementales, d'autres modes de déplacement comme le vélo ou le covoiturage peuvent être privilégiés. L'étude de plusieurs moyens de transport complexifie le problème et apporte de nouveaux questionnements pour la planification de tournées de soins et services.

Liste des acronymes

ARS Agences Régionales de Santé. 16

CCN Conventions Collectives Nationales. 67, 69, 70, 75, 76, 78, 89, 91, 100, 101, 103, 108, 109, 125, 129, 133, 143, 149, 150, 153, 162

ConVRP Consistent Vehicle Routing Problem. 45

DCVRP Distance-Constrained Vehicle Routing Problem. 45

EHPAD Établissements d'Hébergement pour Personnes Âgées et Dépendantes. 14, 16, 18

HAD Hospitalisation À Domicile. 17

HC Home Care. 19

HHC Home Health Care. 19, 22–24, 27, 30, 31, 36

HHCRSP Home Health Care Routing and Scheduling Problem. 22, 23, 28, 32–34, 45, 51

INSEE Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques. 14, 17

mTSP multi-Traveling Salesman Problem. 24

ORO Operational Re-Optimization. 104

PRS Programmes Régionaux de Santé. 16

PVRP Periodic Vehicle Routing Problem. 45

SAAD Services d'Aide et d'Accompagnement. 17, 18

SAMU Service d'Aide Médicale Urgente. 16

SAP Services à la Personne. 17

SDVRP Site-Dependent Vehicle Routing Problem. 45

SMUR Services Mobiles d'Urgence et de Réanimation. 16

SPASAD Services Polyvalents d'Aide et de Soins à Domicile. 18

SRO Strategic Re-Optimization. 73, 84, 94, 162, 163

SROMS Schémas Régionaux d'Organisation Médico-Sociale. 16

SROS Schémas Régionaux d'Organisation des Soins. 16

SSIAD Services de soins infirmiers à domicile. 18

TAP Therapist Assignment Problem. 32

TSP Traveling Salesman Problem. 24, 63

VRP Vehicle Routing Problem. 4, 22–24, 26, 28, 32, 33, 44, 45, 59, 61–63

VRPTW Vehicle Routing Problem with Time Windows. 44, 51

Liste des figures

1.1	Pyramide des âges de la population française. <i>Source : Insee, projections de populations 2013-2070</i> ¹	17
2.1	Nombre de publications portant sur des problèmes de tournées de soins en revue scientifique internationale jusqu'en mai 2019	24
4.1	Exemple simplifié d'un planning initial	68
4.2	Déroulé global de l'algorithme SRO	75
4.3	Graphe associé pour l'intervenant 1	78
4.4	Graphe associé à l'intervenant 1 avec signalement des arcs compatibles avec la contrainte de pause déjeuner	83
4.6	Prise en compte des contraintes dans l'algorithme SRO	86
5.1	Exemple d'un planning initial perturbé	102
5.2	Déroulé global de l'algorithme ORO	106
5.3	Illustration d'un service avec début au plus tôt/au plus tard	107
5.4	Conditions d'intersections avec un checkpoint	108
5.5	Graphe correspondant à l'exemple 5.1 pour l'intervenant vert	109
5.6	Détection des chevauchements invalides	116
5.7	Illustration des notions de dominance et de front de Pareto. <i>Image extraite de la thèse [190]</i>	120
5.8	Méthode ϵ -contrainte	121
5.9	Exemple d'hypervolume pour une optimisation bi-objectif. <i>Schéma extrait de l'article [2]</i>	122
5.10	Hypervolume moyen des fronts de Pareto approximés pour chaque famille d'instance, pour chaque configuration bi-objectif	128
5.11	Nombre moyen de solutions non dominées composant les fronts de Pareto approximés pour chaque famille d'instance, pour chaque configuration bi-objectif	129
5.12	Fronts de Pareto normalisés pour deux instances de la même famille	130
5.13	Front de Pareto faible normalisé pour une instance $T_3 - F_1 - C_2$ dans la configuration O_D/O_R	130

5.14	Fronts de Pareto normalisés pour chaque configuration objectif d'une même instance	131
6.1	Page d'accueil du prototype	147
6.2	Formulaire de modification des paramètres	148
6.3	Formulaire d'ajout d'intervenant	149
6.4	Formulaire d'ajout de bénéficiaire	149

Liste des tableaux

3.1	Exemples de calcul de continuité selon les différents indicateurs	50
3.2	Caractéristiques des instances	57
3.3	Comparaison des résultats de continuité de notre méthode avec les plan- nings réels	57
3.4	Tableau récapitulatif des notations et données du chapitre 3	59
4.1	Caractéristiques des instances	88
4.2	Résultats de la méthode SRO	90
4.3	Tableau récapitulatif des notations utilisées dans le chapitre 4	93
5.1	Catégorisation des instances selon le degré de contraintes	123
5.2	Catégorisation des instances selon le degré de flexibilité	124
5.3	Résultats numériques pour la méthode ORO	125
5.4	Tableau récapitulatif des notations utilisées dans le chapitre 5	132
6.1	Données relatives aux intervenants et bénéficiaires	145
6.2	Paramètres du problème	146
6.3	Configurations de tests	152
6.4	Influence de la prise en compte des contraintes sur la faisabilité des instances	153
6.5	Recensement des incohérences dans les tournées du planning initial non perturbé	154
6.6	Résultats numériques pour la réoptimisation opérationnelle	156
A.1	Considered problem - Journal papers - Part 1 of 2	194
A.2	Considered problem - Journal papers - Part 2 of 2	195
A.3	Methods and experimentations - Journal papers - Part 1 of 2	196
A.4	Methods and experimentations - Journal papers - Part 2 of 2	197
A.5	Considered problem - Conference papers	198
A.6	Methods and experimentations - Conference papers	199
A.7	Objective function -Journal papers - Part 1 of 2	200
A.8	Objective function - Journal papers - Part 2 of 2	201
A.9	Objective function - Conference papers	202
A.10	Constraints related to visits - Journal papers - Part 1 of 2	203
A.11	Constraints related to visits - Journal papers - Part 2 of 2	204

A.12 Constraints related to visits -Conference papers	205
A.13 Constraints related to patients - Journal papers - Part 1 of 2	206
A.14 Constraints related to patients - Journal papers - Part 2 of 2	207
A.15 Constraints related to patients - Conference papers	208
A.16 Constraints related to staff members - Journal papers - Part 1 of 2	209
A.17 Constraints related to staff members - Journal papers - Part 2 of 2	210
A.18 Constraints related to staff members - Conference papers	211
A.19 Uncertainties and perturbations	212

Liste des publications

- [1] M. Di Mascolo, C. Martinez, et M.-L. Espinouse, « Routing and scheduling in home health care : A literature review and bibliometric analysis », article soumis, 2020.
- [2] C. Martinez, M. L. Espinouse, et M. Di Mascolo, « Continuity of care in home services : a client-centered heuristic for the home health care routing and scheduling problem », 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), p. 1045-1050, 2018.
- [3] C. Martinez, M. Di Mascolo, M.-L. Espinouse, et J. Radureau, « Un outil pour la replanification long terme dans le secteur du service à domicile », présenté à Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers (GISEH), 2020.
- [4] C. Martinez, M.-L. Espinouse, et M. Di Mascolo, « Polynomial subcases of the home health care routing and scheduling problem with fixed services », présenté à European Chapter on Combinatorial Optimization, 2018.
- [5] C. Martinez, M.-L. Espinouse, et M. Di Mascolo, « Re-planning In Home Healthcare : A Decomposition Approach To Minimize Idle Times For Workers While Ensuring Continuity Of Care », présenté à 9th IFAC Conference on Manufacturing Modeling, Management and Control, 2019.
- [6] C. Martinez, M.-L. Espinouse, et M. Di Mascolo, « An exact two-phase approach to re-assign careworkers in home care planning », article à soumettre, 2020.

Bibliographie

- [1] Aide à domicile Bourgoin Jallieu – ADHAP, 2016.
- [2] S. F. Adra, T. J. Dodd, I. A. Griffin, and P. J. Fleming. Convergence Acceleration Operator for Multiobjective Optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 13(4) :825–847, 2009.
- [3] Y. Agarwal, K. Mathur, and H. M. Salkin. A set-partitioning-based exact algorithm for the vehicle routing problem. *Networks*, 19(7) :731–749, 1989.
- [4] D. Aiane, A. El-Amraoui, and K. Mesghouni. A new optimization approach for a home health care problem. *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM), Sevilla, Spain*, pages 285–290, 2015.
- [5] S. Ait Haddadene, N. Labadie, and C. Prodhon. NSGAI enhanced with a local search for the vehicle routing problem with time windows and synchronization constraints. *IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control (MIM), Troyes, France*, 49(12) :1198 – 1203, 2016.
- [6] S. R. Ait Haddadene, N. Labadie, and C. Prodhon. A GRASP \times ILS for the vehicle routing problem with time windows, synchronization and precedence constraints. *Expert Systems with Applications*, 66 :274–294, 2016.
- [7] C. Akjiratikarl, P. Yenradee, and P. Drake. PSO-based algorithm for home care worker scheduling in the UK. *Computers & Industrial Engineering*, 53(4) :559–583, 2007.
- [8] H. Allaoua, S. Borne, L. Létocart, and R. Calvo. A matheuristic approach for solving a home health care problem. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 41 :471–478, 2013.
- [9] F. Alves, F. Alvelos, A. Rocha, A. Pereira, and P. Leitão. Periodic vehicle routing problem in a health unit. pages 384–389, 2019.
- [10] F. Alves, L. Costa, A. Rocha, A. Pereira, and P. Leitão. A multi-objective approach to the optimization of home care visits scheduling. pages 435–442, 2019.
- [11] F. Alves, A. Pereira, J. Barbosa, and P. Leitão. Scheduling of home health care services based on multi-agent systems. *Communications in Computer and Information Science*, 887 :12–23, 2018.
- [12] F. Alves, A. Pereira, F. Fernandes, A. Fernandes, P. Leitão, and A. Martins. Optimal schedule of home care visits for a health care center. *Lecture Notes in*

- Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 10406 LNCS :135–147, 2017.
- [13] F. Alves, A. I. Pereira, A. Fernandes, and P. Leitão. Optimization of Home Care Visits Schedule by Genetic Algorithm. In P. Korošec, N. Melab, and E.-G. Talbi, editors, *Bioinspired Optimization Methods and Their Applications*, Lecture Notes in Computer Science, pages 1–12. Springer International Publishing, 2018.
- [14] Y.-J. An, Y. Kim, B. Jeong, and S.-D. Kim. Scheduling healthcare services in a home healthcare system. *Journal of the Operational Research Society*, 63(11), 2012.
- [15] M. L. Balinski and R. E. Quandt. On an Integer Program for a Delivery Problem. *Operations Research*, 12(2) :300–304, 1964.
- [16] J. Bard, Y. Shao, and A. Jarrah. A sequential GRASP for the therapist routing and scheduling problem. *Journal of Scheduling*, 17(2) :109–133, 2014.
- [17] J. Bard, Y. Shao, X. Qi, and A. Jarrah. The traveling therapist scheduling problem. *IIE Transactions*, 46(7) :683–706, 2014.
- [18] J. Bard, Y. Shao, and H. Wang. Weekly scheduling models for traveling therapists. *Socio-Economic Planning Sciences*, 47(3) :191–204, 2013.
- [19] B. Bashir, M. Chabrol, and C. Caux. Literature review in home care. *9th International Conference on Modelling and Simulation (MOSIM), Bordeaux, France*, 2012.
- [20] P. Baumann. Optimal staff assignment and routing in personalized home care. In *2017 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)*, pages 1027–1031, 2017.
- [21] J. Beasley. Route first—Cluster second methods for vehicle routing. *Omega*, 11(4) :403–408, 1983.
- [22] C. Becker, F. Lorig, and I. Timm. Multiagent systems to support planning and scheduling in home health care management : A literature review. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 11326 LNAI :13–28, 2019.
- [23] S. Begur, D. Miller, and J. Weaver. An integrated spatial DSS for scheduling and routing home-health-care nurses. *Interfaces*, 27(4) :35–48, 1997.
- [24] T. Bektas. The multiple traveling salesman problem : an overview of formulations and solution procedures. *Omega*, 34(3) :209–219, 2006.
- [25] R. Bellman. On a routing problem. *Quarterly of Applied Mathematics*, 16(1) :87–90, 1958.
- [26] R. Ben Bachouch, A. Guinet, and S. Hajri-Gabouj. A Decision-Making Tool for Home Health Care Nurses’ Planning. *Supply Chain Forum : an International Journal*, 12(1) :14–20, 2011.
- [27] A. Bennett and A. Erera. Dynamic periodic fixed appointment scheduling for home health. *IIE Transactions on Healthcare Systems Engineering*, 1(1) :6–19, 2011.

- [28] E. Benzarti. *Home health care operations management : Applying the districting approach to home health care*. PhD Thesis, Ecole Centrale Paris, 2012.
- [29] E. Benzarti, E. Sahin, and Y. Dallery. Operations management applied to home care services : Analysis of the districting problem. *Decision Support Systems*, 55(2) :587–598, 2013.
- [30] S. Bertels and T. Fahle. A hybrid setup for a hybrid scenario : combining heuristics for the home health care problem. *Computers & Operations Research*, 33(10) :2866–2890, 2006.
- [31] M. Blais, S. D. Lapierre, and G. Laporte. Solving a home-care districting problem in an urban setting. *Journal of the Operational Research Society*, 54(11) :1141–1147, 2003.
- [32] V. Borsani, A. Matta, G. Beschi, and F. Sommaruga. A home care scheduling model for human resources. *International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM), Troyes, France*, 1 :449–454, 2006.
- [33] J. Bowers, H. Cheyne, G. Mould, and M. Page. Continuity of care in community midwifery. *Health Care Management Science*, 18(2) :195–204, 2015.
- [34] K. Braekers, R. Hartl, S. Parragh, and F. Tricoire. A bi-objective home care scheduling problem : Analyzing the trade-off between costs and client inconvenience. *European Journal of Operational Research*, 248(2) :428–443, 2016.
- [35] K. Braekers, K. Ramaekers, and I. Van Nieuwenhuysse. The vehicle routing problem : State of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*, 99 :300–313, 2016.
- [36] D. Bredström and M. Rönnqvist. Combined vehicle routing and scheduling with temporal precedence and synchronization constraints. *European Journal of Operational Research*, 191(1) :19–31, 2008.
- [37] P. Cappanera and M. G. Scutellà. Home Care optimization : impact of pattern generation policies on scheduling and routing decisions. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 41 :53 – 60, 2013.
- [38] P. Cappanera and M. G. Scutellà. Joint assignment, scheduling, and routing models to home care optimization : A pattern-based approach. *Transportation Science*, 49(4) :830–852, 2014.
- [39] P. Cappanera and M. G. Scutellà. Pattern Generation Policies to Cope with Robustness in Home Care. In *Health Care Systems Engineering*, Springer Proceedings in Mathematics & Statistics, pages 257–268. Springer, Cham, 2017.
- [40] P. Cappanera, M. G. Scutellà, F. Nervi, and L. Galli. Demand uncertainty in robust Home Care optimization. *Omega*, 80 :95–110, 2018.
- [41] P. Cappanera, M. G. Scutellà, and F. Visintin. Home Care Services Delivery : Equity Versus Efficiency in Optimization Models. In A. Matta, J. Li, E. Sahin, E. Lanzarone, and J. Fowler, editors, *Proceedings of the International Conference on Health Care Systems Engineering*, Springer Proceedings in Mathematics & Statistics, pages 1–13. Springer International Publishing, 2014.

- [42] G. Carello and E. Lanzarone. A cardinality-constrained robust model for the assignment problem in home care services. *European Journal of Operational Research*, 236(2) :748–762, 2014.
- [43] G. Carello, E. Lanzarone, D. Laricini, and M. Servilio. Handling Time-Related Demands in the Home Care Nurse-to-Patient Assignment Problem with the Implementor-Adversarial Approach. In *Health Care Systems Engineering*, Springer Proceedings in Mathematics & Statistics, pages 87–97. Springer, Cham, 2017.
- [44] G. Carello, E. Lanzarone, and S. Mattia. Trade-off between stakeholders’ goals in the home care nurse-to-patient assignment problem. *Operations Research for Health Care*, 16 :29–40, 2018.
- [45] M. Cattafi, R. Herrero, M. Gavanelli, M. Nonato, and F. Malucelli. Improving quality and efficiency in home health care : An application of constraint logic programming for the Ferrara NHS unit. *Technical Communications of the 28th International Conference on Logic Programming (ICLP’12), Budapest, Hungary*, 17 :415–424, 2012.
- [46] M. Cattafi, R. Herrero, M. Gavanelli, M. Nonato, and F. Malucelli. An application of constraint solving for home health care. *AI Communications*, 28(2) :215–237, 2015.
- [47] S. Chahed, E. Marcon, E. Sahin, D. Feillet, and Y. Dallery. Exploring new operational research opportunities within the home care context : the chemotherapy at home. *Health Care Management Science*, 12(2) :179–191, 2009.
- [48] M. Chaieb, J. Jemai, and K. Mellouli. A decomposition - construction approach for solving the home health care scheduling problem. *Health care management science*, 2019.
- [49] C. Chen, Z. Rubinstein, S. Smith, and H. C. Lau. Tackling large-scale home health care delivery problem with uncertainty. *Proceedings of the Twenty-Seventh International Conference on Automated Planning and Scheduling ICAPS 2017 : Pittsburgh, June 18-23*, pages 358–366, 2017.
- [50] E. Cheng and J. Rich. A home health care routing and scheduling problem. *Technical report*, 1998.
- [51] D. A. Christakis, L. Mell, J. A. Wright, R. Davis, and F. A. Connell. The association between greater continuity of care and timely measles-mumps-rubella vaccination. *American journal of public health*, 90(6) :962, 2000.
- [52] M. Cissé, S. Yalçındağ, Y. Kergosien, E. Şahin, C. Lenté, and A. Matta. OR problems related to Home Health Care : A review of relevant routing and scheduling problems. *Operations Research for Health Care*, 13-14 :1–22, 2017.
- [53] G. Clarke and J. W. Wright. Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points. *Operations Research*, 12(4) :568–581, 1964.
- [54] J.-F. Cordeau, G. Desaulniers, J. Desrosiers, M. M. Solomon, and F. Soumis. VRP with Time Windows. In *The Vehicle Routing Problem*, Discrete Mathematics and Applications, pages 157–193. 2002.

- [55] J.-F. Cordeau and G. Laporte. A Tabu Search Algorithm For The Site Dependent Vehicle Routing Problem With Time Windows. *INFOR : Information Systems and Operational Research*, 39(3) :292–298, 2001.
- [56] G. Dantzig, R. Fulkerson, and S. Johnson. Solution of a Large-Scale Traveling-Salesman Problem. *Journal of the Operations Research Society of America*, 2(4) :393–410, 1954.
- [57] G. B. Dantzig and J. H. Ramser. The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, 6(1) :80–91, 1959.
- [58] D. Davendra. *Traveling Salesman Problem : Theory and Applications*. BoD – Books on Demand, 2010.
- [59] J. Decerle. *Contribution à l'optimisation de la planification des tournées de soins pour l'hospitalisation à domicile*. phdthesis, Université Bourgogne Franche-Comté, 2018.
- [60] J. Decerle, O. Grunder, A. El Hassani, and O. Barakat. A two-phases matheuristic for the home care routing and scheduling problem. *IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control (MIM), Troyes, France*, 49(12) :1484–1489, 2016.
- [61] J. Decerle, O. Grunder, A. H. El Hassani, and O. Barakat. A matheuristic for a multi-depot home health care problem. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11) :340–345, 2018.
- [62] J. Decerle, O. Grunder, A. Hajjam El Hassani, and O. Barakat. A memetic algorithm for a home health care routing and scheduling problem. *Operations Research for Health Care*, 16 :59–71, 2018.
- [63] J. Decerle, O. Grunder, A. Hajjam El Hassani, and O. Barakat. A hybrid memetic-ant colony optimization algorithm for the home health care problem with time window, synchronization and working time balancing. *Swarm and Evolutionary Computation*, 46 :171–183, 2019.
- [64] J. Decerle, O. Grunder, A. Hajjam El Hassani, and O. Barakat. A memetic algorithm for multi-objective optimization of the home health care problem. *Swarm and Evolutionary Computation*, 44 :712–727, 2019.
- [65] J. Decerle, O. Grunder, A. H. E. Hassani, and O. Barakat. Impact analysis of workload balancing on the home health care routing and scheduling problem. In *2017 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, pages 0096–0101, 2017.
- [66] J. Decerle, O. Grunder, A. H. E. Hassani, and O. Barakat. Impact of the workload definition on the multi-objective home health care problem. In *IFAC-PapersOnLine*, volume 51 of *16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2018*, pages 346–351, 2018.
- [67] L. Dekhici, R. Redjem, K. Belkadi, and A. Mhamedi. Discretization of the Firefly Algorithm for Home Care. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 42(1) :20–26, 2019.

- [68] M. Demirbilek, J. Branke, and A. Strauss. Dynamically accepting and scheduling patients for home healthcare. *Health Care Management Science*, pages 1–16, 2018.
- [69] M. Demirbilek, J. Branke, and A. Strauss. Home healthcare routing and scheduling of multiple nurses in a dynamic environment. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2019.
- [70] C. Dhaenens. *Optimisation Combinatoire Multi-Objectif : Apport des méthodes coopératives et contribution à l'extraction de connaissances*. PhD Thesis, 2005.
- [71] L. Di Gaspero and T. Urli. A CP/LNS approach for multi-day homecare scheduling problems. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 8457 :1–15, 2014.
- [72] M. Di Mascolo, M. Espinouse, and S. Haddadene. Taking patients' wishes into account for daily planning in the Home Health Care context. In *IFAC-PapersOnLine*, volume 51, pages 1010–1015, 2018.
- [73] M. Di Mascolo, M. Espinouse, and C. E. Ozkan. Synchronization between human resources in Home Health Care context. *Proceedings of the first International Conference on Health Care Systems Engineering, Milan, Italy*, pages 73–86, 2014.
- [74] M. Di Mascolo, M.-L. Espinouse, and Z. El Hajri. Planning in Home Health Care Structures : A literature review. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1) :4654–4659, 2017.
- [75] M. Di Mascolo, M.-L. Espinouse, P. Gruau, and J. Radureau. A decision-making tool for the calculation of a robust planning for home service employees. volume 210, pages 167–177, 2017.
- [76] M. Di Mascolo, C. Martinez, and M.-L. Espinouse. Routing and scheduling in home health care : A literature review and bibliometric analysis. *Article soumis*, 2020.
- [77] A. Dixit, A. Mishra, and A. Shukla. Vehicle Routing Problem with Time Windows Using Meta-Heuristic Algorithms : A Survey. In N. Yadav, A. Yadav, J. C. Bansal, K. Deep, and J. H. Kim, editors, *Harmony Search and Nature Inspired Optimization Algorithms*, Advances in Intelligent Systems and Computing, pages 539–546, Singapore, 2019. Springer.
- [78] G. Du, X. Liang, and C. Sun. Scheduling Optimization of Home Health Care Service Considering Patients' Priorities and Time Windows. *Sustainability*, 9(2) :253, 2017.
- [79] G. Du, L. Zheng, and X. Ouyang. Real-time scheduling optimization considering the unexpected events in home health care. *Journal of Combinatorial Optimization*, 37(1) :196–220, 2019.
- [80] B. Eksioglu, A. V. Vural, and A. Reisman. The vehicle routing problem : A taxonomic review. *Computers & Industrial Engineering*, 57(4) :1472–1483, 2009.
- [81] Z. El Hajri, M. Di Mascolo, M.-L. Espinouse, and J. Radureau. A Multi-objective Model for Home Service Assignment and Routing Problem. In *20th World Congress of the International Federation of Automatic Control, IFAC 2017, Juillet 2017, Toulouse, France*, Toulouse, France, 2017.

- [82] B. Elbenani, J. Ferland, and V. Gascon. Mathematical programming approach for routing home care nurses. *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, Singapore, Singapore*, pages 107–111, 2008.
- [83] M. Eliseu, M. Gomes, and A. Juan. A biased-randomized heuristic for the home healthcare routing problem. volume 223, pages 57–67, 2018.
- [84] W. Emiliano, J. Telhada, and M. d. S. Carvalho. Home health care logistics planning : a review and framework. *Procedia Manufacturing*, 13 :948–955, 2017.
- [85] L. En-nahli, S. Afifi, H. Allaoui, and I. Nouaouri. Local Search Analysis for a Vehicle Routing Problem with Synchronization and Time Windows Constraints in Home Health Care Services. *IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control (MIM), Troyes, France*, 49(12) :1210–1215, 2016.
- [86] L. En-nahli, H. Allaoui, and I. Nouaouri. A Multi-objective Modelling to Human Resource Assignment and Routing Problem for Home Health Care Services. *IFAC*, 48(3) :698 – 703, 2015.
- [87] M. Erdem and S. Bulkan. A two-stage solution approach for the large-scale home healthcare routeing and scheduling problem. *South African Journal of Industrial Engineering*, 28(4) :133–149, 2017.
- [88] M. Erdem and C. Koç. Analysis of electric vehicles in home health care routing problem. *Journal of Cleaner Production*, 234 :1471–1483, 2019.
- [89] E. A. Eriksson and L.-G. Mattsson. Quantitative Measurement of Continuity of Care : Measures in Use and an Alternative Approach. *Medical Care*, 21(9) :858–875, 1983.
- [90] A. Errarhout, S. Kharraja, and I. Zorkani. Caregivers’ assignment problem in home health care structures. *International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM), Rabat, Morocco*, pages 1–8, 2013.
- [91] D. Espadinha and T. Cardoso-Grilo. Planning the Delivery of Home-Based Long-Term Care : A Mathematical Programming-Based Tool to Support Routes’ Planning. volume 278, pages 107–124, 2019.
- [92] M.-L. Espinouse, M. Di Mascolo, and F. Thiard. Exact method of daily planning with consideration of temporal constraints to optimize the patient’s satisfaction in the Home Health Care context. *CIE44 & IMSS’14 Proceedings, Istanbul, Turkey*, 2014.
- [93] J. Euchi. Optimising the routing of home health caregivers : can a hybrid ant colony metaheuristic provide a solution? *British Journal of Healthcare Management*, 26(7) :192–196, 2020.
- [94] P. Eveborn, P. Flisberg, and M. Rönnqvist. Laps Care—an operational system for staff planning of home care. *European Journal of Operational Research*, 171(3) :962–976, 2006.
- [95] A. Fathollahi-Fard, M. Hajiaghaei-Keshteli, and S. Mirjalili. A set of efficient heuristics for a home healthcare problem. *Neural Computing and Applications*, 2019.

- [96] A. M. Fathollahi-Fard, K. Govindan, M. Hajiaghahi-Keshteli, and A. Ahmadi. A green home health care supply chain : New modified simulated annealing algorithms. *Journal of Cleaner Production*, 240 :118200, 2019.
- [97] A. M. Fathollahi-Fard, M. Hajiaghahi-Keshteli, and R. Tavakkoli-Moghaddam. A bi-objective green home health care routing problem. *Journal of Cleaner Production*, 200 :423–443, 2018.
- [98] A. M. Fathollahi-Fard, M. Hajiaghahi-Keshteli, and R. Tavakkoli-Moghaddam. A Lagrangian Relaxation-based Algorithm to Solve a Home Health Care Routing Problem. *International Journal of Engineering*, 31(10) :1734–1740, 2018.
- [99] Q. Feng and J. Wang. Vehicle Routing Problem with Time Windows in Aged Service : A Delivery Service Model for the Elderly. 2018.
- [100] C. Fikar and P. Hirsch. A matheuristic for routing real-world home service transport systems facilitating walking. *Journal of Cleaner Production*, 105 :300–310, 2015.
- [101] C. Fikar and P. Hirsch. Home health care routing and scheduling : A review. *Computers & Operations Research*, 77 :86–95, 2017.
- [102] C. Fikar and P. Hirsch. Evaluation of trip and car sharing concepts for home health care services. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 30(1) :78–97, 2018.
- [103] C. Fikar, A. Juan, E. Martinez, and P. Hirsch. A discrete-event driven metaheuristic for dynamic home service routing with synchronised trip sharing. *European Journal of Industrial Engineering*, 10(3) :323–340, 2016.
- [104] M. L. Fisher. Optimal Solution of Vehicle Routing Problems Using Minimum K-Trees. *Operations Research*, 42(4) :626–642, 1994.
- [105] B. A. Foster and D. M. Ryan. An Integer Programming Approach to the Vehicle Scheduling Problem. *Journal of the Operational Research Society*, 27(2) :367–384, 1976.
- [106] S. Frifita and M. Masmoudi. VNS methods for home care routing and scheduling problem with temporal dependencies, and multiple structures and specialties. *International Transactions in Operational Research*, 27(1) :291–313, 2020.
- [107] S. Frifita, M. Masmoudi, and J. Euchì. General variable neighborhood search for home healthcare routing and scheduling problem with time windows and synchronized visits. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 58 :63–70, 2017.
- [108] M. Gamst and T. S. Jensen. A branch-and-price algorithm for the long-term home care scheduling problem. In *Operations Research Proceedings 2011*, pages 483–488. 2012.
- [109] T. Garaix, M. Gondran, P. Lacomme, E. Mura, and N. Tchernev. Workforce Scheduling Linear Programming Formulation. In *IFAC-PapersOnLine*, volume 51 of *16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2018*, pages 264–269, 2018.

- [110] W. W. Garvin, H. W. Crandall, J. B. John, and R. A. Spellman. Applications of Linear Programming in the Oil Industry. *Management Science*, 3(4) :407–430, 1957.
- [111] F. Gayraud, L. Deroussi, N. Grangeon, and S. Norre. A new mathematical formulation for the home health care problem. *Procedia Technology*, 9 :1041–1047, 2013.
- [112] H. Gehring and J. Homberger. Parallelization of a Two-Phase Metaheuristic for Routing Problems with Time Windows. *Journal of Heuristics*, 8(3) :251–276, 2002.
- [113] J. M. Gill and A. G. Mainous III. The Role of Provider Continuity in Preventing Hospitalizations. *Archives of Family Medicine*, 7(4) :352, 1998.
- [114] B. E. Gillett and L. R. Miller. A Heuristic Algorithm for the Vehicle-Dispatch Problem. *Operations Research*, 22(2) :340–349, 1974.
- [115] C. W. Given, M. Branson, and R. Zemach. Evaluation and application of continuity measures in primary care settings. *Journal of community health*, 10(1) :22–41, 1985.
- [116] E. R. Gjevjon, T. I. Romøren, B. . Kjøs, and R. Hellesø. Continuity of care in home health-care practice : two management paradoxes. *Journal of Nursing Management*, 21(1) :182–190, 2013.
- [117] M. I. Gomes and T. R. P. Ramos. Modelling and (re-)planning periodic home social care services with loyalty and non-loyalty features. *European Journal of Operational Research*, 277(1) :284–299, 2019.
- [118] F. Grenouilleau, N. Lahrichi, and L.-M. Rousseau. New decomposition methods for home care scheduling with predefined visits. *Computers & Operations Research*, 115 :104855, 2020.
- [119] F. Grenouilleau, A. Legrain, N. Lahrichi, and L.-M. Rousseau. A set partitioning heuristic for the home health care routing and scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 275(1) :295–303, 2019.
- [120] L. Grieco, M. Utley, and S. Crowe. Operational research applied to decisions in home health care : A systematic literature review. *Journal of the Operational Research Society*, pages 1–32, 2020.
- [121] D. Guericke and L. Suhl. The home health care problem with working regulations. *OR Spectrum*, 39(4) :977–1010, 2017.
- [122] A. Gunawan, H. C. Lau, and K. Lu. Home health care delivery problem. In *Proceedings of the the 8th Multidisciplinary International Scheduling Conference.–2017*, 2017.
- [123] G. Gutin and A. P. Punnen. *The Traveling Salesman Problem and Its Variations*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [124] E. Gutiérrez and C. Vidal. Home Health Care Logistics Management Problems : Framework and Research Perspectives. *3rd International conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM), Istanbul, Turkey*, pages 1–9, 2012.

- [125] A. Heching and J. Hooker. Scheduling home hospice care with logic-based benders decomposition. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 9676 :187–197, 2016.
- [126] A. Heching, J. N. Hooker, and R. Kimura. A Logic-Based Benders Approach to Home Healthcare Delivery. *Transportation Science*, 53(2) :510–522, 2019.
- [127] G. Hiermann. *Metaheuristics for a multimodal home-healthcare scheduling problem*. na, 2012.
- [128] G. Hiermann, M. Prandtstetter, A. Rendl, J. Puchinger, and G. Raidl. Metaheuristics for solving a multimodal home-healthcare scheduling problem. *Central European Journal of Operations Research*, 23(1) :89–113, 2015.
- [129] T. Hindle, A. Hindle, and M. Spollen. Resource allocation modelling for home-based health and social care services in areas having differential population density levels : a case study in Northern Ireland. *Health Services Management Research*, 13(3) :164–169, 2000.
- [130] T. Hindle, G. Hindle, and M. Spollen. Travel-related costs of population dispersion in the provision of domiciliary care to the elderly : a case study in English Local Authorities. *Health Services Management Research*, 22(1) :27–32, 2009.
- [131] P. Hirsch. Recent planning approaches and mobility concepts for home health care services in Austria – A review. *Die Bodenkultur : Journal of Land Management, Food and Environment*, 68(4) :205–222, 2018.
- [132] S. Inanç and A. E. Şenaras. An Application for Routing Ambulance via ACO in Home Healthcare, 2020.
- [133] S. Inanç and A. E. Şenaras. Solving Nurse Scheduling Problem via Genetic Algorithm in Home Healthcare, 2020.
- [134] B. Issaoui, I. Zidi, E. Marcon, and K. Ghedira. New multi-objective approach for the home care service problem based on scheduling algorithms and variable neighborhood descent. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 47 :181–188, 2015.
- [135] B. Issaoui, I. Zidi, E. Marcon, F. Laforest, and K. Ghedira. Literature review : Home health care. *15th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA), Marrakesh, Morocco*, pages 485–492, 2015.
- [136] J. Jemai, M. C., and K. Mellouli. The home care scheduling problem : A modeling and solving issue. *5th International Conference on Modeling, Simulation and Applied Optimization (ICMSAO), Hammamet, Tunisia*, pages 1–6, 2013.
- [137] N. Jozefowicz, F. Semet, and E.-G. Talbi. Multi-objective vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 189(2) :293–309, 2008.
- [138] A. Kandakoglu, A. Sauré, W. Michalowski, M. Aquino, J. Graham, and B. McCormick. A decision support system for home dialysis visit scheduling and nurse routing. *Decision Support Systems*, 130 :113224, 2020.

- [139] C. P. Keller and M. F. Goodchild. The Multiobjective Vending Problem : A Generalization of the Travelling Salesman Problem :. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 2016.
- [140] Y. Kergosien, C. Lenté, and J.-C. Billaut. Home health care problem : An extended multiple traveling salesman problem. *4th Multidisciplinary International Conference on Scheduling : Theory and Applications (MISTA'09), Dublin, Irlande*, pages 10–12, 2009.
- [141] Y. Kergosien, A. Ruiz, and P. Soriano. A routing problem for medical test sample collection in home health care services. *Proceedings of the International Conference on Health Care Systems Engineering (IHCSE), Berlin, Germany*, pages 29–46, 2014.
- [142] A. A. Kovacs, B. L. Golden, R. F. Hartl, and S. N. Parragh. The Generalized Consistent Vehicle Routing Problem. *Transportation Science*, 49(4) :796–816, 2014.
- [143] N. Labadie, C. Prins, and Y. Yang. Iterated Local Search for a Vehicle Routing Problem with Synchronization Constraints. *International Conference on Operations Research and Enterprise Systems (ICORES), Angers, France*, pages 257–263, 2014.
- [144] W. Laesanklang, D. Landa-Silva, and J. Castillo-Salazar. Mixed integer programming with decomposition to solve a workforce scheduling and routing problem. *4th International Conference on Operations Research and Enterprise Systems (ICORES), Lausanne, Switzerland*, pages 283–293, 2015.
- [145] N. Lahrichi, E. Lanzarone, and S. Yalçındağ. A new decomposition approach for the home health care problem. volume 210, pages 27–36, 2017.
- [146] E. Lanzarone and A. Matta. Robust nurse-to-patient assignment in home care services to minimize overtimes under continuity of care. *Operations Research for Health Care*, 3(2) :48–58, 2014.
- [147] E. Lanzarone, A. Matta, and G. Scaccabarozzi. A patient stochastic model to support human resource planning in home care. *Production Planning and Control*, 21(1) :3–25, 2010.
- [148] G. Laporte, Y. Nobert, and M. Desrochers. Optimal Routing under Capacity and Distance Restrictions. *Operations Research*, 33(5) :1050–1073, 1985.
- [149] G. Laporte and F. Semet. Classical Heuristics for the Capacitated VRP. In *The Vehicle Routing Problem, Discrete Mathematics and Applications*, pages 109–128. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002.
- [150] E. L. Lawler, J. K. Lenstra, A. H. G. R. Kan, and D. B. Shmoys. The traveling salesman problem : a guided tour of combinatorial optimization. *WILEY-INTERSCIENCE SERIES IN DISCRETE MATHEMATICS*, 1985.
- [151] Legifrance. Convention collective nationale des entreprises de services à la personne du 20 septembre 2012 - Texte de base, 2012.
- [152] J. K. Lenstra and A. H. G. R. Kan. Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks*, 11(2) :221–227, 1981.

- [153] A. Lieder, D. Moeke, G. Koole, and R. Stolletz. Task scheduling in long-term care facilities : A client-centered approach. *Operations Research for Health Care*, 6 :11 – 17, 2015.
- [154] C.-C. Lin, L.-P. Hung, W.-Y. Liu, and M.-C. Tsai. Jointly rostering, routing, and rostering for home health care services : A harmony search approach with genetic, saturation, inheritance, and immigrant schemes. *Computers & Industrial Engineering*, 115 :151–166, 2018.
- [155] M. Lin, K. Chin, X. Wang, and K. Tsui. The therapist assignment problem in home healthcare structures. *Expert Systems with Applications*, 62 :44 – 62, 2016.
- [156] M. Liu, D. Yang, Q. Su, and L. Xu. Bi-objective approaches for home health-care medical team planning and scheduling problem. *Computational and Applied Mathematics*, 37(4) :4443–4474, 2018.
- [157] R. Liu, Y. Tao, and X. Xie. An adaptive large neighborhood search heuristic for the vehicle routing problem with time windows and synchronized visits. *Computers and Operations Research*, 101 :250–262, 2019.
- [158] R. Liu, B. Yuan, and Z. Jiang. Mathematical model and exact algorithm for the home care worker scheduling and routing problem with lunch break requirements. *International Journal of Production Research*, 55(2) :558–575, 2017.
- [159] R. Liu, B. Yuan, and Z. Jiang. A branch-and-price algorithm for the home-caregiver scheduling and routing problem with stochastic travel and service times. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2018.
- [160] F. Luna, A. Cervantes, and P. Isasi. Large-scale home care crew scheduling with a parallel evolutionary algorithm. *8th International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing (3PGCIC), Compiègne, France*, pages 588–593, 2013.
- [161] F. Luna, A. Cervantes, P. Isasi, and J. F. Valenzuela-Valdés. Grid-enabled evolution strategies for large-scale home care crew scheduling. *Cluster Computing*, pages 1–13, 2017.
- [162] D. Manerba and R. Mansini. The nurse routing problem with workload constraints and incompatible services. *IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control (MIM), Troyes, France*, 49(12) :1192–1197, 2016.
- [163] D. Mankowska, F. Meisel, and C. Bierwirth. The home health care routing and scheduling problem with interdependent services. *Health Care Management Science*, 17(1) :15–30, 2014.
- [164] E. Marcon, S. Chaabane, Y. Sallez, T. Bonte, and D. Trentesaux. A multi-agent system based on reactive decision rules for solving the caregiver routing problem in home health care. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 74 :134–151, 2017.
- [165] R. E. Marsten and F. Shepardson. Exact solution of crew scheduling problems using the set partitioning model : Recent successful applications. *Networks*, 11(2) :165–177, 1981.

- [166] E. Martin, A. Cervantes, Y. Saez, and P. Isasi. IACS-HCSP : Improved ant colony optimization for large-scale home care scheduling problems. *Expert Systems with Applications*, 142 :112994, 2020.
- [167] C. Martinez, M. Di Mascolo, M.-L. Espinouse, and J. Radureau. Un outil pour la replanification long terme dans le secteur du service à domicile. *Conférence Francophone en Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers (GISEH)*, 2020.
- [168] C. Martinez, M. Espinouse, and M. D. Mascolo. Continuity of care in home services : a client-centered heuristic for the home health care routing and scheduling problem. In *2018 5th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, pages 1045–1050, 2018.
- [169] C. Martinez, M.-L. Espinouse, and M. Di Mascolo. Re-planning In Home Healthcare : A Decomposition Approach To Minimize Idle Times For Workers While Ensuring Continuity Of Care. 2019.
- [170] M. Masmoudi and R. Mellouli. MILP for synchronized-mTSPTW : Application to home healthcare scheduling. *International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), Metz, France*, pages 297–302, 2014.
- [171] G. Mavrotas. Effective implementation of the epsilon-constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 213(2) :455–465, 2009.
- [172] P. Maya Duque, M. Castro, K. Sörensen, and P. Goos. Home care service planning. The case of Landelijke Thuiszorg. *European Journal of Operational Research*, 243(1) :292–301, 2015.
- [173] M. Misir, K. Verbeeck, P. De Causmaecker, and G. Berghe. Hyper-heuristics with a dynamic heuristic set for the home care scheduling problem. *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Barcelona, Spain*, pages 1–8, 2010.
- [174] A. Mor and M. G. Speranza. Vehicle routing problems over time : a survey. *4OR*, 18(2) :129–149, 2020.
- [175] F. Mosquera, P. Smet, and G. Vanden Berghe. Flexible home care scheduling. *Omega*, 83 :80–95, 2019.
- [176] S. Moussavi, M. Mahdjoub, and O. Grunder. A matheuristic approach to the integration of worker assignment and vehicle routing problems : Application to home healthcare scheduling. *Expert Systems with Applications*, 125 :317–332, 2019.
- [177] M. Misir, P. Smet, and G. Berghe. An analysis of generalised heuristics for vehicle routing and personnel rostering problems. *Journal of the Operational Research Society*, 66(5) :858–870, 2015.
- [178] M. Mutingi and C. Mbohwa. Home healthcare worker scheduling : A group genetic algorithm approach. *Lecture Notes in Engineering and Computer Science*, 1 :721–725, 2013.
- [179] M. Mutingi and C. Mbohwa. Multi-objective homecare worker scheduling : A fuzzy simulated evolution algorithm approach. *IIE Transactions on Healthcare Systems Engineering*, 4(4) :209–216, 2014.

- [180] W. Naji, M. Masmoudi, and R. Mellouli. A robust-MILP for synchronized-mTSP/TW : Application to home health care under uncertainties. In *2017 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (Co-DIT)*, pages 1089–1094, 2017.
- [181] J. A. Nasir and C. Dang. Solving a More Flexible Home Health Care Scheduling and Routing Problem with Joint Patient and Nursing Staff Selection. *Sustainability*, 10(1) :0148, 2018.
- [182] J. A. Nasir and C. Dang. Quantitative thresholds based decision support approach for the home health care scheduling and routing problem. *Health Care Management Science*, 2019.
- [183] T. Nguyen and R. Montemanni. Integrated home health care optimization via genetic algorithms and mathematical programming. *World Congress on Evolutionary Computation (WCEC), Vancouver, Canada*, pages 553–561, 2016.
- [184] S. Nickel, M. Schröder, and J. Steeg. Mid-term and short-term planning support for home health care services. *European Journal of Operational Research*, 219(3) :574–587, 2012.
- [185] E. Nikzad, M. Bashiri, and B. Abbasi. A Matheuristic Algorithm for Stochastic Home Health Care Planning. *European Journal of Operational Research*, 2020.
- [186] N. Ouertani, I. Nouaouri, H. Ben-Romdhane, H. Allaoui, and S. Krichen. A Hypermutation Genetic Algorithm for the Dynamic Home Health-Care Routing Problem. In *2019 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*, pages 1–6, 2019.
- [187] L. Paquete and T. Stützle. A Two-Phase Local Search for the Biobjective Traveling Salesman Problem. In C. M. Fonseca, P. J. Fleming, E. Zitzler, L. Thiele, and K. Deb, editors, *Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, Lecture Notes in Computer Science, pages 479–493, Berlin, Heidelberg, 2003. Springer.
- [188] V. Pareto. Cours d'Économie politique, Œuvres complètes, t. I-II. *Genève, Droz*, 1896.
- [189] Y. B. Park and C. P. Koelling. An interactive computerized algorithm for multicriteria vehicle routing problems. *Computers & Industrial Engineering*, 16(4) :477–490, 1989.
- [190] Z. Peng. *Optimisation par essais particuliers pour la logistique urbaine*. PhD Thesis, Bourgogne Franche-Comté, 2019.
- [191] V. Pillac, M. Gendreau, C. Guéret, and A. L. Medaglia. A review of dynamic vehicle routing problems. *European Journal of Operational Research*, 225(1) :1–11, 2013.
- [192] D. Quintana, A. Cervantes, Y. Saez, and P. Isasi. Clustering technique for large-scale home care crew scheduling problems. *Applied Intelligence*, 47(2) :443–455, 2017.
- [193] M. R. Rao. A Note on the Multiple Traveling Salesmen Problem. *Operations Research*, 28(3-part-i) :628–632, 1980.

- [194] M. Rasmussen, T. Justesen, A. Dohn, and J. Larsen. The home care crew scheduling problem : Preference-based visit clustering and temporal dependencies. *European Journal of Operational Research*, 219(3) :598–610, 2012.
- [195] R. Redjem, S. Kharraja, X. Xie, and E. Marcon. Coordinated multi-criteria scheduling of caregivers in home health care services. *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), Trieste, Italy*, pages 519–524, 2011.
- [196] R. Redjem and E. Marcon. Operations management in the home care services : a heuristic for the caregivers’ routing problem. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 28(1-2) :280–303, 2016.
- [197] K.-D. Rest and P. Hirsch. Supporting Urban Home Health Care in Daily Business and Times of Disasters. *IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing - INCOM, Ottawa, Canada*, 48(3) :686 – 691, 2015.
- [198] K.-D. Rest and P. Hirsch. Daily scheduling of home health care services using time-dependent public transport. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, pages 1–31, 2016.
- [199] M. Restrepo, L.-M. Rousseau, and J. Vallée. Home healthcare integrated staffing and scheduling. *Omega (United Kingdom)*, 2019.
- [200] S. Riazi, P. Chehrazi, O. Wigström, K. Bengtsson, and B. Lennartson. A Gossip Algorithm for Home Healthcare Scheduling and Routing Problems. *19th IFAC World Congress, Cape Town, South Africa*, 47(3) :10754 – 10759, 2014.
- [201] S. Riazi, O. Wigström, K. Bengtsson, and B. Lennartson. Decomposition and distributed algorithms for home healthcare routing and scheduling problem. volume Part F134116, pages 1–7, 2018.
- [202] S. Riazi, O. Wigstrom, K. Bengtsson, and B. Lennartson. A Column Generation-Based Gossip Algorithm for Home Healthcare Routing and Scheduling Problems. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 16 :127–137, 2019.
- [203] R. Rizzi, G. Sacomoto, and M.-F. Sagot. Efficiently Listing Bounded Length s-Paths. In *Combinatorial Algorithms*, Lecture Notes in Computer Science, pages 318–329. Springer International Publishing, 2015.
- [204] A. E. Rizzoli, R. Montemanni, E. Lucibello, and L. M. Gambardella. Ant colony optimization for real-world vehicle routing problems. *Swarm Intelligence*, 1(2) :135–151, 2007.
- [205] C. Rodriguez, T. Garaix, X. Xie, and V. Augusto. Staff dimensioning in homecare services with uncertain demands. *International Journal of Production Research*, 53(24) :7396–7410, 2015.
- [206] K. Rogers. As the US population ages, the need for home health-care workers skyrockets. *CNBC*, 2018.
- [207] D. Russell, R. J. Rosati, P. Rosenfeld, and J. M. Marren. Continuity in Home Health Care : Is Consistency in Nursing Personnel Associated with Better Patient Outcomes? *Journal for Healthcare Quality*, 33(6) :33–39, 2011.

- [208] E. Sahin and A. Matta. A contribution to operations management-related issues and models for home care structures. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 18(4) :355–385, 2015.
- [209] E. Sahin, L.-A. Vidal, and E. Benzarti. A framework to evaluate the complexity of home care services. *Kybernetes*, 42(4) :569–592, 2013.
- [210] J. W. Saultz. Defining and Measuring Interpersonal Continuity of Care. *The Annals of Family Medicine*, 1(3) :134–143, 2003.
- [211] Y. Shao, J. Bard, and A. Jarrah. The therapist routing and scheduling problem. *IIE Transactions*, 44(10) :868–893, 2012.
- [212] Y. Shi, T. Boudouh, and O. Grunder. A Fuzzy Chance-constraint Programming Model for a Home Health Care Routing Problem with Fuzzy Demand : 369–376, 2017.
- [213] Y. Shi, T. Boudouh, and O. Grunder. A Home Health Care Routing Problem with Stochastic Travel and Service Time. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1) :13987–13992, 2017.
- [214] Y. Shi, T. Boudouh, and O. Grunder. A Hybrid Genetic Algorithm for a Home Health Care Routing Problem with Time Window and Fuzzy Demand. *Expert Systems with Applications*, 72 :160 – 176, 2017.
- [215] Y. Shi, T. Boudouh, and O. Grunder. A robust optimization for a home health care routing and scheduling problem with consideration of uncertain travel and service times. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 128 :52–95, 2019.
- [216] T. Sinthamrongruk, K. Dahal, O. Satiya, T. Vudhironarit, and P. Yodmongkol. Healthcare Staff Routing Problem using adaptive Genetic Algorithms with Adaptive Local Search and Immigrant Scheme. In *2017 International Conference on Digital Arts, Media and Technology (ICDAMT)*, pages 120–125, 2017.
- [217] T. Sinthamrongruk, K. Dahal, and J. Yanchinda. Heuristic and fuzzy scheduling synergy with knowledge acquisition of resource selection system development for home healthcare service. *International Journal of Agile Systems and Management*, 11(3) :247–269, 2018.
- [218] P. Siu, K. Choy, and H. Lam. An intelligent service planning system for effective home care service scheduling. 2018.
- [219] R. Smedby, G. Eklund, E. A. Eriksson, and B. Smedby. Measures of Continuity of Care : A Register-Based Correlation Study. *Medical Care*, 24(6) :511–518, 1986.
- [220] M. Solomon. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research*, 35(2) :254–265, 1987.
- [221] N. Szander, L. Ros-McDonnell, and M. V. de la Fuente. Algorithm for Efficient and Sustainable Home Health Care Delivery Scheduling. In J. Mula, R. Barbastefano, M. Díaz-Madroñero, and R. Poler, editors, *New Global Perspectives on Industrial Engineering and Management*, Lecture Notes in Management and Industrial Engineering, pages 315–323, Cham, 2019. Springer International Publishing.

- [222] N. Szander, L. Ros-McDonnell, M. Victoria de-la Fuente-Aragon, and R. Vodopivec. Sustainable Urban Homecare Delivery with Different Means of Transport. *Sustainability*, 10(2) :398, 2018.
- [223] N. Szander, L. B. Ros-McDonnell, and M. Bogataj. A Feasible Nurse Routing Plan for the Elderly : Quality and Spatial Trade-Offs. In *Closing the Gap Between Practice and Research in Industrial Engineering*, Lecture Notes in Management and Industrial Engineering, pages 201–209. Springer, Cham, 2018.
- [224] M. Tohidifard, R. Tavakkoli-Moghaddam, F. Navazi, and M. Partovi. A Multi-Depot Home Care Routing Problem with Time Windows and Fuzzy Demands Solving by Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11) :358–363, 2018.
- [225] P. Toth and D. Vigo. An Overview of Vehicle Routing Problems. In *The Vehicle Routing Problem*, Discrete Mathematics and Applications, pages 1–26. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2002.
- [226] S. Trabelsi, R. Larbi, and A.-H. Alouane. Linear integer programming for the home health care problem. *International Conference on Business Process Management (BPM), Clermont-Ferrand, France*, pages 143–151, 2011.
- [227] A. Trautsamwieser, M. Gronalt, and P. Hirsch. Securing home health care in times of natural disasters. *OR Spectrum*, 33(3) :787–813, 2011.
- [228] A. Trautsamwieser and P. Hirsch. Optimization of daily scheduling for home health care services. *Journal of Applied Operational Research*, 3(3) :124–136, 2011.
- [229] A. Trautsamwieser and P. Hirsch. A Branch-Price-and-Cut approach for solving the medium-term home health care planning problem. *Networks*, 64(3) :143–159, 2014.
- [230] J. Wirnitzer, I. Heckmann, A. Meyer, and S. Nickel. Patient-based nurse rostering in home care. *Operations Research for Health Care*, 8 :91 – 102, 2016.
- [231] L. Xiao, M. Dridi, and A. H. El Hassani. Mathematical Model for the Home Health Care Scheduling and Routing Problem with Flexible Lunch Break Requirements. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11) :334–339, 2018.
- [232] Z. Xie and C. Wang. A combinatorial auction for cost reduction in city home health care. *1st International Smart Cities Conference, (ISC2), Guadalajara, Mexico*, 2015.
- [233] Z. Xie and C. Wang. A periodic repair algorithm for dynamic scheduling in home health care using agent-based model. In *2017 IEEE 21st International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)*, pages 245–250, 2017.
- [234] S. Yalçındağ and A. Matta. A decomposition approach for the home health care problem with time windows. volume 210, pages 221–232, 2017.
- [235] S. Yalçındağ, P. Cappanera, M. Scutellà, E. Sahin, and A. Matta. Pattern-based decompositions for human resource planning in home health care services. *Computers & Operations Research*, 73 :12 – 26, 2016.

- [236] S. Yalçındag, A. Matta, E. Sahin, and J. G. Shanthikumar. The patient assignment problem in home health care : using a data-driven method to estimate the travel times of care givers. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 28(1-2, SI) :304–335, 2016.
- [237] X. Yang, T. Zhang, N. Mao, Q. Chen, L. Bai, and W. Chen. The Stochastic Home Health Care Routing Problem in Dense Communities with Multi-Appointment. In *2018 15th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM)*, pages 1–6, 2018.
- [238] S. Yanık, J. Kalcsics, S. Nickel, and B. Bozkaya. A multi-period multi-criteria districting problem applied to primary care scheme with gradual assignment. *International Transactions in Operational Research*, 26(5) :1676–1697, 2019.
- [239] B. Yuan and Z. Jiang. Disruption Management for the Real-Time Home Caregiver Scheduling and Routing Problem. *Sustainability*, 9(12) :2178, 2017.
- [240] B. Yuan, R. Liu, and Z. Jiang. Home health care crew scheduling and routing problem with stochastic service times. *IEEE International IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE), New Taipei, Taiwan*, pages 564–569, 2014.
- [241] B. Yuan, R. Liu, and 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*, 53(24) :7450–7464, 2015.
- [242] B. Yuan, R. Liu, and Z. Jiang. Daily scheduling of caregivers with stochastic times. *International Journal of Production Research*, 0(0) :1–17, 2018.
- [243] Y. Zhan and G. Wan. Vehicle routing and appointment scheduling with team assignment for home services. *Computers and Operations Research*, 100 :1–11, 2018.
- [244] Y. Zhan, Z. Wang, and G. Wan. Home service routing and appointment scheduling with stochastic service times. *European Journal of Operational Research*, 2020.
- [245] L. Zhang, P.-Y. Bouchet, E. Lamine, F. Fontanili, C. Bortolaso, M. Derras, and H. Pingaud. Home Health Care Daily Planning Considering the Satisfaction of all the Stakeholders. In *2019 International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM)*, pages 1–6, 2019.
- [246] T. Zhang, X. Yang, Q. Chen, L. Bai, and W. Chen. Modified ACO for home health care scheduling and routing problem in Chinese communities. In *2018 IEEE 15th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, pages 1–6, 2018.
- [247] E. Zitzler and L. Thiele. Multiobjective evolutionary algorithms : a comparative case study and the strength Pareto approach. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 3(4) :257–271, 1999.

Annexes A

Compléments bibliographiques

Cette annexe propose une synthèse de la recherche bibliographique exhaustive menée durant cette thèse sur les articles parus avant mai 2019 et traitant des problèmes de planification dans le domaine du soin et du service à domicile. Nous avons recensé et trié les problèmes étudiés, les critères optimisés, les contraintes prises en compte, les perturbations et aléas envisagés et les approches développées, que nous retranscrivons dans de nombreuses tables.

Les tables [A.1](#), [A.2](#) et [A.5](#) fournissent des éléments bibliométriques et quelques caractéristiques générales des problèmes étudiés.

Les tables [A.3](#), [A.4](#) et [A.6](#) listent les différentes méthodes mises en œuvre et les types d'instances utilisées pour les expérimentations.

Les tables [A.7](#), [A.8](#) et [A.9](#) font état des divers critères d'optimisation considérés.

Dans les tables [A.10](#), [A.11](#) et [A.12](#), nous recensons les contraintes liées aux visites ; dans les tables [A.13](#), [A.14](#) et [A.15](#), nous répertorions les contraintes liées aux patients ; dans les tables [A.16](#), [A.17](#) et [A.18](#), nous présentons les contraintes liées aux intervenants. Notons que certaines contraintes peuvent concourir à plusieurs catégories et que les limites sont parfois floues dans la classification proposée.

Enfin, la table [A.19](#) apporte des informations sur la prise en compte des perturbations et/ou incertitudes.

À la fin des tables, nous indiquons les proportions d'articles présentant les caractéristiques détaillées dans les colonnes. Comme nous avons séparé les articles de revue des articles de conférence, nous présentons les proportions globales à la fin des tables recensant les articles de conférence.

Year	First Author	Ref	Publication			Studied problem				
			Journal title	Affiliation	Application	Type of study		Horizon		Uncertainties
						Case study	Review	Short	Long	
1997	begur	[23]	Interfaces	USA	USA	✓	-	-	✓	-
2000	hindle	[129]	HSMR	UK	Ireland	✓	-	✓	-	-
2006	bertels	[30]	C&OR	Germany	-	-	-	✓	-	-
2006	eveborn	[94]	EJOR	Sweden	Sweden	✓	-	✓	-	-
2007	akjiratikarl	[7]	C&OR	Thailand	UK	✓	-	✓	-	-
2008	bredstrom	[36]	EJOR	Norway	-	-	-	✓	-	-
2009	chahed	[47]	HCMS	UK	-	-	-	-	✓	-
2009	hindle	[130]	HSMR	UK	UK	✓	-	✓	-	-
2011	ben bachouch	[26]	Supply Chain Forum	France	-	-	-	-	✓	-
2011	bennett	[27]	IIE Trans. on HCSE	USA	-	-	-	-	✓	✓
2011	trautsamwieser	[228]	JAOR	Austria	Austria	✓	-	✓	-	-
2011	trautsamwieser	[227]	OR spectrum	Austria	-	-	-	✓	-	-
2012	an	[14]	JORS	Korea	Korea	✓	-	-	✓	-
2012	nickel	[184]	EJOR	Germany	Denmark	✓	-	-	✓	✓
2012	rasmussen	[194]	EJOR	Denmark	Denmark	✓	-	✓	-	-
2012	shao	[211]	IIE Trans.	USA	-	-	-	-	✓	-
2013	allaoua	[8]	Elec. Notes in Disc Math.	France	-	-	-	✓	-	-
2013	bard	[18]	SEPS	USA	-	-	-	-	✓	-
2013	benzarti	[29]	DSS	France	-	-	-	✓	-	-
2013	cappanera	[37]	Elec. Notes in Disc Math.	Italy	Italy	✓	-	-	✓	-
2013	mutingi	[178]	Lect. Notes Eng. Comp.	South africa	-	-	-	✓	-	-
2013	sahin	[209]	Kybernetes	France	-	-	✓	-	-	-
2014	bard	[16]	J. Sched	USA	USA	✓	-	-	✓	-
2014	bard	[17]	IIE Trans.	USA	-	-	-	-	✓	-
2014	cappanera	[38]	Transportation Science	Italy	-	-	-	-	✓	✓
2014	carello	[42]	EJOR	Italy	-	-	-	-	✓	✓
2014	di gaspero	[71]	Lect. Notes Comp. Sci.	Italy	-	-	-	-	✓	-
2014	lanzarone	[146]	ORHC	Italy	Italy	✓	-	✓	-	✓
2014	mankowska	[163]	HCMS	Germany	-	-	-	✓	-	-
2014	mutingi	[179]	IIE Trans. on HCSE	South africa	-	-	-	✓	-	-
2014	trautsamwieser	[229]	Networks	Austria	-	-	-	-	✓	-
2015	bowers	[33]	HCMS	UK	-	-	-	-	✓	-
2015	fikar	[100]	J. Clean. Prod	Austria	Austria	✓	-	✓	-	-
2015	hiermann	[128]	Central EJOR	Austria	Austria	✓	-	✓	-	-
2015	issaoui	[134]	Elec. Notes in Disc Math.	Tunisia	-	-	-	✓	-	-
2015	lieder	[153]	ORHC	Germany	Netherlands	✓	-	✓	-	-
2015	maya duque	[172]	EJOR	Belgium	Belgium	✓	-	-	✓	-
2015	misir	[177]	JORS	Belgium	-	-	-	✓	-	-
2015	rodriguez	[205]	IJPR	France	France	✓	-	-	✓	✓
2015	sahin	[208]	Int. J. Logist-Res. App.	France	-	-	✓	-	-	-
2015	yuan	[241]	IJPR	China	-	-	-	✓	-	✓
2016	ait haddadene	[6]	ESWA	France	-	-	-	✓	-	-
2016	braekers	[34]	EJOR	Belgium	-	-	-	✓	-	-
2016	fikar	[103]	European J. Indus. Eng.	Austria	-	-	-	-	-	✓
2016	heching	[125]	Lect. Notes Comp. Sci.	USA	USA	✓	-	-	✓	✓
2016	lin	[155]	ESWA	Hong Kong	Hong Kong	✓	-	-	✓	-
2016	redjem	[196]	FSM	France	-	-	-	✓	-	-
2016	rest	[198]	FSM	Austria	Austria	✓	-	✓	-	-
2016	wirnitzer	[230]	ORHC	Germany	Germany	✓	-	-	✓	-
2016	yalcindag	[236]	FSM	Italy	Italy	✓	-	✓	-	✓
2016	yalcindag	[235]	C&OR	Turkey	Italy	✓	-	✓	-	-

TABLE A.1 – Considered problem - Journal papers - Part 1 of 2

Year	First Author	Ref	Publication			Studied problem				
			Journal title	Affiliation	Application	Type of study		Horizon		Uncertainties
						Case study	Review	Short	Long	
2017	cappanera	[40]	Omega	Italy	-	-	-	✓	✓	
2017	cisse	[52]	ORHC	France	-	-	✓	-	-	
2017	du	[79]	J. Comb Optim	China	China	✓	-	-	✓	
2017	du	[78]	Sustainability	China	China	✓	-	-	✓	
2017	erdem	[87]	S. Afr. J. Ind. Eng	Turkey	-	-	-	✓	-	
2017	fikar	[101]	C&OR	Austria	-	-	-	✓	-	
2017	frifta	[107]	Elec. Notes in Disc Math.	France	-	-	-	✓	-	
2017	guericke	[121]	OR Spectrum	Germany	-	-	-	-	✓	
2017	liu	[158]	IJPR	China	China	✓	-	-	✓	
2017	luna	[161]	Cluster comput.	Spain	Spain	✓	-	-	✓	
2017	marcon	[164]	Simul. Model. Pract. Th.	France	France	✓	-	-	✓	
2017	quintana	[192]	Appl. Intell.	Spain	Spain	✓	-	-	✓	
2017	shi	[214]	ESWA	France	-	-	-	✓	-	
2017	yuan	[239]	Sustainability	China	China	✓	-	-	✓	
2018	carello	[44]	ORHC	Italy	Italy	✓	-	-	✓	
2018	decerle	[62]	ORHC	France	France	✓	-	-	✓	
2018	demirbilek	[68]	HCMS	UK	-	-	-	✓	-	
2018	fathollahi-fard	[97]	J. Clean. Prod	Iran	-	-	-	✓	-	
2018	fathollahi-fard	[98]	IJE	Iran	-	-	-	✓	-	
2018	fikar	[102]	FSM	Austria	Austria	✓	-	-	✓	
2018	hirsch	[131]	Die Bodenkultur J.L.M.F.E.	Austria	-	-	-	✓	-	
2018	lin	[154]	C&IE	Taiwan	-	-	-	-	✓	
2018	liu	[156]	Comp. Appl. Math.	China	-	-	-	-	✓	
2018	mosquera	[175]	Omega	Belgium	Belgium	✓	-	-	✓	
2018	nasir	[181]	Sustainability	China	-	-	-	✓	-	
2018	sinthamrongruk	[217]	Int J. Agile Systems and Management	UK	-	-	-	✓	-	
2018	szander	[223]	Lect. Notes Manag. Ind. Eng	Slovenia	Hungary	✓	-	-	✓	
2018	szander	[222]	Sustainability	Slovenia	-	✓	-	-	✓	
2018	yuan	[242]	IJPR	China	-	-	-	✓	-	
2018	zhan	[243]	C&OR	China	-	-	-	✓	-	
2019	becker	[22]	Lect. Notes Comp. Sci.	Germany	-	-	-	✓	-	
2019	chaieb	[48]	HCMS	Saudi Arabia	New Zealand	✓	-	-	✓	
2019	decerle	[63]	Swarm and Evolutionary Computation	France	-	-	-	✓	-	
2019	decerle	[64]	Swarm and Evolutionary Computation	France	-	-	-	✓	-	
2019	dekhici	[67]	Canadian J. of Elec. And Computer Eng.	Algeria	-	-	-	✓	-	
2019	demirbilek	[69]	FSM	UK	-	-	-	-	✓	
2019	fathollahi-fard	[95]	Neural Computing and Applications	Iran	-	-	-	✓	-	
2019	gomes	[117]	EJOR	Portugal	Portugal	✓	-	-	✓	
2019	grenouilleau	[119]	EJOR	Canada	-	-	-	-	✓	
2019	heching	[126]	Transportation Science	USA	-	-	-	-	✓	
2019	liu	[157]	C&OR	China	-	-	-	✓	-	
2019	liu	[159]	FSM	China	-	-	-	-	✓	
2019	moussavi	[176]	ESWA	France	-	-	-	-	✓	
2019	nasir	[182]	HCMS	Hong Kong	-	-	-	✓	-	
2019	restrepo	[199]	Omega	Canada	-	-	-	-	✓	
2019	riazi	[202]	IEEE TASE	Sweden	-	-	-	✓	-	
Sum						38	6	47	43	27
Percentage (%)						39.18	6.25	51.65	47.25	29.67

TABLE A.2 – Considered problem - Journal papers - Part 2 of 2

Year	First Author	Ref	Modeling and Resolution approach	Instances	
				Benchmark	Instances size (max)
1997	begur	[23]	Heuristic	-	7 SM - 200 V
2000	hindle	[129]	Heuristic	-	-
2006	bertels	[30]	CP-TS and CP-SA and CP-LP	-	50 SM - 200 Pa - 600 V
2006	eveborn	[94]	Repeated matching algorithm	-	123 Pa - 20 SM
2007	akjiratikarl	[7]	MILP - PSO	-	100 Pa -12 SM
2008	bredstrom	[36]	MILP - B&P	-	90 Pa -16 SM
2009	chahed	[47]	MILP	-	-
2009	hindle	[130]	Heuristic	-	125 Pa - 23 districts
2011	ben bachouch	[26]	MILP	-	7 SM - 20 Pa
2011	bennett	[27]	Rolling horizon planning approach	-	-
2011	trautsamwieser	[228]	MILP - VNS	-	512 V - 420 Pa - 75 SM
2011	trautsamwieser	[227]	MILP - VNS - LS	-	75 SM - 512 V
2012	an	[14]	2 phase heuristic approach - mip	-	20 Pa -1 SM
2012	nickel	[184]	ALNS - CP	-	361 Pa - 12 SM
2012	rasmussen	[194]	MILP - B&P	[36]	15 V -150 Pa
2012	shao	[211]	GRASP - ALNS	-	-
2013	allaoua	[8]	MILP - Matheuristic	[141]	30 Pa - 9 SM
2013	bard	[18]	MILP	-	20 SM - 280 Pa
2013	benzarti	[29]	MILP	-	-
2013	cappanera	[37]	MILP	-	163 Pa
2013	mutingi	[178]	MILP - Genetic algorithm	-	-
2014	bard	[16]	MILP - GRASP	-	45 Pa
2014	bard	[17]	MILP - DA - B&P - B&C	-	-
2014	cappanera	[38]	-	[184]	11 SM- 162 V
2014	carello	[42]	CC	[146]	-
2014	di gaspero	[71]	CP - adaptive LNS	-	32 SM - 40 V/day
2014	lanzarone	[146]	-	-	-
2014	mankowska	[163]	AVNS - MILP	-	300 Pa - 40 SM
2014	mutingi	[179]	MILP - FSE	[226]	-
2014	trautsamwieser	[229]	B&P&C - VNS - MILP	-	45 Pa - 9 SM - 203 V
2015	bowers	[33]	C&W	-	6 SM - 168 V
2015	fikar	[100]	2 stage Matheuristics	-	125 V
2015	hiermann	[128]	two stage approach : MILP- CP (MA, SAHH, SS, VNS)	-	518 SM - 717 V
2015	issaoui	[134]	3 phase metaheuristic based on VND and LPT - MILP	[228]	30 Pa - 4 SM
2015	lieder	[153]	DP - mip	-	5 SM - 42 V
2015	maya duque	[172]	2 stage approach (set partitioning) - MILP	-	109 Pa- 21 SM - 562 V
2015	misir	[177]	-	-	-
2015	rodriguez	[205]	MILP - 2 stage approach	-	-
2015	yuan	[241]	MILP - CG- B-P	[220]	-
2016	ait haddadene	[6]	MILP - GRASP-ILS	[36]	73 Pa - 16 SM
2016	braekers	[34]	MILP - epsilon-const - ALNS	[128]	171 Pa - 89 SM - 300 V
2016	fikar	[103]	Matheuristic	[100]	125V
2016	heching	[125]	MIP - CP - LBBD	-	60 Pa - 18 SM
2016	lin	[155]	MILP	-	560 Pa - 12 SM - 643 V
2016	redjem	[196]	Heuristics	-	60 Pa - 30 SM
2016	rest	[198]	MILP - TS	-	127 Pa - 46 SM - 202 V
2016	wirnitzer	[230]	MIP Approach	-	143 Pa - 37 SM - 1114 V/week
2016	yalcindag	[236]	MILP - 2 stage approach	-	-
2016	yalcindag	[235]	Two-phase approach	-	300 Pa - 16 SM - 557 V

TABLE A.3 – Methods and experimentations - Journal papers - Part 1 of 2

Year	First Author	Ref	Modeling and Resolution approach	Instances	
				Benchmark	Instances size (max)
2017	cappanera	[40]	CC	-	3 SM - 60 Pa
2017	du	[79]	IMA	-	50 Pa
2017	du	[78]	GA-LS	-	-
2017	erdem	[87]	MILP-VNS	[128]	-
2017	frifita	[107]	G-VNS	[36]	16 SM - 80 V
2017	guericke	[121]	MILP - ALNS	[229, 37, 38]	-
2017	liu	[158]	MILP - B&P	[220]	100 Pa - 12 SM
2017	luna	[161]	EA	-	374 SM
2017	marcon	[164]	Sim - MaS	-	130 SM - 300 Pa
2017	quintana	[192]	Heuristics - CM	-	9365 Pa
2017	shi	[214]	MILP Genetic	[220]	-
2017	yuan	[239]	TS	-	9 SM - 50 Pa
2018	carello	[44]	CC	-	-
2018	decerle	[62]	MA	[36]	80V
2018	demirbilek	[68]	SBA	-	-
2018	fathollahi-fard	[97]	MILP - Heuristics - memetic Metaheuristics - epsilon constraint	-	20 SM - 200 Pa - 8 types of vehicles
2018	fikar	[102]	event-driven biased-randomised Heuristic and Matheuristic	[100, 220]	100 Pa - 125 V
2018	lin	[154]	Matheuristic	-	38 SM - 95 Pa - 361 V
2018	liu	[156]	epsilon constraint method, heuristics	-	18 SM - 65 Pa
2018	mosquera	[175]	IP-LS	-	28 SM - 127 Pa
2018	nasir	[181]	VNS	-	91 SM - 260
2018	szander	[223]	MILP	-	9 SM - 56 Pa
2018	szander	[222]	Heuristic	-	11 SM - 73 Pa
2018	yuan	[242]	B&P	-	9 SM - 50 Pa
2018	zhan	[243]	scenario-based MIP - heuristic based on TS	-	40 Pa
2018	fathollahi-fard	[98]	MILP-Lagrangian relaxation-based algorithm	-	20 SM - 200 Pa - 8 types of vehicles
2018	sinthamrongruk	[217]	Fuzzy logic - heuristic	-	8SM - 40 V
2019	chaieb	[48]	MILP - k-means - hungarian algorithm - TS	[194]	15 SM - 154 V
2019	decerle	[63]	MILP-MA- ACO	[36]	20 SM, 80V
2019	decerle	[64]	MILP- MAMO- trade off analysis	[36]	20 SM, 80V
2019	dekhici	[67]	Firefly algorithm	-	4 SM- 20 V
2019	demirbilek	[69]	SBA	-	-
2019	fathollahi-fard	[95]	Lagrangian relaxation-based algorithm - Heuristics	-	20 SM - 200 Pa - 8 types of vehicles
2019	gomes	[117]	MILP	-	9 SM - 190 Pa
2019	grenouilleau	[119]	Heuristic - LNS	-	20 SM - 150 Pa - 430 V
2019	heching	[126]	LBBD - MILP- CP	[194]	60 Pa - 270 V
2019	liu	[157]	ANS	[220, 112]	200 Pa
2019	liu	[159]	MILP - B&P	-	9 SM - 50 Pa
2019	moussavi	[176]	Matheuristic	-	10 SM - 30 Pa
2019	nasir	[182]	MILP-VNS- ROC Curves	-	120 SM-300 Pa
2019	restrepo	[199]	Context-free grammar, Stochastic programming	-	500V
2019	riazi	[202]	gossip algorithm, CG, Dantzig Wolf Decomposition, MILP	[220, 112]	200 Pa
Sum				21	
Percentage(%)				23.08	

V : Visits ; **SM** : Staff member ; **Pa** : Patients ;

ALNS : Adaptive Large Neighborhood Search ; **ANS** : Adaptive Neighborhood Search ; **BB** : Branch & Bound ; **BD** : Bender Decomposition ; **BP** : Branch & Price ; **BPC** : Branch & Price & Cut ; **CC** : Cardinality Constraints ; **CG** : Column Generation ; **CP** : Constraints Programming ; **CW** : Clarke & Wright ; **DA** : Decomposition Approach ; **DP** : Dynamic Programming ; ϵ **C** : ϵ -Constraints ; **2S** : 2 Stage ; **FSE** : Fuzzy Simulated Evolutionary ; **GA** : Genetic Algorithm ; **GRASP** : Greedy Randomized Adaptive Search Procedure ; **ILS** : Iterated Local Search ; **LNS** : Large Neighborhood Search ; **LBBD** : Logic Based Benders Decomposition ; **LS** : Local Search ; **MA** : Memetic Algorithm ; **MAMO** : Memetic Algorithm for Evolutionary Multiobjective Optimization ; **MaS** : Multi-agent System ; **MILP** : Mixed Integer Linear Programming ; **PSO** : Particle Swarm Optimization ; **ROC** : Receiver Operating Characteristic **RHP** : Rolling Horizon Planning ; **RMA** : Repeated Matching Algorithm ; **SA** : Simulated Annealing ; **Sim** : Simulation ; **SS** : Scatter Search ; **TS** : Tabu Search ; **VND** : Variable Neighborhood Descent ; **VNS** : Variable Neighborhood Search ;

TABLE A.4 – Methods and experimentations - Journal papers - Part 2 of 2

ANNEXES A. COMPLÉMENTS BIBLIOGRAPHIQUES

Year	First author	Ref	Conf. name	Affiliation	Application	Type of study		Studied problem		Uncertainties
						Case study	Review	Short	Long	
2006	bozsani	[32]	ICSSSM	Italy	Italy	✓	-	-	✓	-
2008	elbenani	[82]	IEEM	Morocco	Canada	✓	-	-	✓	-
2009	kerqosten	[140]	MISTA	France	-	-	✓	-	-	-
2010	mistr	[173]	CEC	Belgium	-	-	-	✓	-	-
2011	roclém	[195]	CASE	France	-	-	-	✓	-	-
2012	baslir	[19]	MOSIM	France	-	-	-	✓	-	-
2012	carrah	[45]	ICLP	France	Italy	✓	-	-	-	-
2012	ganst	[108]	Op. Res. Proc.	Denmark	Denmark	✓	-	✓	-	-
2012	gutierrez	[124]	IEOM	Colombia	-	✓	-	-	-	-
2013	errahout	[96]	IESM	France	-	-	-	✓	-	-
2013	geyraud	[111]	ProcediaTech.	France	-	-	-	✓	-	-
2013	jernai	[136]	ICMSAO	Saudi Arabia	-	-	-	✓	-	-
2013	huma	[160]	3FGCIC	Spain	Spain	✓	-	-	✓	-
2013	nuttingi	[178]	IEEM	South Africa	-	-	-	✓	-	-
2014	cappanera	[41]	HCSE	Italy	-	-	-	✓	-	✓
2014	di mascolo	[73]	HCSE	France	France	✓	-	-	✓	-
2014	espinoise	[92]	CIE	France	France	✓	-	-	-	-
2014	kerqosten	[141]	HCSE	France	-	-	-	✓	-	-
2014	habdane	[143]	ICORES	France	-	-	-	✓	-	-
2014	masmondi	[170]	CODIT	France	-	-	-	✓	-	-
2014	razi	[200]	IEAC	Sweden	-	-	-	✓	-	-
2014	yanan	[240]	CASE	China	-	-	-	✓	-	✓
2015	alane	[4]	IESM	France	-	-	-	✓	-	-
2015	carrafi	[46]	AI Comm.	Italy	Italy	✓	-	-	✓	-
2015	en-nahl	[86]	IEAC	France	-	-	-	✓	-	-
2015	issoufi	[135]	ISDA	France	UK	-	-	✓	-	-
2015	bessunkhang	[144]	ICORES	UK	Austria	✓	-	-	-	-
2015	rest	[197]	IEAC	Austria	-	-	-	✓	-	✓
2015	xie	[232]	ISC2	Canada	-	-	-	✓	-	-
2016	ati haddadene	[5]	IEAC	France	-	-	-	✓	-	-
2016	deceite	[60]	IEAC	France	-	-	-	✓	-	-
2016	en-nahl	[85]	IEAC	France	-	-	-	✓	-	-
2016	manerba	[162]	IEAC	France	-	-	-	✓	-	-
2016	nguyen	[183]	WCEC	Italy	-	-	-	✓	-	-
2017	alves	[112]	WCEC	Switzerland	Switzerland	✓	-	-	✓	-
2017	baumann	[20]	IEEM	Portugal	Portugal	✓	-	-	-	-
2017	carlo	[43]	HCSE	Switzerland	Switzerland	✓	-	-	-	-
2017	dien	[49]	ICAPS	Italy	-	-	-	✓	-	✓
2017	deceite	[65]	CODIT	Singapore	USA	✓	-	-	✓	-
2017	di mascolo	[75]	HCSE	France	France	✓	-	-	✓	-
2017	di mascolo	[74]	IEAC	France	-	-	-	✓	-	✓
2017	el hajri	[81]	IEAC	France	-	-	-	✓	-	-
2017	emiliano	[84]	MESIC	France	France	✓	-	-	✓	-
2017	gumawan	[122]	MISTA	Portugal	Portugal/Brazil	✓	-	-	-	-
2017	habrichi	[145]	HCSE	Singapore	-	-	-	✓	-	✓
2017	maji	[180]	CODIT	Canada	-	-	-	✓	-	✓

TABLE A.5 – Considered problem - Conference papers

Year	First author	Ref	Conf. name	Affiliation	Application	Type of study		Studied problem		Uncertainties
						Case study	Review	Short	Long	
2017	shih	[212]	ICORES	France	-	-	-	✓	-	✓
2017	siti	[213]	IEAC	France	-	-	-	✓	-	✓
2017	sintthamrongruk	[216]	ICDAMT	UK	-	-	-	✓	-	-
2017	xie	[233]	CSCWD	Canada	-	-	-	✓	-	✓
2017	yalcindag	[234]	HCSE	Turkey	-	-	-	✓	-	-
2018	alves	[13]	BRONIA	Portugal	Portugal	✓	-	-	✓	-
2018	alves	[111]	PAAMS	Portugal	Portugal	✓	-	-	✓	-
2018	deceite	[66]	IEAC	France	-	-	-	✓	-	✓
2018	di mascolo	[72]	IEAC	France	-	-	-	✓	-	-
2018	eliset	[83]	APDIO	Portugal	Portugal	✓	-	-	-	-
2018	feng	[99]	ICSSSM	China	-	-	-	✓	-	-
2018	ganatx	[106]	IEAC	France	-	-	-	✓	-	-
2018	martinez	[168]	CODIT	France	-	-	-	✓	-	-
2018	razi	[201]	ETFA	Sweden	-	-	-	✓	-	-
2018	situ	[218]	PCMEET	Hong Kong	Hong Kong	✓	-	-	✓	-
2018	tohidifard	[224]	IEAC	Iran	-	-	-	✓	-	✓
2018	Xiao	[231]	IEAC	France	France	✓	-	-	✓	-
2018	yang	[237]	ICSSSM	China	-	-	-	✓	-	✓
2018	zhang	[246]	ICNSC	China	-	-	-	✓	-	✓
2019	alves	[110]	ICORES	Portugal	Portugal	✓	-	-	✓	-
2019	alves	[9]	ICORES	Portugal	Portugal	✓	-	-	✓	-
2019	espadinha	[91]	APDIO	Portugal	Portugal	✓	-	-	✓	-
Sum						26	6	41	22	16
Percentage (%)						37.68	8.70	65.08	35.48	25.40
Global Sum						64	12	88	65	43
Global Percentage (%)						38.55	7.27	57.14	42.48	27.92

Year	First author	Ref	Modeling and Resolution approach	Benchmark	Instances size
2006	borsani	[82]	MILP	-	382 Pa - 25 SM
2008	elbenani	[82]	MILP - TS	-	40 V
2009	kerogien	[140]	MILP - Heuristics	-	14 Pa - 4 SM
2010	misir	[173]	MILP	-	-
2011	redjem	[195]	-	-	-
2012	cattafi	[45]	-	-	-
2012	gamst	[108]	MILP - BP	-	30 Pa - 4 SM
2013	errahout	[90]	MILP	-	-
2013	gayraud	[111]	MILP	-	10654 V - 1375 Pa
2013	jemal	[136]	MILP - Tabu search	-	6 SM - 80 Pa
2013	hna	[160]	MILP	-	-
2014	cappanera	[41]	Sim - MILP	-	-
2014	di mascolo	[73]	MILP	-	64 V - 30 SM - 80 Pa
2014	espinouse	[92]	MILP	-	250 Pa - 20 SM - 5 labo
2014	kerogien	[141]	MILP - TS-VNS	[36]	16 SM - 45 Pa
2014	labadie	[143]	MILP - ILS	-	88 V - 15 SM - 50 Pa
2014	masmondi	[170]	MILP - 2 stage MILP Heuristic	-	30 V - 5 SM
2014	riazi	[200]	MILP - Gossip algorithm and Relaxation	-	-
2014	yuan	[240]	MILP - B&P&C - CG	[220]	15 Pa - 5 SM
2015	aiane	[4]	MILP	-	-
2015	cattafi	[46]	CP - LNS with restart	-	40 Pa - 8 SM
2015	en-nabli	[86]	MILP	-	1011 SM - 1726 V
2015	laesnklang	[144]	MILP - DA	-	46 SM - 202 V
2015	rest	[197]	TS based metaheuristic	-	-
2015	xie	[232]	MILP	-	-
2016	ait baddadene	[5]	NSGAI	[36]	16 SM - 73 Pa
2016	decele	[60]	MIP - Two phase Mathheuristic	-	60 V
2016	en-nabli	[85]	MILP - RVND-ILS	-	20 Pa - 4 SM
2016	manerba	[162]	MILP - B&P	[36]	12 SM - 15 Pa - 20 V
2016	nguyen	[183]	MILP - GA	-	-
2017	alves	[12]	GA-PSO	-	12SM-31Pa
2017	baumann	[20]	MILP	-	-
2017	carello	[43]	IAA	-	98 Pa
2017	chen	[49]	MILP-SAA-LR	-	199 SM - 2062 Pa
2017	decele	[65]	MA	[36]	80 Pa
2017	di mascolo	[75]	2OPT-Heuristic	-	10 SM
2017	el hajri	[81]	MILP	-	4 SM-14 Pa
2017	gunawan	[122]	ILS	-	4 SM - 228 Pa
2017	fauricchi	[145]	DA	-	20 SM - 300 Pa
2017	nejj	[180]	MILP	-	15 SM

Year	First author	Ref	Modeling and Resolution approach	Benchmark	Instances size
2017	shi	[212]	FCCP- HGA	A-series	-
2017	shihamrongruk	[213]	SPR-HGA	-	25 Pa
2017	xie	[233]	GA-ALS	-	-
2017	yalcindag	[234]	Sim-Repair Method	-	2 SM- 15 Pa
2018	alves	[13]	MILP- DA	-	78V
2018	alves	[11]	MaS - GA	-	5 SM - 15 Pa
2018	decele	[66]	MILP - multidimensional LS	[36]	80 V
2018	di mascolo	[61]	MILP - Mathheuristic	[220]	50 Pa
2018	eliseu	[72]	MILP	-	18 SM - 30 Pa
2018	eliseu	[83]	Greedy heuristic, biased (randomization process, local search, MIRHA approach)	-	6 SM - 23 Pa
2018	feng	[99]	MILP	-	-
2018	garaix	[109]	MILP	-	177 SM - 1077 V
2018	martinez	[168]	MILP-Heuristic	-	35 SM - 200 Pa - 742 V
2018	riazi	[201]	MILP-CG	-	10 SM - 100 Pa
2018	siu	[218]	MILP, GA	-	16 SM - 90 Pa
2018	tohidifard	[224]	MILP- GA-PSO	-	25 SM - 175 Pa
2018	Xiao	[231]	MILP	-	15 SM- 23 V
2018	yang	[237]	Best-Worst ACO	-	7 SM - 30 Pa - 60V
2018	zhang	[246]	mip, modified ACO	-	8 SM-105 V
2019	alves	[10]	Tchebycheff method - Genetic algorithm	-	5 SM - 22 Pa
2019	alves	[9]	MILP	-	5SM - 15 Pa
2019	espaadinha	[91]	MILP	-	-
Sum				8	
Percentage (%)				12.70	

Global Sum	Global Percentage (%)
	29
	18.83

V : Visits ; SM : Staff member ; Pa : Patients ;
2S : 2 Stage ; ACO : Ant Colony Optimisation ; BP : Branch & Price ; BPC : Branch & Price & Cut; ; CG : Column Generation ; CP : Constraints Programming ; DA : Decomposition Approach ; FCCP : Fuzzy Chance Constraint Programming ; (H)GA : (Hybrid) Genetic Algorithm ; IAA : Implementor Adversarial Approach ; ILS : Iterated Local Search ; LNS : Large Neighborhood Search ; LR : Lagrangian Relaxation ; MILP : Mixed Integer Linear Programming ; NSGAI : Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm 2 ; PEA : Parallel Evolutionary Algorithm ; PSO : Particle Swarm Optimisation ; RVND : Random Variable Neighborhood Descent ; SAA : Sample Average Approximation ; SPR : Stochastic Programming model with Recourse ; Sim : Simulation ; TS : Tabu Search ; VNS : Variable Neighborhood Search

TABLE A.6 – Methods and experimentations - Conference papers

Year	First Author	Ref	Costs				Preference				Other	Other			
			Route	Staff members (SM)			Patients (Pa)			Staff members (SM)					
			Min travel time/cost/distance	Min total visit duration/ working time	Min waiting time	Min overtime/overcosts	Others	Max preferred time slot	Max patient preferences	Max continuity of care			Min uncovered visitsMax nb visits	Min reassignment	Min TW violation
1997	begur	[23]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2000	hindle	[129]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2006	bertels	[30]	✓	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-
2006	eveborn	[94]	✓	-	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	-
2007	akjiratikarl	[7]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-
2008	bredstrom	[36]	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-
2009	chahed	[47]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2009	hindle	[130]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2011	ben bachouch	[26]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2011	bennett	[27]	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-
2011	trautsamwieser	[228]	✓	-	✓	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-
2011	trautsamwieser	[227]	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-
2012	an	[14]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2012	nickel	[184]	✓	-	-	✓	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-
2012	rasmussen	[194]	✓	-	-	-	-	-	✓	-	✓	-	-	-	-
2012	shao	[211]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-
2013	allaoua	[8]	-	-	-	-	-	SM1	-	-	-	-	-	-	-
2013	bard	[18]	✓	-	-	✓	-	SM2	-	-	-	-	-	-	-
2013	benzarti	[29]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2013	cappanera	[37]	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-
2013	mutingi	[178]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-
2014	bard	[16]	✓	-	-	✓	-	SM2	-	-	-	-	-	-	-
2014	bard	[17]	✓	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2014	cappanera	[38]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-
2014	carello	[42]	-	-	-	✓	-	-	-	✓	-	-	-	-	-
2014	di gaspero	[71]	✓	-	-	✓	-	-	-	✓	-	-	-	-	-
2014	lanzarone	[146]	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	-
2014	mankowska	[163]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	Pa1	-
2014	mutingi	[179]	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	✓	-	O4
2014	trautsamwieser	[229]	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	bowers	[33]	✓	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-
2015	fikar	[100]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	hiermann	[128]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-
2015	issaoui	[134]	✓	-	-	-	-	-	✓	-	✓	-	-	-	-
2015	lieder	[153]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-
2015	maya duque	[172]	✓	-	-	-	-	-	✓	✓	-	-	-	-	-
2015	misir	[177]	✓	-	-	✓	-	-	-	-	-	✓	✓	-	-
2015	rodriguez	[205]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-
2015	yuan	[241]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	ait haddadene	[6]	✓	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-
2016	braekers	[34]	✓	-	-	✓	-	-	✓	✓	-	-	-	-	-
2016	fikar	[103]	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	heching	[125]	✓	-	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-
2016	lin	[155]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-
2016	redjem	[196]	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	rest	[198]	✓	-	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	SM3	-
2016	wimitzer	[230]	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-
2016	yalcindag	[236]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	yalcindag	[235]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-

TABLE A.7 – Objective function -Journal papers - Part 1 of 2

Year	First author	Ref	Visits								
			Characteristics(Ch)		Schedule (Sc)		Dependency (De)		Others		
			Hard time window (TW)	Qualification required	Multiple visits per period	Visit frequency	Visit patterns	Disjunction		Synchronization	Precedence
1997	begur	[23]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-
2000	hindle	[129]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2006	bertels	[30]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-
2006	eveborn	[94]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-
2007	akjiratikarl	[7]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
2008	bredstrom	[36]	✓	-	-	-	-	✓	-	-	-
2009	chahed	[47]	✓	-	-	-	-	-	-	-	TW1
2009	hindle	[130]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2011	ben bachouch	[26]	✓	✓	-	-	-	✓	-	-	-
2011	bennett	[27]	✓	-	-	✓	✓	-	-	-	-
2011	trautsamwieser	[228]	✓	✓	-	✓	-	-	-	-	-
2011	trautsamwieser	[227]	✓	✓	-	✓	-	-	-	-	-
2012	an	[14]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
2012	nickel	[184]	✓	✓	-	✓	✓	-	-	-	-
2012	rasmussen	[194]	✓	-	-	-	-	-	Min	-	-
2012	shao	[211]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	Ch1
2013	allaoua	[8]	✓	✓	-	✓	✓	-	-	-	-
2013	bard	[18]	-	✓	-	-	-	-	-	-	-
2013	benzarti	[29]	-	-	-	✓	-	-	-	-	-
2013	cappanera	[37]	-	✓	-	✓	✓	-	-	-	-
2013	mutingi	[178]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2014	bard	[16]	-	✓	-	-	-	-	-	-	-
2014	bard	[17]	✓	-	-	-	✓	-	Min	-	-
2014	cappanera	[38]	✓	✓	-	-	✓	-	✓	-	-
2014	carello	[42]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2014	di gaspero	[71]	✓	✓	-	-	✓	-	-	-	-
2014	lanzarone	[146]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2014	mankowska	[163]	✓	✓	-	-	-	✓	Min	-	-
2014	mutingi	[179]	✓	✓	-	-	-	✓	-	-	-
2014	trautsamwieser	[229]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-
2015	bowers	[33]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	fikar	[100]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-
2015	hiermann	[128]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-
2015	issaoui	[134]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-
2015	lieder	[153]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-
2015	maya duque	[172]	-	-	-	✓	✓	-	-	-	Sc1
2015	misir	[177]	-	✓	-	-	-	-	-	-	-
2015	rodriguez	[205]	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	yuan	[241]	-	✓	-	-	-	-	-	-	-
2016	ait haddadene	[6]	✓	✓	-	-	-	✓	Exact	-	-
2016	braekers	[34]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-
2016	fikar	[103]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-
2016	heching	[125]	✓	-	-	✓	-	-	-	-	-
2016	lin	[155]	-	✓	-	-	-	✓	-	-	-
2016	redjem	[196]	✓	-	✓	-	-	✓	Min	-	-
2016	rest	[198]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-
2016	wirmitzer	[230]	-	✓	-	✓	-	-	-	-	-
2016	yalcindag	[236]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-
2016	yalcindag	[235]	-	✓	-	✓	✓	-	-	-	-

TABLE A.10 – Constraints related to visits - Journal papers - Part 1 of 2

Year	First author	Ref	Visits								Others	
			Characteristics(Ch)		Schedule (Sc)			Dependency (De)				
			Hard time window (TW)	Qualification required	Multiple visits per period	Visit frequency	Visit patterns	Disjunction	Synchronization	Precedence		
2017	cappanera	[40]	-	✓	-	-	✓	-	-	-	-	-
2017	du	[79]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	du	[78]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	erdem	[87]	✓	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-
2017	frifita	[107]	✓	-	✓	-	-	-	-	✓	-	-
2017	guericke	[121]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	liu	[158]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	luna	[161]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	marcon	[164]	✓	-	✓	-	-	-	✓	-	-	-
2017	quintana	[192]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	shi	[214]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	yuan	[239]	-	✓	-	-	✓	-	-	-	-	-
2018	carello	[44]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
2018	decerle	[62]	-	✓	-	-	-	-	✓	-	-	-
2018	demirbilek	[68]	-	-	✓	✓	✓	-	-	-	-	TW3
2018	fathollahi-fard	[97]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	O1
2018	fathollahi-fard	[98]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2018	fikar	[102]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
2018	lin	[154]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
2018	liu	[156]	-	✓	-	✓	-	-	-	-	-	O2
2018	mosquera	[175]	✓	-	✓	✓	-	-	-	-	-	-
2018	nasir	[181]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
2018	sinthamrongruk	[217]	✓	✓	-	-	-	-	✓	-	-	-
2018	szander	[223]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2018	szander	[222]	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-
2018	yuan	[242]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2018	zhan	[243]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	TW2
2019	chaieb	[48]	✓	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-
2019	decerle	[63]	✓	✓	-	-	-	-	✓	-	-	-
2019	decerle	[64]	✓	✓	-	-	-	-	✓	-	-	-
2019	dekhici	[67]	-	-	✓	-	-	-	✓	-	-	-
2019	demirbilek	[69]	-	✓	✓	✓	✓	-	-	-	-	-
2019	fathollahi-fard	[95]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2019	gomes	[117]	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-	-
2019	grenouilleau	[119]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
2019	heching	[126]	✓	✓	-	✓	✓	-	-	-	-	-
2019	liu	[157]	✓	-	✓	-	-	-	✓	-	-	-
2019	liu	[159]	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
2019	moussavi	[176]	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	TW2
2019	nasir	[182]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
2019	restrepo	[199]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2019	riazi	[202]	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
Sum			60	52	10	16	14	3	14	6	8	
Percentage (%)			65.93	57.14	10.99	17.58	15.38	3.30	15.38	6.59	8.89	
SubSum			63	52			28			20	2	
Sub Percentage (%)			69.23	57.14			30.77			21.98	2.22	
TOTAL VISITS : sum -- (%)							82 -- (90.11)					

TW1 : TW for production of drugs; **TW2** : appointment time/ fixed visit; **TW3** : set of possible appointment times; **Sc1** : forbidden patterns; **CH1** : visit duration depends on qualification; **O1** : each patient needs a specific drug; **O2** : required minimum visit length for patients

TABLE A.11 – Constraints related to visits - Journal papers - Part 2 of 2

		Visits						Visits																
		Characteristics (Ch)			Schedule (Sc)			Dependency (De)			Characteristics (Ch)			Schedule (Sc)			Dependency (De)							
Year	First authors	Ref	Hard visit TW	qualification required	visit duration depends on qualification	Multiple visits per period	visit frequency	Visit patterns	Synchronization	Precedence	Others	Year	First authors	Ref	Hard visit TW	qualification required	visit duration depends on qualification	Multiple visits per period	visit frequency	Visit patterns	Synchronization	Precedence	Others	
2006	borsani	[32]	✓	✓	-	✓	✓	-	-	-	-	2017	shi	[212]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2008	elbenani	[82]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	2017	shi	[213]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2009	kengosien	[140]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	2017	sinthamrongruk	[216]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2010	misir	[173]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	2017	xie	[233]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2011	redjem	[195]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	2017	yalcindag	[234]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2012	cattafi	[45]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	2018	alves	[13]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2012	gamst	[108]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	2018	alves	[11]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2013	errahout	[90]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	2018	decerle	[66]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	O7
2013	gayraud	[111]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	2018	decerle	[61]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	O7
2013	jemai	[136]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	2018	di mascolo	[72]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Del
2013	luna	[160]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	2018	eliseu	[83]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2013	cappanera	[41]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	2018	feng	[99]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2014	di mascolo	[73]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	2018	garaix	[109]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
2014	espinoise	[92]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	2018	marinez	[168]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
2014	kengosien	[141]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	2018	riazi	[201]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
2014	labadie	[143]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	2018	sin	[218]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2014	masmondi	[170]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	2018	tohidifard	[224]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
2014	riazi	[200]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	2018	Xiao	[231]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
2014	yuhan	[240]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	2018	yang	[237]	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
2015	aiare	[4]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	2018	zhang	[246]	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
2015	cattafi	[46]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	2019	alves	[10]	-	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	-
2015	en-nahli	[86]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	2019	alves	[9]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	laesankhang	[144]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	2019	espadinha	[91]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	rest	[197]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	Sum		41	36	3	14	3	7	15	15	6	10	
2015	xie	[232]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	Percentage (%)		65.08	57.14	4.76	22.22	4.76	11.11	23.81	9.52	16.13		
2016	ait haddaene	[5]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	SubSum		42	36		23		18		3			
2016	decerle	[60]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	Sub Percentage (%)		66.67	57.14		36.51		28.57		4.84			
2016	en-nahli	[85]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	TOTAL VISITS : sum -					57 - - (91.94)							
2016	manerba	[162]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	- %												
2016	nguyen	[183]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	Global Sum		101	88	4	24	19	21	29	12	22		
2017	alves	[12]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	Global Percentage (%)		65.58	57.14	2.60	15.58	12.34	13.64	18.83	7.79	14.29		
2017	baumann	[20]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	Global Sub Sum		105	88		51		38		5			
2017	carello	[43]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	Global Sub Percentage (%)		68.18	57.14		33.12		24.68		3.25			
2017	decerle	[65]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	GLOBAL VISITS : sum					139 - - (90.26)							
2017	di mascolo	[75]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	- - %												
2017	el hajri	[81]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-													
2017	gunawan	[122]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-													
2017	fahrichi	[145]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-													
2017	naji	[180]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-													

TW1 : time window for producing drugs ; TW2 : appointment time/ fixed visit ; TW3 : Max and Min Working Time ; Del : Disjunction ; O7 : multiple home health care offices

TABLE A.12 – Constraints related to visits -Conference papers

Year	First author	Ref	Patient preference constraints			
			Continuity of care (CC)		Time (T)	
			Same staff member	Soft TW	Prefered starting time	Other
1997	begur	[23]	-	-	-	-
2000	hindle	[129]	-	-	-	-
2006	bertels	[30]	-	✓	-	-
2006	eveborn	[94]	-	-	✓	-
2007	akjiratikarl	[7]	-	-	-	-
2008	bredstrom	[36]	-	-	-	-
2009	chahed	[47]	-	-	-	-
2009	hindle	[130]	-	-	-	-
2011	ben bachouch	[26]	✓	-	-	-
2011	bennett	[27]	-	-	-	-
2011	trautsamwieser	[228]	-	-	-	-
2011	trautsamwieser	[227]	-	✓	-	-
2012	an	[14]	-	-	-	T4
2012	nickel	[184]	✓	-	-	-
2012	rasmussen	[194]	-	-	-	-
2012	shao	[211]	-	-	-	-
2013	allaoua	[8]	-	-	-	-
2013	bard	[18]	-	-	-	-
2013	benzarti	[29]	-	-	-	-
2013	cappanera	[37]	-	-	-	-
2013	mutingi	[178]	-	✓	-	-
2014	bard	[16]	-	-	-	-
2014	bard	[17]	-	-	-	-
2014	cappanera	[38]	✓	-	-	-
2014	carello	[42]	✓	-	-	-
2014	di gaspero	[71]	-	-	-	T3
2014	lanzarone	[146]	✓	-	-	-
2014	mankowska	[163]	-	✓	-	-
2014	mutingi	[179]	-	-	-	-
2014	trautsamwieser	[229]	-	-	-	-
2015	bowers	[33]	✓	-	-	-
2015	fikar	[100]	-	-	-	-
2015	hiermann	[128]	-	✓	✓	-
2015	issaoui	[134]	-	-	-	-
2015	lieder	[153]	-	-	✓	T2
2015	maya duque	[172]	✓	-	✓	CC1
2015	misir	[177]	-	✓	-	-
2015	rodriguez	[205]	-	-	-	-
2015	yuan	[241]	-	-	-	-
2016	ait haddadene	[6]	-	-	-	CC2
2016	braekers	[34]	-	-	✓	CC2
2016	fikar	[103]	-	-	-	-
2016	heching	[125]	✓	-	-	T1
2016	lin	[155]	✓	✓	✓	-
2016	redjem	[196]	-	-	-	-
2016	rest	[198]	-	-	-	-
2016	wirnitzer	[230]	✓	-	-	-
2016	yalcindag	[236]	-	-	-	-
2016	yalcindag	[235]	✓	-	-	-

TABLE A.13 – Constraints related to patients - Journal papers - Part 1 of 2

Year	First author	Ref	Patient preference constraints			
			Continuity of care (CC)		Time (T)	
			Same staff member	Soft TW	Prefered starting time	Other
2017	cappanera	[40]	✓	-	-	-
2017	du	[79]	-	-	-	-
2017	du	[78]	-	-	✓	-
2017	erdem	[87]	-	-	✓	-
2017	frifita	[107]	-	-	-	-
2017	guericke	[121]	-	-	-	-
2017	liu	[158]	✓	-	-	-
2017	luna	[161]	✓	-	-	-
2017	marcon	[164]	-	-	-	-
2017	quintana	[192]	✓	-	-	-
2017	shi	[214]	-	-	-	-
2017	yuan	[239]	✓	✓	-	-
2018	carello	[44]	✓	-	-	-
2018	decerle	[62]	-	✓	-	-
2018	demirbilek	[68]	✓	-	-	CC1
2018	fathollahi-fard	[97]	-	-	-	-
2018	fathollahi-fard	[98]	-	-	-	-
2018	fikar	[102]	-	-	-	-
2018	lin	[154]	-	-	-	-
2018	liu	[156]	✓	-	-	-
2018	mosquera	[175]	✓	-	-	-
2018	nasir	[181]	-	-	-	-
2018	sinthamrongruk	[217]	-	-	-	-
2018	szander	[223]	-	-	-	-
2018	szander	[222]	-	-	-	-
2018	yuan	[242]	-	-	-	-
2018	zhan	[243]	-	-	-	-
2019	chaieb	[48]	✓	-	-	CC2
2019	decerle	[63]	-	✓	-	-
2019	decerle	[64]	-	✓	-	-
2019	dekhici	[67]	-	✓	-	-
2019	demirbilek	[69]	✓	-	-	CC1
2019	fathollahi-fard	[95]	-	-	-	-
2019	gomes	[117]	-	-	-	CC3
2019	grenouilleau	[119]	-	-	-	-
2019	heching	[126]	-	-	-	-
2019	liu	[157]	-	-	-	-
2019	liu	[159]	-	✓	-	-
2019	moussavi	[176]	-	-	-	-
2019	nasir	[182]	-	-	-	-
2019	restrepo	[199]	-	-	-	-
2019	riazi	[202]	-	-	-	T4
Sum			22	13	8	13
Percentage (%)			24.18	14.29	8.79	14.44
SubSum			25	23		0
Sub Percentage (%)			27.47	25.27		0
TOTAL PATIENTS : sum -- (%)			41 -- (45.06)			

CC1 : same time slot ; CC2 : preferred staff member ; CC3 : non loyalty T1 : preferred day of visit ; T2 : earliest time ; T3 : latest time ; T4 : fixed care interval

TABLE A.14 – Constraints related to patients - Journal papers - Part 2 of 2

		Patients preference constraints				Patients preference constraints									
		Continuity of care	Time	Soft /Mixed TW	Preferred day/time of visits	Continuity of care	Time	Soft /Mixed TW	Preferred day/time of visits	Others					
Year	First authors	Ref	same staff member(s)	preferred staff member	Soft /Mixed TW	Preferred day/time of visits	Others	Year	First authors	Ref	same staff member(s)	preferred staff member	Soft /Mixed TW	Preferred day/time of visits	Others
2006	borsani	[32]	✓	-	-	✓	-	2017	shi	[212]	-	-	-	-	-
2008	elbenani	[82]	-	-	-	-	-	2017	shi	[213]	-	-	-	-	-
2009	kergiosien	[140]	-	-	-	-	-	2017	sirhanrongruk	[216]	-	-	-	-	-
2010	mistr	[173]	-	-	-	-	-	2017	xie	[233]	-	-	-	-	-
2011	redem	[195]	-	-	-	-	-	2017	yaldandag	[234]	✓	-	-	-	-
2012	catfafi	[45]	-	-	-	-	-	2018	alves	[13]	-	-	-	-	-
2012	gaust	[108]	-	-	-	-	-	2018	decarle	[66]	-	-	-	-	-
2013	errathout	[90]	✓	-	-	-	-	2018	decarle	[61]	-	-	-	-	-
2013	gayraud	[111]	-	-	-	-	-	2018	di mascolo	[72]	-	-	-	-	O8
2013	gayraud	[111]	-	-	-	-	-	2018	elisen	[83]	-	-	-	-	-
2013	jemai	[136]	-	-	-	-	-	2018	fang	[99]	-	-	-	-	T5
2013	luna	[160]	-	-	-	-	-	2018	garrix	[109]	-	-	-	-	-
2014	cappanera	[41]	-	-	-	-	-	2018	martinez	[168]	✓	-	-	-	-
2014	di mascolo	[73]	-	-	-	-	-	2018	riazi	[201]	-	-	-	-	-
2014	espinoouse	[92]	-	-	-	-	-	2018	riu	[218]	✓	-	-	-	T3
2014	kergiosien	[141]	-	-	-	-	-	2018	tohidilard	[224]	-	-	-	-	-
2014	labache	[143]	-	-	-	-	-	2018	xiao	[231]	-	-	-	-	-
2014	masnouidi	[170]	-	-	-	-	-	2018	yang	[237]	-	-	-	-	-
2014	riazi	[200]	-	-	-	-	-	2018	zhang	[246]	-	-	-	-	-
2014	yuau	[240]	-	-	-	-	-	2019	alves	[10]	✓	-	-	-	-
2015	aiane	[4]	-	-	-	-	-	2019	alves	[9]	✓	-	-	-	-
2015	catfafi	[46]	-	-	-	-	-	2019	espadinha	[91]	-	-	-	-	-
2015	er-nahli	[86]	-	-	-	-	-	Sum			11	6	7	5	6
2015	laesankhang	[144]	-	-	-	-	-	Percentage (%)			17.46	9.52	11.11	7.94	9.52
2015	rest	[197]	-	-	-	-	-	SubSum			19	16	16	1	
2015	xie	[232]	-	-	-	-	-	Sub Percentage (%)			30.16	25.40	25.40	1.59	
2016	ait haddaene	[5]	-	-	-	-	-	TOTAL PATIENTS : sum -			30	-	(47.62)		
2016	decarle	[60]	-	-	-	-	-	- (%)							
2016	er-nahli	[85]	-	-	-	-	-	Global Sum			33	9	20	6	19
2016	manarba	[162]	-	-	-	-	-	Global Percentage (%)			21.43	5.84	12.99	3.90	12.34
2016	nguyen	[183]	-	-	-	-	-	Global SubSum			44	39	39	1	
2017	alves	[12]	-	-	-	-	-	Global Sub Percentage (%)			28.57	25.32	25.32	0.65	
2017	baumann	[20]	✓	-	-	-	-	GLOBAL PATIENTS : sum -			71	-	(46.10)		
2017	carollo	[43]	✓	-	-	-	-	- (%)							
2017	chen	[49]	✓	-	-	-	-	CC1 : same time slot ; CC4 : pre-assigned staff member ; T3 : latest time ; T5 :							
2017	decarle	[65]	-	-	-	-	-	preferred starting time ; O8 : preferred staff member gender							
2017	di mascolo	[75]	✓	-	-	-	-								
2017	el hafit	[81]	-	-	-	-	-								
2017	gunawan	[122]	-	-	-	-	-								
2017	lahrichi	[145]	-	-	-	-	-								
2017	naji	[180]	-	-	-	-	-								

TABLE A.15 – Constraints related to patients - Conference papers

Year	First author	Ref	Staff Members' constraints									
			Characteristics (Ch)			Rules (R.)		Transport				
			Skill level	Hard TW/ availability	Soft TW	Legislative rules : break lunch, max working time, Max working time before/after break	Limited number of visited patients	district / region	Incompatibility with patients	Mode	Others	
1997	begur	[23]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2000	hindle	[129]	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
2006	bertels	[30]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
2006	eveborn	[94]	✓	✓	-	✓	-	✓	-	-	-	-
2007	akjiratikarl	[7]	-	-	✓	✓	-	-	-	-	-	-
2008	bredstrom	[36]	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
2009	chahed	[47]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2009	hindle	[130]	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
2011	ben bachouch	[26]	✓	-	-	✓	-	✓	-	-	-	-
2011	bennett	[27]	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
2011	trautsamwieser	[228]	✓	-	✓	✓	-	✓	✓	-	-	R1
2011	trautsamwieser	[227]	✓	-	✓	✓	-	-	✓	-	-	-
2012	an	[14]	-	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-
2012	nickel	[184]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
2012	rasmussen	[194]	-	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-
2012	shao	[211]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
2013	allaoua	[8]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
2013	bard	[18]	✓	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-
2013	benzarti	[29]	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-
2013	cappanera	[37]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2013	mutingi	[178]	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
2014	bard	[16]	✓	-	-	✓	-	-	-	-	-	-
2014	bard	[17]	-	-	✓	✓	-	-	-	-	-	-
2014	cappanera	[38]	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
2014	carello	[42]	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-
2014	di gaspero	[71]	✓	-	-	-	-	-	✓	-	-	-
2014	lanzarone	[146]	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-
2014	mankowska	[163]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2014	mutingi	[179]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
2014	trautsamwieser	[229]	✓	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-
2015	bowers	[33]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	fikar	[100]	✓	-	-	✓	✓	-	-	sharing vehicles, walk	R3, R4	-
2015	hiermann	[128]	✓	✓	-	✓	-	-	✓	Public or car	R2	-
2015	issaoui	[134]	✓	-	-	✓	-	-	-	-	-	-
2015	lieder	[153]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	maya duque	[172]	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-
2015	misir	[177]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	rodriguez	[205]	✓	-	-	✓	-	✓	-	-	-	-
2015	yuan	[241]	✓	-	-	-	✓	-	-	-	-	-
2016	ait haddadene	[6]	✓	✓	-	-	✓	-	-	-	-	-
2016	braekers	[34]	✓	-	-	✓	-	-	-	public - car	-	-
2016	fikar	[103]	✓	-	-	✓	-	-	-	sharing vehicles, walk	R4	-
2016	heching	[125]	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	lin	[155]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	redjem	[196]	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	rest	[198]	✓	✓	-	✓	-	-	✓	public mode	-	-
2016	wirmitzer	[230]	✓	-	-	✓	-	✓	✓	-	R2	-
2016	yalcindag	[236]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	yalcindag	[235]	✓	-	-	✓	-	-	-	-	-	-

TABLE A.16 – Constraints related to staff members - Journal papers - Part 1 of 2

Year	First author	Ref	Staff Members' constraints										
			Characteristics (Ch)			Rules (R.)		district / region	Incompatibility with patients	Transport			
			Skill level	Hard TW/ availability	Soft TW	Legislative rules : break lunch, max working time, Max working time before/after break	Limited number of visited patients			Mode	Others		
2017	cappanera	[40]	✓	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	
2017	du	[79]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2017	du	[78]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2017	erdem	[87]	-	✓	-	-	-	-	✓	public-car	-	-	
2017	frifita	[107]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2017	guericke	[121]	✓	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-	
2017	liu	[158]	✓	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-	
2017	luna	[161]	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	
2017	marcon	[164]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2017	quintana	[192]	-	✓	-	✓	-	✓	-	-	-	-	
2017	shi	[214]	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	
2017	yuan	[239]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2018	carello	[44]	✓	-	-	✓	-	✓	-	-	-	-	
2018	decerle	[62]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	
2018	demirbilek	[68]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2018	fathollahi-fard	[97]	-	-	-	-	-	-	-	public-car-other	R6	-	
2018	fathollahi-fard	[98]	-	-	-	-	-	-	-	public-car-other	-	-	
2018	fikar	[102]	✓	-	-	✓	✓	-	-	sharing vehicles, walk	R3, R4	-	
2018	lin	[154]	✓	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	
2018	liu	[156]	✓	-	-	✓	-	-	-	-	R5	-	
2018	mosquera	[175]	-	✓	-	-	✓	-	✓	-	-	-	
2018	nasir	[181]	✓	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-	
2018	sinthamrongruk	[217]	✓	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	
2018	szander	[223]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2018	szander	[222]	-	-	-	✓	✓	-	-	public-car	-	-	
2018	yuan	[242]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2018	zhan	[243]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2019	chaieb	[48]	✓	✓	-	✓	-	✓	✓	public - car	-	-	
2019	decerle	[63]	✓	✓	-	✓	-	-	-	car	-	-	
2019	decerle	[64]	✓	✓	-	✓	-	-	-	car	-	-	
2019	dekhici	[67]	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	
2019	demirbilek	[69]	✓	✓	-	-	-	✓	-	-	-	-	
2019	fathollahi-fard	[95]	-	-	-	-	-	-	-	public - car	-	-	
2019	gomes	[117]	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	
2019	grenouilleau	[119]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	
2019	heching	[126]	✓	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-	
2019	liu	[157]	-	✓	-	✓	-	-	-	-	-	-	
2019	liu	[159]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
2019	moussavi	[176]	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	
2019	nasir	[182]	✓	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	
2019	restrepo	[199]	-	-	-	✓	-	✓	-	-	-	-	
2019	riazi	[202]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	
Sum			50	41	4	41	7	12	9	14		8	
Percentage (%)			54.95	45.05	4.40	45.05	7.69	13.19	9.89	15.38		8.79	
SubSum			50	45		46		12	9	14		0	
Sub Percentage (%)			54.95	49.45		50.55		13.19	9.89	15.38		0	
TOTAL STAFF MEMBERS sum - - (%)												78 - - (85.71)	

R1 : soft time window break ; **R2** : additional jobs : meeting, administrative, etc. ; **R3** : maximum walking duration ; **R4** : maximum number of downgrading allowed per nurse ; **R5** : fixed working days for nurses ; **R6** : limited traveling time for each nurse

TABLE A.17 – Constraints related to staff members - Journal papers - Part 2 of 2

		Staff Member constraints						
Year	First authors	Ref	Characteristics (Ch)		Rules (R)		district/region	Others
			Skill level	Hard SM TW	Legislative rules : break lunch, max working time, before/after break	Legislative rules : break lunch, max working time, before/after break		
2006	borsani	[32]	✓	-	-	✓	-	-
2008	elbenani	[82]	-	-	-	✓	-	-
2009	kegosten	[140]	✓	✓	-	-	✓	-
2010	misir	[173]	✓	✓	-	-	-	-
2011	redjem	[195]	✓	-	-	-	-	-
2012	cattafi	[45]	✓	✓	-	-	-	-
2012	gaust	[108]	✓	✓	-	-	-	-
2013	errahout	[90]	✓	✓	-	✓	-	-
2013	gayraud	[111]	✓	✓	-	-	-	-
2013	jennai	[136]	✓	✓	-	-	-	-
2013	luna	[160]	✓	✓	-	✓	-	-
2014	cappanera	[41]	-	-	-	✓	-	-
2014	di mascolo	[73]	-	-	-	-	-	-
2014	espinoise	[92]	✓	✓	-	-	-	R7
2014	kegosten	[141]	✓	✓	-	✓	-	O9, O3
2014	labadie	[143]	✓	✓	-	-	-	-
2014	masmoudi	[170]	✓	-	-	-	-	-
2014	riazi	[200]	✓	✓	-	-	-	-
2014	yuan	[240]	✓	✓	-	✓	-	-
2015	aiane	[4]	✓	✓	-	✓	-	-
2015	cattafi	[46]	✓	✓	-	✓	-	-
2015	en-nahli	[86]	✓	✓	-	✓	-	-
2015	laesunklang	[144]	✓	✓	-	✓	-	-
2015	rest	[197]	✓	✓	-	✓	-	O4,Ch1
2015	xie	[232]	✓	✓	-	-	-	-
2016	ait haddaene	[5]	✓	✓	-	-	-	-
2016	deceple	[60]	✓	✓	-	-	-	-
2016	en-nahli	[85]	✓	✓	-	-	-	-
2016	manerba	[162]	✓	-	-	✓	-	Ch1
2016	nguyen	[183]	✓	✓	-	✓	-	-
2017	alves	[12]	✓	✓	-	-	-	-
2017	baumann	[20]	✓	✓	-	✓	-	-
2017	carello	[43]	-	-	-	-	-	-
2017	chen	[49]	✓	✓	-	-	-	-
2017	deceple	[65]	✓	✓	-	-	-	-
2017	di mascolo	[75]	✓	✓	-	-	-	-
2017	el hajri	[81]	✓	✓	-	-	-	-
2017	gunawan	[122]	✓	✓	-	-	-	-
2017	lahrichi	[145]	✓	✓	-	-	-	-
2017	naji	[180]	-	-	-	-	-	-
2017	shi	[212]	-	-	-	-	-	O5
2017	shi	[213]	-	-	-	✓	-	O5
2017	sinthamrongruk	[216]	-	-	-	-	-	O4,R7
2017	xie	[233]	-	-	-	-	-	-
2017	yalchidag	[234]	-	-	-	-	-	-
2018	alves	[13]	-	-	-	-	-	-
2018	alves	[11]	-	-	-	-	-	-
2018	deceple	[66]	✓	✓	-	-	-	-
2018	deceple	[61]	✓	✓	-	-	-	-
2018	di mascolo	[72]	✓	✓	-	-	-	-
2018	eliseu	[83]	✓	✓	-	✓	-	O6
2018	feng	[99]	-	-	-	-	-	-
2018	garaix	[109]	✓	✓	-	-	-	-
2018	martinez	[168]	✓	✓	-	✓	-	O6
2018	riazi	[201]	✓	✓	-	-	-	-
2018	su	[218]	✓	✓	-	✓	-	-
2018	tohidifard	[224]	✓	✓	-	-	-	O5
2018	Xiao	[231]	✓	✓	-	✓	-	-
2018	yang	[237]	✓	✓	-	-	-	-
2018	zhang	[246]	✓	✓	-	-	✓	-
2019	alves	[10]	✓	✓	-	-	-	-
2019	alves	[9]	-	-	-	-	-	-
2019	espadinha	[91]	-	-	-	-	-	-
Sum			34	33	18	18	9	10
Percentage (%)			53.97	52.38	28.57	28.57	14.29	15.87
SubSum			44		21			
Sub Percentage (%)			69.84		33.33			
TOTAL STAFF MEMBERS sum (%)			48 - - (76.19)					
Global Sum			84	89	59	59	21	18
Global Percentage (%)			54.55	57.79	38.31	38.31	13.64	11.69
SubSum			76.00		21.00			
Sub Percentage (%)			49.35		13.64			
TOTAL STAFF MEMBERS sum (%)			126 - - (81.82)					

R7 : limited number of patients visited per nurse ; O3 : stops at drop off points ; O4 :transport mode personal car & walk ; O5 : vehicle capacity ; O6 : nurses in team of 7 or less, traveling in different vehicles ; O9 : maximum transport delay for some blood samples ; Ch1 : soft SM time window

TABLE A.18 – Constraints related to staff members - Conference papers

Year	Ref	Uncertainties/Changes										Modeling													
		Demands			Patients			Staff		Other		Type	Variables			Model		Objective function							
Year	Ref	travel times	visit time	new demands	new patients	cancellations / departure	change of availabilities	new staff member	cancellation	new availabilities			interval	random variables	scenarios			min travel/idle times	min costs/max reward	min working time/overtime	balance workloads	min deviation from original schedule	max number of patients covered	min late arrival (penalties)	others
2011	<i>bennett</i>	[27]	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-
2012	<i>nickel</i>	[184]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2014	<i>cappanera</i>	[41]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2014	<i>carello</i>	[42]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2014	<i>lanzarone</i>	[146]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	<i>rest</i>	[197]	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	<i>rodriguez</i>	[205]	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2015	<i>yuán</i>	[241]	✓	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	<i>fikar</i>	[103]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	<i>heching</i>	[125]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	<i>nguyen</i>	[188]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2016	<i>valentinag</i>	[236]	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	<i>cappanera</i>	[40]	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	<i>carello</i>	[43]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	<i>chen</i>	[49]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	<i>di mascolo</i>	[75]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	<i>du</i>	[79]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	<i>gunawan</i>	[122]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	<i>marcon</i>	[164]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	<i>ngai</i>	[180]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	<i>shi</i>	[213]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	<i>xie</i>	[233]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2017	<i>yuán</i>	[239]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2018	<i>alves</i>	[11]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2018	<i>denhrbalek</i>	[68]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2018	<i>lin</i>	[154]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2018	<i>lin</i>	[175]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2018	<i>mosquera</i>	[181]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2018	<i>masir</i>	[237]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2018	<i>yan</i>	[242]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2018	<i>zhan</i>	[243]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2018	<i>zhang</i>	[246]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2019	<i>denhrbalek</i>	[69]	✓	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2019	<i>lin</i>	[159]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2019	<i>gomes</i>	[117]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2019	<i>masir</i>	[182]	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2019	<i>restrepo</i>	[199]	-	-	✓	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sum			9	16	8	11	9	2	2	2	5	2	3	10	6		11	14	6	4	4	3	5	5	5
Percentage (%)			24.3	43.2	21.6	29.7	24.3	5.4	5.4	5.4	13.5	5.4	8.1	27.0	16.2		29.7	38.9	16.7	11.1	11.1	8.3	13.5	14.3	

Conference papers are in italic.

CaCM : Cardinality constrained model; **ChCM** : Chance constrained model; **SBA** : Scenario based approach; **SMR** : Stochastic model with recourse; **SP** : Stochastic programming; **MaS** : Multi-agent Simulation; **DE-meta** : discrete event driven metaheuristic
U1 : broken vehicle; **U2** : change of visit frequency; **O1** : Min reassignment costs; **O2** : Min nb tours impacted; **O3** : Min response time; **O4** : Min deviation from preferred time and frequency;

TABLE A.19 – Uncertainties and perturbations

