



Planification des soins à domicile

Nizar Triki

► To cite this version:

Nizar Triki. Planification des soins à domicile. Autre [cs.OH]. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2016. Français. ⟨NNT : 2016CLF22733⟩. ⟨tel-01490024⟩

HAL Id: tel-01490024

<https://theses.hal.science/tel-01490024v1>

Submitted on 14 Mar 2017

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.



HAL Authorization

N° d'ordre : D. U : 2733

EDSPIC : 772

UNIVERSITÉ BLAISE PASCAL - CLERMONT II

**École Doctorale
Sciences Pour l'Ingénieur de Clermont-Ferrand**

Thèse

Présentée par

NIZAR TRIKI

Pour obtenir le grade de

Docteur d'Université

Spécialité : INFORMATIQUE

Planification des soins à domicile

Soutenue publiquement le 06 Octobre 2016 devant le jury :

Mme. Feng PENG CHU	Professeur, Université d'Evry Val d'Essonne	<i>Présidente</i>
M. Lyes BENYOUCEF	Professeur, Université Aix-Marseille	<i>Rapporteur</i>
M. Nicolas JOZEFOWIEZ	Maître de conférences, INSA Toulouse	<i>Rapporteur</i>
M. Lionel AMODEO	Professeur, Université Technologie de Troyes	<i>Examineur</i>
M. Laurent DEROUSI	Maître de conférences, Université Blaise Pascal	<i>Examineur</i>
M. Xiaolan XIE	Professeur, École des Mines de Saint-Étienne	<i>Directeur de thèse</i>
M. Thierry GARAIX	Assistant Professeur, École des Mines de Saint-Étienne	<i>Co-encadrant</i>

À mon père, sans qui je ne serais pas où j'en suis aujourd'hui...
À ma mère, ses prières m'ont accompagné tout le long de mes études
À ma très chère épouse, son amour et sa tendresse
À mes frères et mes sœurs, leur encouragement et leur soutien

Je dédie ce travail, je vous aime.

Remerciements

Si je suis ce que je suis aujourd'hui, c'est grâce en partie aux personnes qui ont croisé ma route. Certaines ont fait une grande différence dans ma vie et bien souvent sans le savoir. Elles m'ont influencé à prendre des décisions, à poser des gestes selon les situations vécues afin de m'améliorer et grandir. Je gagne à prendre le temps de m'arrêter et de faire une liste de toutes ces personnes en leur livrant personnellement un message de gratitude pour les remercier de ce qu'elles m'ont apporté.

Je tiens d'abord à remercier le Laboratoire d'Excellence *LabEx IMobS³ « Innovative Mobility : Smart and Sustainable Solutions »* pour avoir soutenu cette thématique de recherche et avoir permis une collaboration entre l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand II et l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne, que je remercie également de m'avoir donné l'opportunité de m'épanouir dans le monde de la recherche.

J'exprime ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, le Professeur Xiaolan Xie, qui m'a dirigé et soutenu tout au long des années de mes travaux. Sa disponibilité, son écoute, ses analyses toujours précises, riches et pertinentes et ses conseils m'ont beaucoup appris. Merci de m'avoir repoussé sans cesse dans mes retranchements, pour tirer, je l'espère, le meilleure de moi-même.

J'ai un merci tout particulier à Thierry Garaix. D'abord, car cette thèse n'aurait pas eu lieu sans lui, ensuite de m'avoir apporté tout son soutien, son aide et son expérience durant toutes les phases de cette thèse et d'avoir joué un rôle plus important que celui d'un encadrant. Et puis, d'avoir toujours gardé un œil sur mes travaux, même en dehors des jours de travail. Son implication et son approche positive m'ont énormément apporté aux réflexions faites sur ce travail et qui m'ont permis d'améliorer la qualité de mes travaux. Je tiens à souligner également ses qualités humaines qui m'ont beaucoup inspiré.

Je tiens à remercier les membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter l'évaluation de ce travail. Tout d'abord, je remercie le Professeur Lyes Benyoucef et Monsieur Nicolos Jozefowicz pour avoir accepté d'être rapporteurs de ma thèse et de prendre de leurs temps pour la lire avec soin. Je les remercie également pour leurs retours et remarques constructifs qui ont permis d'étoffer mes réflexions sur ma problématique et mon apprentissage de la recherche. Je remercie également le Professeur Feng Peng Chu pour avoir présidé ma soutenance de thèse, le Professeur Lionel Amodeo ainsi que Monsieur Laurent Deroussi, qui m'ont fait l'honneur de participer du jury de thèse en tant qu'examinateurs.

Je remercie l'équipe I4S pour les échanges scientifiques que nous avons eus pendant les réunions d'équipe régulièrement. Je souhaite également remercier tous mes collègues pour leur bonne humeur et leur esprit d'équipe. J'ai été heureux de faire partie de cette famille dans la quelle on peut exposer son point de vue et en débattre. Merci pour la bienveillance de chacun. J'ai une pensée particulière pour les collègues (Sabri, Omar, Olfa, Victor, Fanny, Olivier, Fanette, Sareh, Boris, David, Franck,...) pour les moments agréables que nous avons eus pendant les pauses café.

Je n'oublie évidemment pas mes collègues de bureau : Abdellah, Carlos, Ola, Omar, Éloi, Fanny et Olivier pour leur gentillesse et leur bienveillance ainsi que les échanges scientifiques que nous avons eus. Je remercie également Vincent pour ses qualités d'enseignement et les discussions que nous avons partagé. Une pensée à Amélie et Françoise pour leur aide durant toute cette thèse. Un merci également à l'équipe de foot7 de l'école des mines de Saint-Étienne pour les moments agréables que nous vons vécu durant les deux premières années de ma thèse.

À titre plus personnel, je remercie chaleureusement mes amis et à toutes les personnes que j'ai côtoyées durant ces années de thèse, qui à un moment ou un autre de l'élaboration de cette thèse, m'ont apporté leurs soutiens ; je pense également à Malik, Yassine, Khawla, Salma, Akram, Chaker, Hatem, Olfa, Majd ainsi que mes amis de Sfax (Randa, Mohamed Ali, Slim, Wael,...).

J'adresse mes remerciements les plus profonds à mon papa Mansour et ma maman Raja qui m'ont soutenu depuis mon école primaire, secondaire,... arrivant aux années de thèse. Bref, ces nombreuses années d'études pour obtenir le grade de docteur qui me l'ont souhaité depuis que j'étais petit. Mes sœurs Raida et Tahèni et mes frères Mohamed Bilel et Wael qui m'ont soutenu et cru en moi. Cette thèse a été également fructueuse au niveau familial avec la venue de mes deux nièces Rana et Ranime et mes trois neveux Adam, Ahmed et Ismaïl.

Enfin, aucun mot ne peut exprimer ma reconnaissance à mon épouse, Emna, pour sa présence à mes côtés, pour les sacrifices qu'elle a faits et pour son courage de me supporter tous les jours. J'exprime mes remerciements également à mon beau père Moncef, ma belle mère Salwa, et le reste de la famille (Melek, Fatma, Salma, Ahmed, Sameh, Mohamed, Moez et Asma) qui m'entoure et me soutient en permanence malgré la distance.

À Saint-Étienne, le 2 janvier 2017.
Nizar Triki

Table des matières

Liste des figures	vii
Liste des tableaux	ix
Introduction générale	1
1 L'Hospitalisation À Domicile en France	5
1.1 Introduction	6
1.2 Le système de santé en France	7
1.2.1 Les établissements de santé	7
1.2.2 Les alternatives à l'hospitalisation	8
1.2.3 Les réseaux de soins	10
1.3 L'Hospitalisation À Domicile en France	11
1.3.1 Concept de l'HAD	11
1.3.2 Historique de l'HAD	11
1.3.3 Structure et organisation des établissements d'HAD	13
1.4 Positionnement et recours à l'HAD	15
1.4.1 Le positionnement de l'HAD dans l'offre générale de soins	15
1.4.2 Intérêts de l'hospitalisation à domicile	16
1.4.3 Impacts médico-économiques des soins à domicile	17
1.4.4 Freins au développement de l'hospitalisation à domicile	18
1.5 L'admission et le projet thérapeutique (PTh)	19
1.5.1 L'admission et le déroulement du séjour du patient au sein de l'HAD	19
1.5.2 Le projet thérapeutique	21
1.6 Exemples de fonctionnement des établissements d'HAD en France	22
1.6.1 HAD-43 de Puy-en-Velay	22
1.6.1.1 Présentation du service et ses objectifs	22
1.6.1.2 Organisation du service	23
1.6.1.3 Gestion des flux et chiffres	24
1.6.2 HAD Groupement de Coopération Sanitaire (GCS)	24

1.6.2.1	Présentation de l'établissement et ses objectifs	24
1.6.2.2	Organisation des circuits des médicaments	25
1.6.2.3	Chaine logistique et incertitudes	25
1.6.2.4	Le projet thérapeutique au sein de HAD-GCS	26
1.6.3	L'établissement d'hospitalisation à domicile de Cébazat-63	27
1.6.4	HAD Sallanches	28
1.7	Conclusion	29
2	Problèmes de planification des soins à domicile dans la littérature	31
2.1	Introduction	32
2.2	Concepts de base	33
2.2.1	Notions pour les problèmes de planification	33
2.2.2	Optimisation combinatoire	33
2.3	Méthodes de résolution	34
2.3.1	Méthodes exactes	35
2.3.1.1	La méthode de séparation et évaluation	35
2.3.1.2	Méthode de résolution par génération de colonnes	37
2.3.2	Méthodes approchées	38
2.3.2.1	Les recherches locales	39
2.3.2.2	Recherche tabou	40
2.4	État de l'art de la planification des soins à domicile	41
2.4.1	Littérature sur les problèmes de planification des tournées des infirmiers en HAD	42
2.4.1.1	Affectation des tournées des soignants	42
2.4.1.2	Ordonnancement des tournées des personnels	44
2.4.1.3	Allocation des ressources en HAD	45
2.4.2	Étude de la qualité des soins et l'épuisement professionnel des infirmiers	46
2.4.3	Synthèse et classification des travaux	47
2.5	Conclusion	49
3	Planification multipériode des tournées des infirmiers en HAD	51
3.1	Introduction	52
3.2	Problématique	53
3.3	Planification Hebdomadaire (PH)	54
3.3.1	Description des activités de soin	54
3.3.2	Description du plan hebdomadaire	55
3.3.3	Formulation mathématique (MIP-3.1)	56
3.3.3.1	Paramètres et notations	56
3.3.3.2	Modèle mathématique	57

3.3.4	Recherche tabou	58
3.4	Planification Journalière (PJ)	60
3.4.1	Modélisation	61
3.4.1.1	Notations et données	61
3.4.1.2	Formulation mathématique (MIP-3.2)	61
3.4.2	Heuristique basée sur le MIP-3.2	62
3.5	Résultats et expérimentations	63
3.6	Conclusion	66
4	La pénibilité dans les problèmes de planification des soins à domicile	69
4.1	Introduction	70
4.2	Contexte général de la pénibilité	70
4.3	Littérature sur les problèmes de la pénibilité	71
4.4	La pénibilité dans le problème de planification des soins à domicile	72
4.5	Approche de résolution	73
4.6	Planification journalière (étapes 1 & 2) - Génération de colonnes	74
4.7	Problème d'affectation des tournées pénibles sur la semaine - étape 3	77
4.7.1	Infirmiers toujours présents (MIP-4.1)	77
4.7.1.1	Notations et données	77
4.7.1.2	Modèle mathématique	77
4.7.2	Des jours de présence infirmiers différents (MIP-4.2)	78
4.7.2.1	Notations et données	78
4.7.2.2	Modèle mathématique	78
4.7.3	Optimisation du rythme (MIP-4.3)	79
4.7.3.1	Notations et données	79
4.7.3.2	Modèle mathématique	79
4.8	Expérimentations numériques	80
4.9	Construction des instances	80
4.10	Planification journalière	83
4.11	Planification hebdomadaire	86
4.12	Conclusion	86
5	Problème de sectorisation pour l'hospitalisation des soins à domicile	95
5.1	Introduction	96
5.2	Revue de la littérature sur les problèmes de sectorisation	97
5.2.1	La sectorisation politique	97
5.2.2	L'alignement des territoires de ventes	98
5.2.3	La sectorisation scolaire	99
5.2.4	Les territoires d'officiers de police	100

5.2.5	Problème de sectorisation d'énergie électrique	101
5.3	Littérature sur les problèmes de sectorisation en HAD	101
5.4	Synthèse des travaux de la littérature	103
5.5	Description et modélisation du problème	103
5.5.1	Hypothèses	104
5.5.2	Modélisation avec un niveau de service local	105
5.5.3	Modélisation avec un niveau de service global	105
5.5.4	Calcul du nombre d'infirmiers couvrant un district sur une journée .	107
5.6	Expérimentations et résultats	108
5.6.1	Génération d'un territoire	108
5.6.2	Génération d'un échantillon de journées sur un territoire	109
5.6.3	Résultats	109
5.7	Conclusion	112
Conclusion générale et perspectives		115
Bibliographie		117

Liste des figures

1.1	<i>Établissements de santé en France</i>	8
1.2	<i>Acteurs intervenant dans la prise en charge d'un patient en HAD</i>	16
1.3	<i>Parcours patient</i>	20
2.1	<i>Deux paysages adaptatifs pour un problème d'optimisation</i>	41
3.1	<i>Charge de travail cible</i>	56
3.2	<i>Opérateurs de voisinage et mouvements indépendants</i>	59
3.3	<i>Étapes de l'heuristique</i>	63
4.1	<i>Approche de résolution</i>	73
4.2	<i>Mécanisme de génération de colonnes</i>	76

Liste des tableaux

2.1	<i>Problématiques identifiées en soins à domicile</i>	48
3.1	<i>Pourcentage demandes inconnues/ jour</i>	56
3.2	<i>Résultats de la recherche tabou du plan hebdomadaire</i>	65
3.3	<i>Charge de travail quotidienne du plan journalier</i>	65
3.4	<i>Comparaison des trois politiques : première phase</i>	66
3.5	<i>Comparaison des trois politiques : deuxième phase</i>	66
4.1	<i>Description des instances journalières</i>	82
4.2	<i>Seuils de pénibilité</i>	83
4.3	<i>Périodes de présence des classes d'infirmiers</i>	83
4.4	<i>Plannings journaliers</i>	84
4.5	<i>Plannings journaliers (2)</i>	85
4.6	<i>Résultats pour S1</i>	88
4.7	<i>Résultats pour S2</i>	89
4.8	<i>Résultats pour S3</i>	90
4.9	<i>Résultats pour S4</i>	91
4.10	<i>Résultats pour S5</i>	92
4.11	<i>Résultats pour S6</i>	93
5.1	<i>Liste des paramètres pour R et C</i>	109
5.2	<i>Variations de α et β pour les instances de type R</i>	110
5.3	<i>Variations de α et β pour les instances de type C</i>	111
5.4	<i>Variations de α et β pour les instances de type RC</i>	111

Introduction générale

Depuis deux décennies le nombre de lits dans les établissements hospitaliers n'a fait que diminuer. Le vieillissement de la population a engendré une augmentation du nombre de personnes atteintes de pathologies graves, aiguës ou chroniques qui donnent lieu à des incapacités fonctionnelles et à des handicaps. Tout patient qui subit des traitements pour ces types de maladies souhaite une prise en charge globale et coordonnée pour des raisons de confort personnel et pour une meilleure qualité de vie dans son environnement familial. En effet, plusieurs structures de prise en charge globale de patients hors les murs de l'hôpital se sont développées ces dernières années. Parmi ces structures, on peut citer les établissements d'Hospitalisation À Domicile (HAD) bien que créés il y a une cinquantaine d'années, sont apparus comme un levier potentiel permettant de réduire les dépenses du domaine de la santé tout en maintenant un niveau de qualité de service satisfaisant.

Le rôle des établissements d'HAD ne se résume pas à la prestation du service de soins, c'est-à-dire, la production et l'administration des actes médicaux et paramédicaux mais également à la conception des réseaux de soins à domicile, la planification et la gestion des ressources humaines. Nos travaux de recherche portent sur des problématiques de planification des soins à domicile basées sur une approche globale d'optimisation intégrant les projets thérapeutiques des patients, les comportements des patients et des infirmiers, et les nombreuses incertitudes. Dans ce travail de recherche, nous nous intéressons aux problématiques opérationnelles dans les établissements d'hospitalisation à domicile. La mise en place d'une telle coordination entre les différents personnels professionnels intervenant dans le projet thérapeutique du patient avec l'objectif d'assurer un bon suivi et des soins de qualité permettant de garantir une efficacité et une bonne maîtrise des coûts. De nos jours, le nombre de séjours dans la plupart des établissements HAD a augmenté et la gestion des tournées des infirmiers est devenue de plus en plus difficile. Il est donc nécessaire de développer de nouveaux modèles de planification pour ces structures. Notre ambition est dès lors d'analyser les différentes problématiques liées à la planification des structures à domicile en prenant en compte de plusieurs contraintes liées aux : infirmiers, médecins, choix des patients et à leurs disponibilités, incertitudes.

Cette thèse porte sur l'admission des patients en soins à domicile, la planification des soins et la gestion des ressources humaines. La première phase de cette thèse est d'identifier

les protocoles de prise en charge des patients à domicile et les informations pertinentes pour l'optimisation des soins à domicile. En particulier, les projets thérapeutiques des patients sont des informations importantes pour déterminer les besoins en soins des patients et les contraintes de la planification des soins. Il faut également identifier les ressources (employeurs de l'HAD ou libéraux) impliquées dans les soins ainsi que leurs comportements.

Pour tirer les avantages économiques qu'offre la planification des soins à domicile, plusieurs sources d'incertitudes doivent être prises en compte. Ainsi, leurs modélisations mathématiques et approches de résolution font l'objet de ce mémoire. Les travaux qui y sont présentés tâchent à apporter des éléments de réponses aux questions suivantes :

- Comment décrire les différents modes de fonctionnement des établissements HAD en France ?
- Qu'est ce que la planification multi-périodiques des infirmiers dans le cadre des soins à domicile ? la différence par rapport à la planification multi-périodiques classique des tournées de véhicules ?
- Quelles sont les activités à réaliser, sachant que le planning des infirmiers peut être re-calculé et que le nombre des activités soit incertain ?
- Comment est-elle modélisée la pénibilité dans le cadre de la planification des soins à domicile ?
- Comment est-elle définie la couverture de la demande ?
- Comment équilibrer la charge de travail des infirmiers avec différents niveaux de services ?

Nos réponses à ces questions sont présentées dans les cinq chapitres qui constituent ce manuscrit. Le chapitre 1 constitue une description du système de santé français en mettant l'accent sur les différents types d'établissement de santé. L'historique et le concept des HAD en France est présenté afin d'expliquer le développement récent de ce mode de prise en charge. L'admission et le déroulement du séjour du patient au sein de l'HAD est décrit par la suite. Nous terminons le chapitre par une étude détaillée sur les établissements HAD que nous avons visités en décrivant leurs différents modes de fonctionnement.

Le chapitre 2 est destiné à donner une vision académique de l'organisation des soins à domicile. Nous étudions l'état de l'art sur les problématiques de planification des soins à domicile d'une part et l'introduction des méthodes/outils de recherche opérationnelle que nous allons utiliser dans cette thèse pour la résolution des problèmes de planification d'autre part. Nous mettons l'accent à la fin sur le positionnement des travaux existants en organisation des soins à domicile par rapport à nos travaux de recherche dans cette thèse.

Le chapitre 3 aborde la première problématique de planification en hospitalisation à domicile. Plus particulièrement, nous nous intéressons à la problématique de planification multi-périodiques des tournées des infirmiers au sein des structures HAD. Deux problèmes de planification sont considérés (i) la planification hebdomadaire où les tâches connues de la semaine sont planifiées afin de satisfaire les contraintes de leur plan de soins de la

semaine ainsi que le jour et l'heure des visites sont décidées, (ii) la planification journalière où le plan journalier doit être mis à jour pour intégrer des nouvelles demandes (demandes inconnues).

Le chapitre 4 propose un nouveau concept qui s'applique dans le domaine de la planification des soins à domicile à savoir la pénibilité. Ce concept est considéré comme résultant d'une situation de travail difficile et contraignante, pouvant causer un désintérêt, une situation de stress voire une dégradation de l'état de santé du travailleur. Dans une première étape, nous rappelons quelques travaux existants dans la littérature qui traitent les problèmes de pénibilité et nous décrivons les critères de la pénibilité que nous considérons dans le cadre de la planification des soins à domicile dans une deuxième étape. La modélisation par une fonction objectif non linéaire à base de seuils de pénibilité nécessite des adaptations aux méthodes classiques de calcul de tournées de véhicules et d'affectation de tâches.

Le chapitre 5 aborde la dernière problématique de cette thèse. Le problème adressé dans ce chapitre traite le problème de sectorisation dans le cadre de l'hospitalisation à domicile en raison de l'importance d'une telle décision dans la réalisation des objectifs des soins à domicile. Une étude de la littérature est adressée dans un premier temps. Notre contribution porte sur la définition des critères de couverture robustes originaux qui permettent d'utiliser un algorithme d'optimisation en deux phases.

L'objectif de ces diverses contributions est donc de développer des modèles mathématiques et des méthodes d'optimisation pour la planification des soins à domicile et des ressources humaines en partant des projets thérapeutiques des patients et en prenant compte des comportements des acteurs (patients et soignants) et des incertitudes. Les méthodes d'optimisation proposées dans ce manuscrit permettent aux décideurs, par exemple, d'évaluer le temps total d'une tournée d'un infirmier et de faciliter la gestion de leurs tournées.

Ce mémoire se termine par une conclusion générale où un bilan des travaux réalisés et des résultats obtenus est présenté. Plusieurs pistes de recherche futures y sont également proposées.

Chapitre 1

L'Hospitalisation À Domicile en France

Sommaire

1.1	Introduction	6
1.2	Le système de santé en France	7
1.2.1	Les établissements de santé	7
1.2.2	Les alternatives à l'hospitalisation	8
1.2.3	Les réseaux de soins	10
1.3	L'Hospitalisation À Domicile en France	11
1.3.1	Concept de l'HAD	11
1.3.2	Historique de l'HAD	11
1.3.3	Structure et organisation des établissements d'HAD	13
1.4	Positionnement et recours à l'HAD	15
1.4.1	Le positionnement de l'HAD dans l'offre générale de soins	15
1.4.2	Intérêts de l'hospitalisation à domicile	16
1.4.3	Impacts médico-économiques des soins à domicile	17
1.4.4	Freins au développement de l'hospitalisation à domicile	18
1.5	L'admission et le projet thérapeutique (PTh)	19
1.5.1	L'admission et le déroulement du séjour du patient au sein de l'HAD	19
1.5.2	Le projet thérapeutique	21
1.6	Exemples de fonctionnement des établissements d'HAD en France	22
1.6.1	HAD-43 de Puy-en-Velay	22
1.6.1.1	Présentation du service et ses objectifs	22
1.6.1.2	Organisation du service	23
1.6.1.3	Gestion des flux et chiffres	24
1.6.2	HAD Groupement de Coopération Sanitaire (GCS)	24
1.6.2.1	Présentation de l'établissement et ses objectifs	24

1.6.2.2	Organisation des circuits des médicaments	25
1.6.2.3	Chaîne logistique et incertitudes	25
1.6.2.4	Le projet thérapeutique au sein de HAD-GCS	26
1.6.3	L'établissement d'hospitalisation à domicile de Cébazat-63	27
1.6.4	HAD Sallanches	28
1.7	Conclusion	29

1.1 Introduction

La recherche d'une meilleure organisation du système de la santé, et plus particulièrement des fournisseurs de soins, mène nécessairement à une amélioration de l'organisation et de la logistique de l'hospitalisation traditionnelle, mais aussi à l'étude de ses différentes alternatives. Les structures d'hospitalisation à domicile sont des établissements d'hospitalisation sans hébergement soumis aux mêmes obligations que les établissements hospitaliers privés et publics. L'HAD se doit d'être généraliste et polyvalente même s'il se développe des structures HAD aux compétences plus spécifiques. L'admission en HAD est obligatoirement soumise à prescription médicale et doit recueillir l'accord explicite du patient ou de son représentant. La polyvalence et la coordination des soins doivent être la priorité pour une prise en charge de qualité des patients. L'idée étant de développer le plus possible et de coordonner les soins à domicile via une équipe pluridisciplinaire. Les établissements d'hospitalisation à domicile représentent une forme de prise en charge alternative à l'hospitalisation à temps complet définie par la circulaire du ministère des affaires sociales du 12 mars 1986¹ comme étant « l'ensemble des soins médicaux et paramédicaux délivrés à domicile à des malades dont l'état ne justifie pas le maintien dans une structure hospitalière ».

Ce chapitre sera formalisé comme suit : dans la section 1.2 nous approfondissons le système de santé en France en mettant l'accent sur les différents types d'établissement de santé. Dans la section 1.3, nous décrivons le système d'hospitalisation à domicile en France en introduisant le concept de l'HAD et son histoire. La section 1.4 est réservée pour décrire le positionnement et le recours à l'HAD. Nous exposons l'admission et le déroulement du séjour du patient au sein de l'HAD dans la section 1.5. Enfin, dans la section 1.6 pour bien mener notre travail sur le terrain, nous décrivons brièvement les différents établissements HAD en France que nous avons visités.

1. Circulaire du 12 mars 1986 relative à l'hospitalisation à domicile dans les établissements publics

1.2 Le système de santé en France

La santé de la population est entendue dans un sens beaucoup plus large que l'état de non maladie. Le système de santé est défini comme l'ensemble des moyens et activités dont la fonction est la production de santé dans le sens de promouvoir, prévenir l'apparition des facteurs de risque ou de maladies, guérir, réduire les conséquences des maladies sur le plan professionnel et social (secteurs curatif, préventif et médico-social). Le système de santé français, tel qu'il est structuré aujourd'hui, est le fruit d'une longue évolution. Si son histoire suit celle des politiques sociales visant à couvrir le risque maladie, elle reste intimement liée au développement de l'hôpital et du secteur médical.

1.2.1 Les établissements de santé

Le système hospitalier² se compose de 2710 établissements de santé avec une capacité d'environ 416700 lits d'hospitalisation à temps complet et plus de 63000 places réservées aux patients pris en charge de manière ponctuelle. Trois catégories scindent le système hospitalier français à savoir : les établissements publics, les établissements privés à but non lucratif et les établissements commerciaux connus sous le nom de « cliniques ». La figure 1.1 représente une vue globale sur l'ensemble des établissements existants en France³. Cette diversité des établissements hospitaliers se décompose en trois catégories :

- Les établissements publics exerçant dans le domaine sanitaire (hôpitaux), social (maisons de retraite) et médico-social (centres d'accueil spécialisés). Sous la dénomination générique « d'hôpital public ». On distingue deux catégories principales d'Établissement Public de Santé (EPS) : les Centres Hospitaliers Régionaux (CHR) d'une part, les Centres Hospitaliers (CH) ou Centres Hospitaliers Généraux (CHG) d'autre part.
- Les hôpitaux privés à but non lucratif, ou hôpitaux privés représentent 58436 lits et 11359 places de jour. Ces établissements assurent une prise en charge globale des malades. Généralement administrés par des associations, sociétés mutualistes ou fondations, ils bénéficient notamment d'une autonomie de gestion. Ils suivent néanmoins un mode de financement semblable aux hôpitaux publics et obéissent aux mêmes obligations de prise en charge des patients. En plus des Structures de Soins Infirmiers À Domicile (SSIAD) ou d'hébergement des personnes âgées dépendantes (Ehpad), le secteur privé non lucratif assure une grande partie de l'offre d'hospitalisation à domicile (HAD).
- Les hôpitaux privés à but lucratif, ou cliniques privées, sont la propriété des particuliers ou des sociétés commerciales et sont autorisés à faire des bénéfices. Ces

2. Le panorama des établissements de santé, édition 2012, Drees, (données 2010)

3. Source : ministère de la Santé - DGOS - Avril 2008

Partage du champ selon :		Établissements de santé					
la catégorie d'établissement	Établissements publics de santé				Établissements de santé privés		
	Centres hospitaliers régionaux (CHR)	Centres hospitaliers généraux (CH)	Centres hospitaliers psychiatriques (CHS)	Hôpitaux locaux (HL)	Autres établissements	Établissements antérieurement financés par dotation globale	Autres établissements privés
						Établissements de soins de courte durée	
						Centres de lutte contre le cancer (CLCC)	
						Établissements de lutte contre les maladies mentales	
						Établissements de soins de suite et de réadaptation	
						Établissements de soins de longue durée	
						Établissements d'hospitalisation à domicile	
						Établissements de dialyse	
						Établissements de radiothérapie	
le statut	Secteur public				Secteur privé		
	Secteur non lucratif					Secteur lucratif	
les modalités de financement	Objectif des dépenses relatives aux activités MCO (ODMCO) Financement à l'activité						
	Dotation annuelle complémentaire provisoire (DAC)						
	Missions d'intérêt général et d'aide à la contractualisation (MIGAC) / Dotations spécifiques						
	Objectif des dépenses d'assurance-maladie (ODAM) relatives aux activités de SSR et de psychiatrie Dotation annuelle de financement (DAF)					Objectif quantifié national (OQN) relatif aux activités de SSR et de psychiatrie	

FIGURE 1.1 – *Établissements de santé en France*

établissements comptent plus de 97600 lits et près de 14000 places de jour. Se sont des sociétés commerciales avec des capitaux propres et soumises à un régime juridique de droit privé.

1.2.2 Les alternatives à l'hospitalisation

Ces dernières années, les modes d'hospitalisation à domicile ou d'accueil temporaire en Ehpad se développent pour mieux répondre aux attentes des patients dépendants, accorder un temps de répit aux aidants et permettre une meilleure régulation de l'offre hospitalière. Rechercher une meilleure organisation du système de santé nécessite bien évidemment le passage par une étape qui s'avère très importante qui consiste à l'amélioration de l'organisation et de la logistique de l'hospitalisation traditionnelle. Cela a impliqué l'étude et le développement de ses différentes alternatives. Ces alternatives correspondent à plusieurs formes de prise en charge des patients sur une durée ne dépassant pas la journée ou la nuit. Les structures alternatives doivent permettre aux malades de bénéficier du plateau technique et des compétences générales de l'hôpital sans pour autant qu'il soit coupé de son cadre de vie habituel. Trois décrets de 1992 complétés par un décret de 1994 sont

définis sur le plan des modalités de création et de fonctionnement spécifique à l'anesthésie et la chirurgie ambulatoire. Ces décrets distinguent trois types d'alternatives :

- Les structures d'hospitalisation à temps partiel, de jour ou de nuit ;
- Les structures d'anesthésie et de chirurgie ambulatoire ;
- Les structures d'hospitalisation à domicile.

Dans cette classification, l'hospitalisation à temps partiel est une hospitalisation de moins d'un jour. Elle concerne l'accueil de jour ou de nuit et les unités ayant des activités d'anesthésie ou de chirurgie ambulatoire. Elle fait partie, avec l'hospitalisation à domicile (HAD), des alternatives à l'hospitalisation à temps complet. Les structures d'anesthésie et de chirurgie ambulatoire permettent de réduire à quelques heures la durée d'hospitalisation, tout en offrant des conditions de sécurité identiques à celle d'une hospitalisation conventionnelle. Ces structures permettent au patient de regagner son domicile le jour même de son intervention et de bénéficier d'un suivi postopératoire à domicile. L'hospitalisation à domicile concerne les malades atteints de pathologies graves, aiguës ou chroniques, évolutives et/ou instables qui, en l'absence d'un tel service, seraient hospitalisés en établissement de santé. Elle permet d'assurer au domicile du malade des soins médicaux et paramédicaux continus et coordonnés. Son fonctionnement médical est organisé par un médecin coordinateur. Une autre classification a été proposée par [Zerbib 1990] :

- Alternatives à l'intérieur de l'hôpital : Hôpital de jour, Chirurgie ambulatoire ;
- Alternatives en structure ouverte (organisme du secteur psychiatrique) ;
- Alternatives au domicile du patient : Hospitalisation À Domicile (HAD), Soins À Domicile (SAD), Traitements Spécialisés À Domicile (TSAD), Maintien À Domicile (MAD).

Lors de cette classification, les soins à domicile sont notamment présentés suivant une notion de « soins gradués » qui se base sur une échelle d'intensité de soins. Dans un premier niveau, se situe le Maintien À Domicile (MAD). Il est aujourd'hui rendu possible par les progrès des techniques (télésurveillance et téléalarme) et par la coordination efficace des professionnels de santé et des services sociaux (transports organisés, portage de repas à domicile, aide ménagère et travaux d'entretien, garde à domicile...). Dans un niveau secondaire, se positionne les Services de Soins Infirmiers À Domicile (SSIAD) pour une surveillance médicale et autres soins d'hygiène et paramédicaux. Ce sont des services sociaux et médico-sociaux au sens du code de l'action sociale et médico-sociale. Les SSIAD interviennent sur prescription médicale auprès des personnes âgées de plus de 60 ans malades ou dépendantes et aux personnes de moins de 60 ans handicapées ou atteintes d'une maladie chronique. Les SSIAD ont pour mission d'intervenir au domicile des patients ou dans les établissements non médicalisés prenant en charge des personnes âgées ou des personnes handicapées. Leurs interventions auprès des personnes âgées ont pour objectif de prévenir la perte d'autonomie, d'éviter une hospitalisation, de faciliter le retour à domicile après une hospitalisation ou enfin de retarder une entrée dans un établissement d'hébergement.

1.2.3 Les réseaux de soins

Un réseau de soins est une sorte de collaboration de professionnels de santé de disciplines différentes (Centre Hospitalier, médecins généralistes, médecins spécialistes, pharmaciens, infirmiers, kinésithérapeutes, mais aussi psychologues et travailleurs sociaux). Ces professionnels se concentrent sur la prise en charge de patients souffrant d'une pathologie ou victimes d'un problème médico-social spécifiques. Les réseaux de santé ont pour objet de favoriser l'accès aux soins, la coordination, la continuité ou l'interdisciplinarité des prises en charge. Ils assurent une prise en charge adaptée aux besoins de la personne tant sur le plan de l'éducation à la santé, de la prévention, du diagnostic que des soins. Les pathologies prises en charge par ces réseaux sont le plus souvent chroniques (asthme, diabète, hypertension artérielle, dépression) ou lourdes (VIH, VHC, cancers). Il existe aussi des réseaux prévenant et prenant en charge l'alcoolisme, la toxicomanie ou l'aide aux populations en difficulté.

L'objectif d'un réseau est aussi d'accompagner des patients mal ou non soignés et leur faciliter les démarches difficiles à effectuer. La constitution des réseaux présente plusieurs intérêts. Elle permet aux acteurs d'accéder à une meilleure position sur le marché, de partager leurs coûts, mutualiser leurs capacités et leurs compétences, ainsi que de faciliter l'accès aux technologies de pointe et l'échange de bonnes pratiques. Par ailleurs, ceci nécessite la mise en place d'un système d'information adéquat permettant aux professionnels de santé de diffuser les recommandations et les bonnes pratiques, et permettant aux patients ainsi qu'à leur entourage, d'accéder à des informations pratiques supportant leur éducation quant à la maladie traitée [Jebalia 2008].

Dans la plupart des pays, il n'y a pas véritablement d'HAD sous les mêmes contraintes qu'en France. En effet, la distinction n'est pas faite entre hospitalisation à domicile et soins à domicile voire même service à la personne. La patientèle sur un territoire est réduite et les contraintes associées suivent le fonctionnement d'un séjour interne à l'hôpital. Les durées de séjours moyens sont courts (environ deux semaines), la continuité des soins (même infirmière suivant un patient) n'a donc que peu de sens, on attend du patient qu'il soit toujours disponible pour les soins et le suivi du protocole de soin est strict. L'hospitalisation à domicile existe également à l'étranger depuis plusieurs années. En France, l'HAD s'est développée à cause de la surcharge des lits hospitaliers et de la volonté de baisse des coûts de prise en charge, mais dans d'autres pays les motivations peuvent différer. Par exemple en Australie l'hospitalisation à domicile désignée par « Hospital in the home » est développée à cause non seulement de la liste des files d'attente à l'hôpital mais aussi à cause du maintien des soins dans certaines zones rurales ou à cause de la décentralisation de l'organisation des soins.

1.3 L'Hospitalisation À Domicile en France

1.3.1 Concept de l'HAD

Les soins à domicile sont une large gamme de services de soins de santé qui peuvent être donnés chez les patients. Les soins à domicile sont généralement moins coûteux, plus pratiques, et tout aussi efficaces par rapport aux soins obtenus dans un hôpital ou un établissement de soins infirmiers spécialisés. Cette structure s'appelle l'Hospitalisation À Domicile (HAD), permettant d'assurer au domicile du patient des soins médicaux et paramédicaux importants, pour une période limitée mais renouvelable en fonction de l'évolution de l'état de santé du patient. Ces structures sont confrontées à de multiples problématiques, nous retrouvons par exemple la gestion du planning du personnel médical (médecins, infirmiers, soignants, aides-soignants, . . .), l'élaboration des tournées de visites et de livraisons chez le patient, et enfin la planification quotidienne des soins chez le patient. L'objectif des soins de santé à domicile consiste à traiter une maladie ou une blessure. Les soins à domicile permettent d'aider à aller mieux, retrouver l'autonomie, et de devenir aussi autonome que possible.

L'HAD répond à une demande générale et croissante de prise en charge à domicile. Etre soigné à domicile constitue en effet, pour l'immense majorité des malades, un confort moral et matériel indéniable. Cette « demande de domicile » s'exprime très fortement pour les soins palliatifs, une forte majorité de français déclarant vouloir mourir à domicile, alors qu'actuellement, moins d'un tiers y décède.

1.3.2 Historique de l'HAD

Apparue il y a un peu plus de cinquante ans en France, l'hospitalisation à domicile s'est peu à peu structurée et affirmée dans le paysage sanitaire. Elle constitue désormais une forme d'hospitalisation à part entière apportant des soins continus et coordonnés à des patients souffrant de pathologies graves, aiguës ou chroniques. La première expérience française d'un système de soins à domicile a été formulée dans les années 50 par le professeur SIGUIER⁴ à Tenon dans le cadre de l'assistance publique, en réponse à un problème d'engorgement des hôpitaux lié à un manque de lits hospitaliers, mais aussi à l'apparition de matériels de plus en plus performant. Il s'agit d'une organisation similaire aux « home care » à partir de son service de médecine générale.

En 1956, les soins à domicile commencent à l'Institut Gustave Roussy puis progressivement, d'autres centres destinés aux malades cancéreux ont été créés progressivement. Cette initiative fut tentée à Puteaux par le professeur DENOIX en 1958, directeur de l'hôpital

4. AP-HP Histoire, Musée, Archives Historique de l'hôpital, hospitalisation à domicile

Gustave Roussy de Villejuif. La conception française de l'hospitalisation à domicile introduit une innovation par rapport au système américain en choisissant de s'appuyer sur la médecine libérale pour assurer la continuité des traitements des malades [Zerbib 1990]. En 1961, la première convention entre la Caisse Primaire d'Assurance Maladie (C.P.A.M) de l'Ile de France et les deux structures d'HAD existantes à savoir l'Assistance Publique - Hôpitaux de Paris (AP-HP) et « Santé Service » qui était alors destinée aux malades souffrant d'un cancer a été signée suite à la réussite de cette forme de soins. Un certain nombre de métiers est représenté à savoir le médecin hospitalier et le médecin traitant, l'assistante sociale, l'infirmière, l'aide-soignant et l'aide-ménagère. Cette convention a mis au point les premiers budgets et le prix de journée [Lataste 1997].

Bien que cette convention ait été signée, il faut attendre la loi hospitalière du 31 décembre 1970 pour que cette forme d'hospitalisation soit officiellement reconnue. Cette loi hospitalière donne à l'HAD une existence légale : « les services des centres hospitaliers peuvent se prolonger à domicile, sous réserve du consentement du malade ou de sa famille, pour continuer le traitement avec le concours du médecin traitant ». La même loi présentait les services d'HAD comme un prolongement d'une hospitalisation traditionnelle. Cette loi a été suivie par la circulaire de la Caisse Nationale d'Assurance Maladie (CNAM) du 29 octobre 1974 qui fixait les règles de création ainsi que les critères et les conditions d'admission en HAD. Après une certaine stagnation dans les années 80 liée à de multiples facteurs (réticences des prescripteurs hospitaliers, prudence accrue de l'assurance maladie et des autorités de tutelle), une nouvelle phase s'ouvre avec la loi de 1991 portant réforme hospitalière qui reconnaît l'HAD comme une alternative à part entière à l'hospitalisation complète. Ce texte et ses décrets d'application fixent les règles constitutives de l'HAD : médecin coordonnateur, cadre infirmier, permanence des soins et continuité de la prise en charge. À partir des années 90, le nombre d'établissements HAD a connu une évolution en passant de 40 en 1992 à 62 en 2000.

L'HAD prend un véritable essor à partir de l'an 2000. La circulaire ministérielle du 30 mai 2000 spécifie que l'hospitalisation à domicile apporte des « soins médicaux et paramédicaux continus et coordonnés. Ces soins se différencient de ceux habituellement dispensés à domicile par la complexité et la fréquence des actes ». Il s'agit donc d'une prise en charge hospitalière à part entière de malades souffrant de pathologies graves, aiguës ou chroniques dont elle permet de raccourcir, différer ou éviter l'hospitalisation complète. Les HAD sont d'ailleurs des établissements de santé, soumis aux mêmes obligations que les établissements hospitaliers avec hébergement. Par la suite, deux circulaires, prises en application de l'ordonnance du 4 septembre 2003, ont clarifié le positionnement de l'HAD dans le système de santé. La circulaire du 4 février 2004 précise les modalités de prise en charge générale. Celle du 1er décembre 2006 rappelle le caractère polyvalent et généraliste de l'HAD, son régime d'autorisation, ses obligations (sécurisation pharmaceutique, soins palliatifs, continuité des soins), le rôle des différents acteurs internes et externes et son

positionnement au sein de l'offre de soins locale.

1.3.3 Structure et organisation des établissements d'HAD

Une structure d'HAD impose la coordination entre de multiples intervenants (acteurs). En effet, elle intervient elle-même dans un réseau plus étendu impliquant plusieurs modes de prise en charge. Cette prise en charge implique des intervenants hospitaliers et libéraux. Ces acteurs sont des professionnels de santé salariés des hôpitaux publics ou privés : médecins généralistes, infirmiers, aides-soignants, kinésithérapeutes, ergothérapeutes, diététiciens, assistants sociaux, psychologues, prestataires de services. Afin de mieux appréhender le système, des définitions plus explicites des principaux acteurs de l'HAD sont nécessaires apportant de la sorte un éclairage sur la place de chacun dans le système ainsi que sur la nature de ses interactions avec les autres. Nous retrouvons les acteurs suivants :

- Le médecin hospitalier : transmet les informations relatives à ses patients, élabore le projet thérapeutique en lien avec l'équipe HAD, et il s'engage à suivre ses patients au niveau hospitalier et à les ré-hospitaliser si nécessaire. Notamment, il assure le lien entre l'établissement d'HAD et l'établissement hospitalier dont il fait partie.
- Le médecin traitant : qu'il soit ou non le prescripteur, le médecin traitant reste cependant le pivot dans l'organisation d'une HAD. Il est le responsable de la prise en charge qu'il a défini en concertation avec l'équipe médicale et paramédicale. Ce projet de soins comprend : les objectifs de la prise en charge, les actions à mettre en place (médicales, paramédicales, psychologiques et/ou psychosociales) et la durée des soins. Il assure donc le suivi médical, la surveillance des soins lors de ses visites. A cette occasion, il adapte si nécessaire les traitements et peut faire intervenir un médecin spécialiste après recueil de l'avis du médecin coordonnateur. Il est responsable de son diagnostic et de ses prescriptions. Il est le garant avec le médecin coordonnateur, du début à la fin de la prise en charge, de la qualité de l'information concernant le malade, de son état de santé et de son traitement.
- Le médecin coordonnateur : joue un rôle central dans l'HAD. Il est l'intermédiaire principal entre la structure d'HAD, l'hôpital (le médecin hospitalier) et la médecine de ville (médecin libéral). Il donne un avis sur les admissions des personnes à accueillir en veillant notamment à la compatibilité de leur état de santé avec les capacités de soins de l'institution. Il organise la coordination des professionnels de santé salariés et libéraux exerçant dans l'établissement ; Evalue et valide l'état de dépendance des patients. Il élabore conjointement avec l'équipe soignante du service d'HAD le projet thérapeutique du patient admis, et évalue régulièrement sa situation et son environnement avec le personnel paramédical et social et en lien avec le médecin traitant. En effet, il a un rôle de formateur auprès de l'équipe soignante, et participe à l'évaluation de la qualité du service et aux décisions stratégiques de l'établissement d'HAD.

- L'assistante sociale : coopère étroitement avec l'équipe de la structure d'HAD. Au travers d'une enquête, elle essaie de déterminer avec la famille les problèmes sociaux et financiers ainsi que les besoins du malade. Cette évaluation sociale est préalable à l'admission. Le projet thérapeutique prend en compte l'aspect social qui peut consister en besoins d'aides supplémentaires (aide-ménagère, travailleuse familiale, repas à domicile et garde à domicile). Cet aspect doit également être réévalué périodiquement. Ce service a aussi pour rôle essentiel d'aider les familles dans les démarches socio administratives pour assurer la sortie du patient dans de bonnes conditions.
- IDE (Infirmière Diplômée d'État) : nommée également infirmière à domicile. Elle assure les soins infirmiers, d'hygiène générale et aide à l'accomplissement des actes essentiels de la vie. Son objectif est le maintien, l'insertion ou la réinsertion d'un patient dépendant dans son cadre de vie familial et social. Selon la prescription du médecin traitant, une infirmière est également chargée de coordonner l'intervention d'Aides Soignants (AS) et éventuellement d'autres auxiliaires médicaux (kinésithérapeutes, assistantes sociales).
- L'infirmier libéral : une personne exerçant une activité libérale est une personne établie à son compte qui ne fait pas partie de l'industrie et du commerce et qui exerce une profession dont l'activité demande une instruction supérieure. L'infirmier libéral signe avec la structure HAD une convention d'exercice libérale précisant les prestations fournies, les tarifs appliqués, les modalités et délais de paiement, durée du contrat, conditions de renouvellement, de rupture, etc., et, point important : l'indépendance professionnelle de l'infirmier.
- Le psychologue : tout patient en HAD est atteint d'une pathologie grave, aiguë et/ou chronique, ou encore relève de plusieurs pathologies. Il est évident que des difficultés découlent de cet état de fait. C'est pour cette raison, que tout patient subissant sa maladie, qu'elle soit chronique ou grave, le psychologue de l'HAD peut lui proposer un soutien psychologique, s'il le souhaite (ou à sa famille, selon certains critères). Le psychologue préserve la vie privée des personnes en garantissant le respect du secret professionnel. Par conséquent, le patient, s'il le souhaite, peut se confier, s'exprimer en toute liberté, sans crainte d'être jugé. Le psychologue de l'HAD est un intervenant neutre qui n'est pas impliqué dans le soin lui-même. Il peut donc tenter de désamorcer, objectivement, des états de tension dans le cadre d'un suivi psychologique modéré dans l'unique but de soulager la souffrance morale. Aujourd'hui, la présence des infirmiers référents ou coordinateurs est devenue une condition quasi-indispensable au conventionnement des Ehpad.
- L'infirmière coordonnatrice est l'interlocutrice privilégiée pour les médecins prescripteurs hospitaliers ou libéraux. Elle suit l'accompagnement des résidents et de leurs familles. Il s'agit de sa participation à l'examen des demandes d'admission et à l'accueil des entrants (première visite notamment), de l'élaboration et de la mise en place

des projets de soins et de vie individualisés, de la coordination des soins (travail avec le médecin coordonnateur et les autres intervenants, et gestion des médicaments) - et du remplacement de l'IDE parfois -, de la gestion de l'urgence (mise en place de protocoles, formation du personnel), de l'évaluation des résidents (participation au « girage⁵ » et autres codages), de la gestion de la fin de vie (directives anticipées, information de la famille), et enfin, de sa participation au conseil de la vie sociale. Elle peut intervenir, notamment, dans l'organisation du planning en passant par la gestion de l'absentéisme, la formation des personnels, la prévention et la gestion des conflits ou bien l'accueil des stagiaires.

- L'aide-soignante : elle participe à l'accueil des patients (installation, aide à l'autonomie) et à leur accompagnement dans les différents pôles de soins, dont la balnéothérapie, en lien avec l'IDE et les paramédicaux rééducateurs. Elle assure, également, la prévision des plateaux repas et aides aux repas pour les patients hospitalisés à la journée, ainsi que la désinfection des salles et la réfection des lits.
- La kinésithérapeute : elle assure un rôle éducationnel (par exemple : douleurs chroniques). Elle assure les bilans et les techniques de rééducation classique, les soins de balnéothérapie. Elle peut participer à certains programmes spécifiques (réentraînement à l'effort). Elle maîtrise l'utilisation de l'ensemble du plateau technique disponible. Enfin, elle assure la surveillance et la mise en place de l'appareillage en coordination avec l'orthoprothésiste et le médecin.
- L'équipe administrative : prend en charge le suivi administratif et logistique du dossier du patient, ainsi que la mise en place des moyens matériels nécessaires à ses soins et à son confort.

D'après [Jebalia 2008] l'ensemble de ces acteurs peut être placé dans une matrice résultant d'un croisement entre la nature des services thérapeutiques fournis dans le cadre d'une HAD (volets médical, social, psychologique), et la provenance des acteurs (hôpital, HAD, environnement/ ville), comme l'illustre la figure 1.2

1.4 Positionnement et recours à l'HAD

1.4.1 Le positionnement de l'HAD dans l'offre générale de soins

Comme on l'a déjà mentionné, l'HAD fait tout d'abord partie des modes de prise en charge visant à favoriser le maintien à domicile et donc à restreindre le recours à l'hospitalisation complète. Elle participe ainsi à la régulation des soins et son développement peut être à terme facteur de désengorgement des urgences et des lits hospitaliers. De manière

5. Évaluation du niveau de dépendance des résidents d'un établissement permettant le classement des résidents par niveau de dépendance

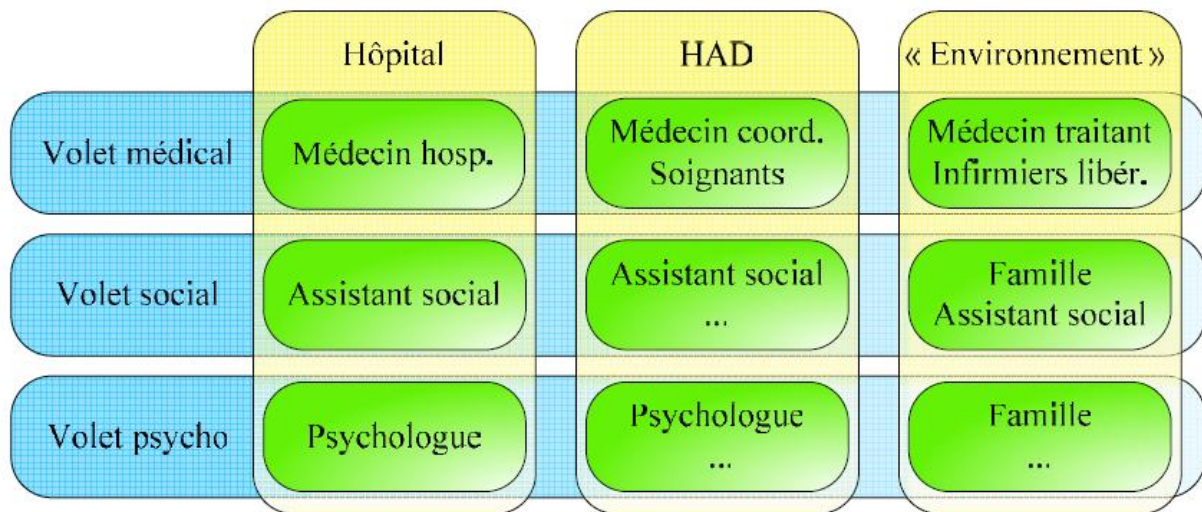


FIGURE 1.2 – Acteurs intervenant dans la prise en charge d'un patient en HAD

plus générale, l'HAD respecte le choix et le souci de confort psychologique et physique du patient en le repositionnant au cœur de la décision et du suivi de la prise en charge. Dans une logique proche, ce mode d'hospitalisation respecte les liens existant entre le malade et son médecin traitant, qu'elle maintient au centre du processus décisionnel, en lien avec l'ensemble des autres acteurs de la sphère sanitaire et médico-sociale.

1.4.2 Intérêts de l'hospitalisation à domicile

Aujourd'hui, l'HAD est considérée comme une garante du choix et de la qualité de vie du patient et de ses proches. Même si le choix exprimé par les patients plaide pour le développement de l'hospitalisation à domicile qui correspond davantage à leur souhait de se réappropriier leur prise en charge dans un univers moins anxiogène, la superposition entre espace de soins et lieu de résidence n'est pas toujours facile et connaît parfois des limites qu'il convient d'anticiper par un vrai bilan complet de l'environnement avant admission en HAD. Lors d'un épisode de crise chez un patient, en particulier chez un sujet âgé, une hospitalisation est souvent génératrice de perturbations. Le malade souvent âgé est parfois désorienté par le transport et l'hospitalisation qui favorisent les pertes de repères et constituent des facteurs d'aggravation de la pathologie. L'arrivée bien souvent non préparée des patients aux urgences participe à l'engorgement de ces dernières au grand désagrément du patient qui attend parfois longtemps une décision médicale prise quelquefois après de longs et coûteux bilans biologiques ou d'imagerie.

L'HAD intervenant de manière coordonnée mais ponctuelle au domicile du patient, celui-ci ou son entourage est donc en toute logique davantage sollicité. L'hospitalisation à domicile passe par la prise en charge par le patient ou par ses proches de certaines tâches ou

actes médicaux rapatriés dans la sphère domestique. Le patient ou ses aidants intègrent de fait l'équipe soignante en tant qu'acteurs de la prise en charge. L'éducation thérapeutique du patient et des aidants « naturels », passage obligé qui permet que s'accomplissent en toute sécurité ces gestes et attitudes de soins effectués par des non professionnels et rééquilibre la relation soignant-soigné.

L'hospitalisation à domicile concourt alors à la responsabilisation des malades à l'égard de leur processus de soins. Ces derniers sont dès lors plus réceptifs aux traitements mis en œuvre, ils retrouvent leur place, leur dignité.

1.4.3 Impacts médico-économiques des soins à domicile

La mise en place d'un protocole de soins entre l'hospitalisation avec hébergement et l'hospitalisation à domicile pourrait améliorer la qualité des soins et réduire les ruptures dans la continuité des soins du système de santé Français. Dans une étude récente [Chevalier *et al.* 2015], les auteurs ont évalué les impacts sur les pratiques professionnelles en HAD de la mise en place d'un protocole avec un service de chirurgie urologique. L'étude qualitative consiste à interroger 20 professionnels (infirmiers, cadres et médecins) de l'HAD et d'un service d'urologie de l'Assistance Publique des Hôpitaux de Paris (AP-HP) par un médecin de santé publique. Les résultats montrent une amélioration de la traçabilité des soins, un renforcement de la sécurité des soins produits, une plus forte homogénéisation des pratiques et une plus grande continuité dans les interventions. Les impacts de la mise en place du protocole de soins sont encourageants sur la qualité des soins produits. Ces résultats montrent l'intérêt de généraliser cette démarche à d'autres services hospitaliers afin d'améliorer la continuité des interventions entre l'hospitalisation avec hébergement et l'HAD.

Dans l'étude de [Peter 2015], l'auteur a mené un protocole d'étude qui consiste à chercher l'impact de l'intervention d'une équipe de soins palliatifs à domicile en fin de vie sur les hospitalisations ou les admissions en urgence à l'hôpital. L'analyse des données fournies par les équipes de soins à domicile se sont mises en place indépendamment les unes des autres dans différentes régions de l'Ontario (Canada) sur une période de 3 ans (2009 - 2012). Plusieurs critères ont été utilisés pour juger l'impact de l'intervention des équipes de soins palliatifs à domicile : hospitalisation au cours des deux dernières semaines de vie ; la visite au service des urgences au cours des deux dernières semaines de vie ; le décès à l'hôpital et enfin l'analyse de sensibilité pour tenir compte des différences dans la composition du groupe témoin. Les résultats montrent que 31,2% des patients traités par une équipe de soins à domicile versus 39,3% des patients qui recevaient les soins classiques ont été hospitalisés au cours de leurs deux dernières semaines de vie. D'après les résultats trouvés, l'auteur conclut que les équipes de soins palliatifs à domicile, malgré les différences dans leur composition et leur situation géographique, sont efficaces pour limiter le recours

aux soins aigus en fin de vie et le nombre de décès à l'hôpital.

Dans sa thèse en médecine [Lasserre 2010], l'auteur s'est intéressé au sujet des soins palliatifs par l'HAD de Dax. L'étude consiste à chercher les besoins auprès de quinze personnes (proches ou des aidants naturels) ayant accompagné un patient suivi en soins palliatifs par l'HAD. D'après cette étude, il constate que la majorité des besoins les plus importants, selon les proches, sont : les soins apportés au mourant avec bien sûr le soulagement de ses symptômes et en premier lieu de la douleur ; la coordination des différents soignants ; et l'accompagnement fait au quotidien par les infirmiers et aides-soignants. Il mentionne que la pluridisciplinarité de l'accompagnement d'un patient en soins palliatifs ainsi que ses proches est une étape cruciale.

Dans les travaux de [Exley & Allen 2007], les auteurs examinent l'influence des soins à domicile sur la famille et le personnel soignant grâce à des données générées par le biais de trois projets de recherche. Le but de la première étude consiste à examiner de manière critique les expériences des personnes souffrant d'un cancer. La deuxième étude vise à comparer la prestation des soins palliatifs dans la communauté des personnes souffrant d'un cancer avec ceux qui étaient entrain de mourir avec des maladies non malignes. D'où, cette étude permet de comparer l'apport de soins à domicile pour des personnes en phase terminale d'un cancer. La troisième étude se base sur un service d'évaluation d'un nouveau service à domicile de fin de vie conçu pour permettre aux gens de mourir à la maison. Ces études permettent d'évaluer et identifier les inconvénients des soins à domicile. Les auteurs suggèrent que les professionnels de santé ont besoin de penser de façon plus critique au sujet de la façon dont les soins sont délivrés. Il s'avère que les soins à domicile est le meilleur procédé de soins dans un contexte institutionnel et domestique. Les auteurs affirment que les soins à domicile favorisent l'établissement de rapports humains.

1.4.4 Freins au développement de l'hospitalisation à domicile

La prise en charge à domicile présente plusieurs désagréments pour le patient : dépendance vis-à-vis de la famille, souffrance physique, peur de la présence de personnes étrangères au domicile, peur de la solitude au domicile, passage irrégulier du personnel, manque de personnel libéral, etc. Assurer le retour au domicile exige en premier lieu que le malade ne vive pas seul. Le retour à domicile (après l'hospitalisation en établissement) va demander une plus grande implication des proches auprès du malade. La famille doit être prête à assumer une certaine charge tant matérielle que psychologique. Le retour à domicile du patient peut générer des inconvénients tels que la fatigue et l'anxiété, la surcharge de travail domestique, l'obligation de présence et de garde pour la famille et les proches du patient. Le domicile du patient doit être suffisamment spacieux pour permettre l'installation de tout le matériel nécessaire : lit médicalisé, fauteuil roulant, chaise percée, etc. Pour toutes ces raisons, le contact avec le malade et sa famille avant l'organisation du retour

est primordiale. Certains médecins libéraux considèrent l'HAD comme une responsabilité plus lourde à assumer surtout en termes de disponibilité, en raison de l'intensité des soins nécessaires et du degré de gravité atteint par certains patients. Pour que la prise en charge à domicile s'intègre totalement dans le système de soins, il convient de promouvoir la mise en place d'une culture de l'hospitalisation à domicile. Celle-ci se définit tout simplement par la confiance que tous les acteurs de santé et les patients doivent avoir dans ce mode de prise en charge. Les praticiens hospitaliers, les médecins libéraux ainsi que dans certains cas, les malades hésitent encore à avoir recours à ce type de prise en charge. Pourtant, ce manque de confiance paraît infondé, d'autant plus que les obstacles institutionnels ont été levés. Il est tout d'abord important de promouvoir le lien ville-hôpital. L'HAD doit en effet faire face à un hospitalo-centrisme persistant, véritable handicap dans le fonctionnement même de ce type de structure. Pour surmonter ce problème culturel, il faut renforcer les liens entre les établissements de santé, la médecine de ville et l'HAD, et développer la concertation et la coordination entre ces différents partenaires. Cela peut se traduire par des conventions de coopération décrivant précisément le rôle et la place de chacun dans la prise en charge, par des réunions de concertation entre les différents acteurs ou des groupes de travail spécifiques à l'amélioration des liens ville-hôpital.

D'autres freins au développement de l'HAD peuvent être cités tels que : le délai d'attente pour être hospitalisé en HAD, le manque de personnel libéral, une couverture territoriale inadaptée, la limitation du rayon géographique d'action, la difficulté de la prise en charge des malades lourds à domicile.

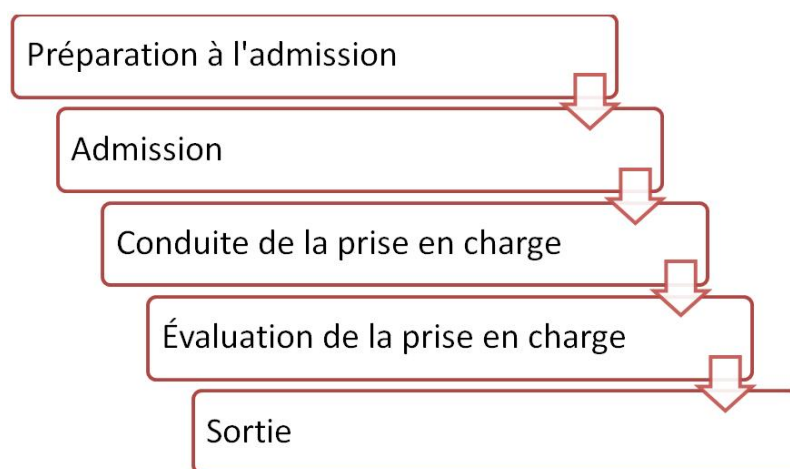
1.5 L'admission et le projet thérapeutique (PTh)

1.5.1 L'admission et le déroulement du séjour du patient au sein de l'HAD

Le déroulement du séjour du patient au sein de l'HAD doit passer par plusieurs étapes en partant de la préparation de l'admission et finissant par la sortie du patient. La figure 1.3 montre les différentes étapes du parcours du patient lors de son séjour au sein de l'établissement (exemple de l'HAD « Sante Service »)⁶. Les différentes étapes qui constituent le parcours patient depuis son admission jusqu'à la sortie sont :

La préparation de l'admission : Une demande initiale est remplie par l'infirmière coordinatrice de la structure d'HAD. Elle procède, par la suite, à une évaluation des besoins du patient avec l'équipe médicale hospitalière et de ville afin de déterminer la faisabilité de l'admission en adéquation avec les critères définis par les autorités sanitaires. Elle rencontre

6. Santé Service est une association à but non lucratif participant au Service Public Hospitalier, spécialisée en hospitalisation à domicile (HAD) basée sur PUTEAUX

FIGURE 1.3 – *Parcours patient*

le patient ainsi que son entourage, leur délivre les informations utiles sur les conditions de sa prise en charge en HAD. Elle leur remet le livret d'accueil et recueille le consentement écrit du patient ou de son représentant légal. Si nécessaire, une assistance sociale se déplace au domicile pour aider à la mise en place de l'HAD.

L'admission : La demande étant jugée recevable, l'infirmière coordinatrice la transmet au médecin coordonnateur qui se met en relation avec le médecin prescripteur et le médecin traitant du patient afin de s'assurer de l'accord de ce dernier. Durant ce temps, les renseignements administratifs concernant le patient sont complétés par l'infirmière coordinatrice. Elle rencontre et informe le patient et son entourage. Elle constitue son dossier administratif et fait établir les prescriptions. Elle prépare, également, le dossier de soins et de transmissions et le remet au patient. Enfin, elle commande le matériel, les médicaments et le transport sanitaire. Suite à la validation de la demande par le médecin coordonnateur, le responsable de l'établissement d'HAD prononce l'admission du patient en HAD.

Conduite de la prise en charge : Une fois le malade pris en charge, la structure HAD s'engage dans un PTh et coordonne les actes pratiqués au domicile du patient, en collaboration avec le médecin traitant qui reste référent médical. Les interventions se font autour d'une évaluation globale et permanente des besoins des malades, les actions des intervenants sont coordonnées par un cadre infirmier, et le transfert des informations est assuré en amont et en aval de la prise en charge avec l'aide d'un système informatique. Une réévaluation des besoins est faite dès le 1^{er} jour de prise en charge. Le matériel médical lourd (lit médicalisé, oxygène, appareil respiratoire) est livré la veille. Le matériel à usage unique nécessaire aux soins d'hygiène par l'aide-soignant. L'équipe pluridisciplinaire intervient pour mettre en place des protocoles de soins dans le respect des règles de sécurité, d'hygiène, de qualité et de confidentialité. La présence d'un dossier de soins et de transmission au chevet du malade facilite la coordination entre l'équipe soignante, l'encadrement, le médecin

et l'hôpital.

Évaluation de la prise en charge : Toutes les semaines les équipes de soins de la structure HAD se retrouvent avec leurs cadres pour évaluer les besoins des patients ainsi que le déroulement de la prise en charge. L'évaluation de la charge en soins du personnel soignant salarié de la structure se fait de manière quotidienne, ce qui permet un réajustement en temps réel des réponses aux besoins des patients. Des procédures d'amélioration des pratiques font l'objet de réflexions organisées dans des groupes de travail à compétences transversales et se traduisent par des formations, des changements de matériels ou de méthodes de travail, la mise en place de nouveaux outils. A tout moment, l'évaluation clinique faite par le médecin traitant de ville ou par le médecin hospitalier pourra conduire à la poursuite de cette prise en charge ou à son arrêt pour ré-hospitalisation ou relais vers une autre structure. L'évaluation de la satisfaction des patients se fait par le renvoi d'un questionnaire d'appréciation contenu dans le livret d'accueil.

1.5.2 Le projet thérapeutique

Selon l'article 3.3.1 de la circulaire du 30 mai 2000 portant sur l'HAD « le patient est admis en HAD sur la base d'un PTh qui formalise l'ensemble des soins cliniques, psychologiques et sociaux que son état nécessite. Ce projet est élaboré conjointement par le médecin coordonnateur avec l'équipe soignante du service d'HAD et par le médecin prescripteur de l'HAD pour l'admission du patient. Il sera actualisé durant le séjour et au moment de la sortie par le médecin traitant en concertation avec le médecin coordonnateur et l'équipe soignante de l'HAD et, si nécessaire, le service social. ».

L'admission en HAD s'appuie sur un PTh élaboré et actualisé par les divers intervenants (le médecin coordonnateur, le médecin hospitalier et le médecin traitant). Ce projet est suivi et validé par le médecin coordonnateur. Il s'agit d'un programme de soins et d'accompagnement individualisé établi en fonction de l'état du patient. Ce projet thérapeutique doit prendre en compte le projet de vie du malade, et intégrer les aspects cliniques (la pathologie, la complexité des actes), psychologique.

La décision d'admission est prononcée après une évaluation de la charge de soins réalisée par une équipe paramédicale. Le suivi est assuré par le médecin traitant en coordination avec le médecin hospitalier. La décision de sortie est prise en concertation avec le médecin traitant, le médecin hospitalier et le médecin coordonnateur. Ce projet thérapeutique tient compte des soins cliniques, psychologiques et sociaux nécessaires au patient. La pertinence du PTh et sa cohérence avec les conditions d'admission en HAD sont validées par le médecin coordonnateur de l'HAD. Une fois le patient admis, la structure d'HAD est chargée du suivi administratif, du dossier médical et de la mise en place des moyens logistiques.

1.6 Exemples de fonctionnement des établissements d'HAD en France

Dans cette section, nous étudions les différents modes de fonctionnement pour quelques établissements d'HAD que nous avons visités. Le principal motif de recours à l'HAD en France est l'encombrement des lits hospitaliers. Parmi les soins délivrés par ces types d'établissements on trouve les soins aigus ou ponctuels, des soins continus, des soins de suite et de réadaptation et enfin des soins de forte technicité.

1.6.1 HAD-43 de Puy-en-Velay

1.6.1.1 Présentation du service et ses objectifs

Dans ces dernières années, plusieurs structures de prise en charge globale de patients hors les murs de l'hôpital ont été développées. Parmi ces structures, nous présentons l'établissement d'Hospitalisation À Domicile (HAD-43) de Puy-en-Velay situé au centre hospitalier Emilie Roux. Il est ainsi le réseau de soins palliatifs à domicile le plus ancien implanté (créé en mars 2009), et se caractérise par l'engagement des professionnels libéraux de terrain, à l'origine de cette initiative. Le réseau a pour zone géographique d'intervention et couvre 80 % du département de la Haute-Loire. Sur ce périmètre géographique, le réseau ne s'adresse qu'à toute personne dont l'état de santé requiert des soins palliatifs, sans considération d'âge, ainsi qu'à ses proches et aux professionnels qui l'accompagnent. HAD-43, est ainsi amené à prendre en charge des patients dont les pathologies peuvent être multiples mais qui présentent un stade évolué voire terminal.

L'objectif stratégique de HAD-43 est d'améliorer la qualité des soins palliatifs à domicile en assurant l'accompagnement des patients et de leur entourage. Cet objectif se décline en 3 objectifs opérationnels :

- Permettre aux équipes traitantes de réaliser des prises en charges conformes à la démarche palliative dans le département de la Haute-Loire, à domicile ou en maison de retraite en s'appuyant sur les dispositifs existants ;
- Placer le patient au cœur du système en coordonnant tous les acteurs ;
- Assurer au domicile du patient, pour une période limitée mais révisable en fonction de l'évolution de son état de santé, des soins médicaux et paramédicaux continus et nécessairement coordonnés. HAD-43 compte un médecin coordonnateur, quatre infirmières coordinatrices et un agent de service hospitalier. En moyenne sur l'année 2011, le service hospitalise 14 patients par jour.

1.6.1.2 Organisation du service

L'admission d'un patient est conditionnée par la disponibilité d'une équipe de soins libérale. Dès l'admission, une première visite dite d'installation est effectuée par une infirmière coordinatrice. Cette dernière évalue les besoins (médicament, matériel médical) hebdomadaires du patient en s'appuyant sur son PTh, prépare le lot à livrer, puis rend visite au patient pour l'installation. Cette première visite est généralement la plus longue en préparation et en durée d'installation (environ 90 minutes pour l'installation).

L'hospitalisation est décidée par le médecin coordonnateur du service d'HAD sur la base d'un projet thérapeutique, c'est-à-dire d'un programme de soins et d'accompagnement individuel selon l'état du patient, proposé par le médecin coordonnateur et l'équipe soignante. Si l'avis du médecin coordonnateur est favorable, le patient pourra être admis en HAD. Ce dernier joue un rôle central puisqu'il assure les contacts avec les médecins hospitaliers et libéraux et organise la coordination des soins. Une première visite (installation) est programmée lors de la phase de l'admission, elle nécessite généralement environ 1h30 (durée des soins), 1h20 (trajet) et 1h (transmission ; coordination).

A la suite de la visite d'installation, plusieurs visites hebdomadaires sont programmées pour le patient. Avant chaque visite, l'infirmière coordinatrice prépare un lot de médicaments et de matériels à livrer au patient. Durant chaque visite hebdomadaire, l'infirmière coordinatrice évalue l'avancement des soins en : (i) vérifiant l'état du patient (température, poids), (ii) vérifiant la consommation des médicaments, (iii) interrogeant le patient sur le déroulement de son hospitalisation. A l'issue de cette visite, plusieurs visites sont planifiées sur un horizon de 5 jours durant lequel un patient peut nécessiter 1, 2 ou 3 visites. Les visites hebdomadaires doivent être espacées d'au moins une journée lorsqu'un patient nécessite plus d'une visite. Une évaluation hebdomadaire des soignants à domicile du patient et de l'infirmière de coordination d'HAD-43 pour réévaluer et réajuster le projet de soins en fonction de l'évolution de l'état du patient et de ses besoins. Le projet de soins élaboré conjointement par le médecin traitant, le médecin coordonnateur d'HAD 43 et l'ensemble des professionnels intervenant auprès du patient comprend :

- L'ensemble des soins requis par le patient ;
- La nature et la fréquence des interventions de l'équipe soignante ;
- Les besoins d'aide à domicile (aide-ménagère, portage de repas) ;
- Le relais après la fin de l'hospitalisation à domicile.

La décision de sortie est prise en concertation par le médecin traitant, le médecin hospitalier et le médecin coordonnateur. La structure d'HAD-43 fait généralement appel au personnel libéral pour réaliser les soins des patients. Ces personnes réalisent des visites périodiques chez le patient. Toutefois, les personnes libérales ont à leur charge un certain nombre de visites. Il s'agit des visites de contrôle ou des visites imprévues pour des cas d'urgences par exemple. Leurs activités ne se limitent donc pas seulement à l'HAD mais à tous les patients

qui nécessitent des soins à domicile.

La permanence des soins de la structure HAD-43 correspond à la période pendant laquelle les cabinets médicaux libéraux ne sont pas ouverts, à savoir de 20h à 8h les soirs de semaine, les samedis après-midi, dimanches et jours fériés. La permanence des soins est assurée conjointement par les professionnels du domicile, des astreintes infirmières et médicales assurant une liaison téléphonique la nuit et les week-ends, ainsi qu'un relais hospitalier dans les situations d'urgence. L'emploi du temps est élaboré sur 5 jours par semaine et 7h45 / jour.

1.6.1.3 Gestion des flux et chiffres

Nous avons identifié quatre types de flux au sein de l'HAD-43 :

- (a) Flux de patients : description des étapes depuis l'entrée du patient à l'HAD jusqu'à sa sortie,
- (b) Flux de médicaments et de consommables : description de la réalisation des commandes de médicaments, de leur livraison et de la gestion du stock de l'HAD. La fourniture des médicaments est assurée par une pharmacie à usage interne (PUI).
- (c) Flux de matériels : chaque patient nécessite à son entrée un ensemble de matériels ateliers (Fauteuil, adaptable) pour sa prise en charge.
- (d) Flux des déchets : les déchets émis par chaque patient sont pris en charge par l'HAD-43 lors de visites périodiques pour la récupération des cartons de DASRI (Déchets d'Activités de Soins à Risques) qui seront incinérés par la suite.

Quelques chiffres sur le fonctionnement de HAD-43 en 2011 : environ 40% des dossiers reçus n'aboutissant pas, durée de séjours variant d'une journée à plus d'un an avec une moyenne de 26 jours. HAD-43 est largement en surcapacité et est peu intéressée par l'optimisation de son fonctionnement. De plus, étant une structure dépendante, elle ne peut pas optimiser le planning du personnel qui intervient également dans d'autres services de l'hôpital. L'objectif principal de la structure HAD-43 est d'optimiser le service rendu au patient.

1.6.2 HAD Groupement de Coopération Sanitaire (GCS)

1.6.2.1 Présentation de l'établissement et ses objectifs

L'HAD GCS est un groupement de coopération sanitaire dont le statut est un établissement privé à but non lucratif. L'HAD-GCS a été créé en 2008 par trois promoteurs. L'HAD-GCS permet d'assurer, sur prescription médicale, dans le cadre du domicile du patient, un ensemble de soins coordonnés, sous la responsabilité médicale du médecin traitant, dans des conditions de qualité de soins et de sécurité de niveau hospitalier. La structure

HAD-GCS intervient sur l'état du patient et de son suivi 7j/7 et 24h/24h en fonction de son besoin. Les urgences sont plus facilement gérées par les établissements disposant d'une Pharmacie à Usage Interne (PUI) ce qui n'est pas le cas pour la GCS. En effet, avoir une PUI permet à une HAD d'être plus réactive face aux besoins urgents des patients. Les objectifs majeurs de cette structure est de :

- Délimiter le secteur d'hospitalisation (25km aux alentours de Saint-Etienne) ;
- Optimiser les tournées ;
- Améliorer le service logistique ;
- Améliorer la qualité de service.

1.6.2.2 Organisation des circuits des médicaments

La gestion des médicaments peut suivre deux modes d'organisation : soit sans groupement de coopération sanitaire soit avec groupement de coopération sanitaire ce qui est le cas pour HAD-GCS. S'il n'existe pas de groupement de coopération sanitaire entre l'EHPA (établissement d'hospitalisation des personnes âgées) et la structure HAD, la prise en charge (approvisionnement, dispensation) des médicaments nécessaires au traitement dans le cadre d'une HAD est assurée et financée par cette dernière sur prescription spécifique du médecin traitant. Dans le cas contraire, la prise en charge est assurée par la pharmacie du GCS. La livraison des médicaments aux patients nécessitent une gestion rigoureuse des livraisons sur une large plage horaire journalière de travail. Les urgences doivent aussi être gérées efficacement.

1.6.2.3 Chaîne logistique et incertitudes

Une particularité importante dans la chaîne logistique est l'incertitude qu'on ne peut gérer ni quantifier. Une différence majeure existe entre le milieu industriel et le milieu hospitalier. En industrie, l'incertitude concerne les pannes de machines, les ruptures de stocks ou les absences des personnels. Par contre en milieu hospitalier, les incertitudes se présentent sous plusieurs aspects tels que :

- (a) Incertitude relative à la disponibilité de ressources humaines et matérielles : l'indisponibilité des ressources matérielles peut être due à des pannes, des ruptures de stocks ou encore à une mauvaise transmission des données. L'indisponibilité des ressources humaines est essentiellement due à des congés maladie ou à l'absentéisme. Ainsi, l'HAD doit faire face à ces imprévus surtout en cas d'absence du personnel soignant entraînant la non délivrance du soin aux patients. Ces absences peuvent causer la dégradation de l'état du patient, engendrer une mauvaise gestion des urgences, perturber le planning des visites, etc.
- (b) Incertitude relative à la demande : une part de la demande de soins est connue

(soins programmés, saisonnalité, etc.) mais une grande partie de la demande reste imprévisible et aléatoire ;

- (c) Incertitude relative au processus de production de soins : on ne peut pas prévoir avec certitude la réaction du patient à une thérapie. Même si l'ensemble de soins est décrit pour chaque patient dans son projet thérapeutique. Ce projet doit être mis à jour en fonction de l'état de santé du patient ;
- (d) Incertitude sur le comportement du patient.

Dans une structure d'HAD, les ratios suivants indiquent la capacité nécessaire : (i) 6 patients par infirmier, (ii) 30 patients par cadre et (iii) de 30 à 60 patients par médecin. La prise en charge des patients en HAD est facturée à partir de minuit. La présence permanente d'un infirmier doit être assurée 24h sur 24h.

1.6.2.4 Le projet thérapeutique au sein de HAD-GCS

L'admission en HAD s'appuie sur un PTh élaboré et actualisé par les divers intervenants (le médecin coordonnateur, le médecin hospitalier et le médecin traitant). Ce projet est suivi et validé par le médecin coordonnateur. Il s'agit d'un programme de soins et d'accompagnement individualisé établi en fonction de l'état du patient. Le PTh doit prendre en compte le projet de vie du malade, et intégrer les aspects cliniques (la pathologie, la complexité des actes), psychologique. Le PTh est constitué de quatre étapes :

- Evaluation soignante/ médecin par apport aux facteurs de l'état des lieux, ergonomie hygiène ;
- Evaluation du dossier ;
- Evaluation à domicile ;
- Admission : selon l'avis des médecins hospitalier, le coordonnateur, et le médecin traitant.

La pertinence du PTh et sa cohérence avec les conditions d'admission en HAD sont validées par le médecin coordonnateur de l'HAD. Une fois le patient admis, la structure d'HAD est chargée du suivi administratif, du dossier médical et de la mise en place des moyens logistiques. D'après la structure d'HAD-GCS, le projet thérapeutique peut prendre 48 heures pour son élaboration. Une évaluation hebdomadaire (8 jours) est nécessaire pour le suivi de ce projet. Le suivi se fait par le médecin traitant, les infirmiers libéraux et le service médical. Au cours d'une réunion synthèse : chaque professionnel s'exprime sur chaque patient. A la fin de l'HAD, trois cas sont possibles :

- Soit l'amélioration du patient (état de santé) ;
- Le retour à l'hôpital suite à un manque de matériel ou la gravité de son état de santé nécessitant son retour indispensable ;
- Soit le décès du patient.

La structure d'HAD-GCS, organise et planifie la prise en charge du patient dans un délai qui tient compte du degré d'urgence, de l'état du patient et de son contexte environnemental. Sur une dizaine de semaines au début de l'année 2014, il y a eu 150 mouvements dont deux entrées et deux sorties par jour.

1.6.3 L'établissement d'hospitalisation à domicile de Cébazat-63

L'HAD de Cébazat-63 est une structure en activité sur le Puy-de-Dôme depuis février 2003. Cette structure offre des services de soins et de gestion des séjours d'hospitalisation à domicile. Elle permet d'accueillir une moyenne de 50 patients par jour en 2012. Leur objectif est d'hospitaliser 65 patients / jour en 2013. Les types de soins qu'on peut trouver dans cette structure sont des soins techniques tels que les pansements, injections, perfusions, et les pompes. Tout patient admis en HAD fait l'objet d'un projet thérapeutique (projet médical, projet de soins, projet social) établi entre le médecin prescripteur et le médecin coordonnateur. Le patient et son entourage sont informés de ce projet, à l'entrée et de l'évolution du projet thérapeutique, si besoin. La continuité des soins, la sécurité et la qualité des prises en charge sont assurées 7 jours sur 7 et 24h/24 grâce à une permanence médicale ou une équipe de soins infirmiers susceptibles d'intervenir pour des soins planifiés à l'avance ou pour tout appel urgent.

La structure n'assure pas un service hôtellerie. La confection des repas, l'entretien du linge et le ménage sont à la charge du patient. Le financement des soins en hospitalisation à domicile repose sur le système national de Tarification À l'Activité (T2A). Généralement, la prise en charge par la caisse primaire d'assurance maladie est de 100%. Cette prise en charge est faite par 80% des libéraux. L'admission dans le service, ainsi que la sortie d'un patient, sont prononcées par la directrice de la structure, après avis du médecin coordonnateur, accord du médecin traitant et après un bilan médico-psycho-social. En 2006, la structure a opté pour l'idée de former des personnels afin qu'ils puissent y intégrer facilement dans le domaine de l'HAD.

HAD-63 est complémentaire des structures telles que les SSIAD dont elle a vocation à prendre éventuellement le relais, si la situation du malade s'aggrave mais elle peut confier un malade, en phase de stabilisation. Des conventions ont formalisé ces liens entre SSIAD et HAD-63. A chaque admission d'un malade en HAD, un dossier patient est constitué. Ce dossier est constitué sous un délai minimum de 48 heures après l'arrivée de la demande imprévue. Les informations incluant ce dossier ne peuvent être communiquées au plus tard de 8 jours. Des visites peuvent être effectuées à la demande de l'équipe médicale responsable des soins. Le médecin libéral peut modifier légèrement le projet de soins en prescrivant un nouveau médicament ou en augmentant la posologie d'un médicament. Ce genre de modification ne nécessite pas une réunion entre le médecin coordinateur et l'équipe médical mais implique une livraison de médicament qui sera effectuée par l'in-

firmière coordinatrice. En cas de dégradation de l'état de santé du patient, le médecin soignant peut prescrire un médicament urgent pour le patient. Dans ce cas, la structure HAD-63 doit réagir dans l'urgence et livrer le médicament au patient dans les plus brefs délais par un livreur interne (pharmacie PUI). La livraison des matériels est assurée par le livreur interne. Afin d'optimiser son parcours la structure utilise les GPS. A son arrivée à domicile du patient en lui déposant son nouveau matériel, il peut récupérer les déchets. Le suivi du patient est assuré par le médecin traitant. Ce médecin est libre d'aller voir le patient tant qu'il veut. La fréquence de visite de l'infirmier coordonnateur est d'une seule fois/ semaine. Celui de l'infirmière et de 3/4 fois /jour. La structure reçoit en moyenne entre 14-20 demande/semaine. Toutes les demandes seront informatisées dans une base de données (même ceux qui ne seront pas admises par le médecin traitant). 17% des flux des demandes arrivent de l'hôpital. Le système (planning / cycle) cyclique dans cette structure est d'une durée moyenne entre 3 semaines et un mois y compris l'anticipation des congés.

Vu sa taille et ses ressources, la structure HAD-63 présente un intérêt scientifique en termes d'optimisation en intégrant l'aspect logistique et la planification des visites sur l'horizon en moyen terme. Cette structure est importante en faveur de son fonctionnement qui ferait émerger des problématiques d'optimisations intéressantes. L'aspect logistique reste intéressant dans nos travaux : on peut reprendre l'idée des acteurs intervenant lors des visites chez le patient tels que l'infirmier, l'aide-soignante et le logisticien.

1.6.4 HAD Sallanches

Ouvert en 2008, le service HAD de Sallanches s'adresse aux patients majeurs dont l'état de santé ne nécessite plus un plateau technique, mais requiert toujours des soins nécessairement coordonnés. Cette structure est à la base prévue comme un service de l'hôpital pour permettre une libération de lits des services internes ; cependant, on retrouve d'autres types de ressources, comme les médecins traitants et surtout les infirmières libérales déjà partenaires de la structure de l'HAD ; celles-ci appellent parfois elles-mêmes la structure pour prendre en charge leurs patients dont l'état se dégrade sans nécessiter une hospitalisation lourde.

L'admission du patient est l'élément clé pour l'HAD. Les motifs de refus d'admission requièrent des critères médicaux non remplis (directives ministérielles précises), refus du patient, de la famille, du médecin traitant, absence d'un aidant principal. Par exemple, en 2012, seuls 3 dossiers ont été refusés pour des raisons dépendantes de la structure de HAD (difficultés logistiques trop importantes, cabinet libéral hors accord-cadre).

Le service d'hospitalisation à domicile organise la prise en charge des patients sur demande des médecins hospitaliers ou libéraux. Il travaille en partenariat avec l'équipe libérale choisie par le patient (médecin, infirmière, kinésithérapeute). Une permanence infirmière est assurée 24h/24, 7j/7. Une astreinte médicale existe également. Le territoire

est un peu particulier car il est très rural et surtout montagneux, d'où des contraintes d'accessibilités parfois très fortes. Les soins des patients qui représentent (40%-50%) concernent en pratique des soins palliatifs, même si ceux-ci ne représentent pas toujours le motif de prise en charge (alimentation artificielle, gestion de la douleur). Les autres cas comprennent pansements complexes (généralement pris en charge par les infirmières de l'HAD plutôt que les libérales (problème de compétence, ainsi que de rapport gain/temps peu avantageux).

En ce qui concerne les ressources matérielles, l'HAD de Sallanches possède du matériel lourd qui est externalisé et un matériel léger des consommables et médicaments livrés par les salariés (lors des visites hebdomadaires). Il existe une différenciation des logiciels de traitement entre le dossier médical (logiciel commun aux HAD du territoire) et de prescription (Cristal-Net, interne à l'hôpital).

1.7 Conclusion

L'HAD est apparue depuis une cinquantaine d'années et s'est développée rapidement. Dans ce premier chapitre, nous avons présenté les différents aspects concernant l'HAD. Tout d'abord, nous avons décrit le système de santé français. Ensuite, nous avons exposé le concept de l'HAD et son historique. Nous avons montré par la suite, les intérêts et les freins au développement de l'HAD en France. Ce mode de prise en charge présente plusieurs intérêts mais l'avantage principal mis en avant par le gouvernement est le coût réduit de l'HAD par rapport à l'hospitalisation en hôpital. Nous avons décrit également l'admission et le déroulement du séjour du patient au sein de l'HAD. Enfin, pour avoir une vue globale sur les différents établissements HAD en France, nous avons décrit le mode de fonctionnement des établissements que nous avons visités au cours de la thèse.

Chapitre 2

Problèmes de planification des soins à domicile dans la littérature

Sommaire

2.1	Introduction	32
2.2	Concepts de base	33
2.2.1	Notions pour les problèmes de planification	33
2.2.2	Optimisation combinatoire	33
2.3	Méthodes de résolution	34
2.3.1	Méthodes exactes	35
2.3.1.1	La méthode de séparation et évaluation	35
2.3.1.2	Méthode de résolution par génération de colonnes	37
2.3.2	Méthodes approchées	38
2.3.2.1	Les recherches locales	39
2.3.2.2	Recherche tabou	40
2.4	État de l'art de la planification des soins à domicile	41
2.4.1	Littérature sur les problèmes de planification des tournées des infirmiers en HAD	42
2.4.1.1	Affectation des tournées des soignants	42
2.4.1.2	Ordonnancement des tournées des personnels	44
2.4.1.3	Allocation des ressources en HAD	45
2.4.2	Étude de la qualité des soins et l'épuisement professionnel des infirmiers	46
2.4.3	Synthèse et classification des travaux	47
2.5	Conclusion	49

Ce chapitre complète le précédant chapitre en donnant la vision académique de l'organisation des soins à domicile. Il a deux objectifs : l'analyse de l'état de l'art sur les

problématiques de planification des soins à domicile d'une part et l'introduction des méthodes/outils de recherche opérationnelle que nous allons utiliser dans cette thèse pour la résolution des problèmes de planification d'autre part.

2.1 Introduction

L'importance des travaux de recherche dans le milieu hospitalier à domicile a pris une nouvelle dimension au cours des dix dernières années. En effet, confrontés à un contexte socio-économique difficile, la majorité des établissements hospitaliers à domicile du monde entier doivent se plier à de nouvelles règles de gestion afin de minimiser les coûts engendrés et de maximiser le confort et les soins des patients à leur domicile. De nombreux chercheurs se sont ainsi penchés sur ce problème, tentant d'apporter de nouvelles stratégies d'organisation et de planification dédiées au milieu hospitalier à domicile. Avant de se pencher sur cette problématique et de positionner nos travaux dans ce contexte hospitalier, il est nécessaire de rappeler quelques concepts de la recherche opérationnelle utilisés en planification des activités et exposer les travaux existants sur les problèmes de planification des soins à domicile et leurs méthodes de résolution. Dans cet état de l'art, nous établissons une revue de la littérature concernant la planification des soins et des tournées dans un contexte d'hospitalisation à domicile. L'originalité des problèmes rencontrés réside principalement dans le fait que les soins s'effectuent chez chaque patient ; ce qui fait apparaître des problèmes de tournées avec des contraintes spécifiques à l'activité médicale. Afin de classer les articles auxquels nous avons eu accès, les différentes caractéristiques des problèmes liés à la planification des soins à domicile ont été extraites. Nous avons identifié toutes les informations concernant les types de données à prendre en compte, l'horizon de planification, les différentes modalités de soins, les objectifs à viser, les contraintes à satisfaire, les types de décisions à prendre. L'ensemble de ces informations nous permettra d'analyser et de classer tous les articles qui traitent les problèmes de planification des soins à domicile, d'identifier clairement les différents besoins d'outils d'aide à la décision et les problèmes combinatoires à résoudre. Cette revue de la littérature s'étend également sur les méthodes de résolution mises en œuvre.

Le chapitre sera structuré comme suit. Quelques notions de base liées aux problèmes de planification des soins à domicile et sur l'optimisation combinatoire sont d'abord introduites dans la section 2.2. Des méthodes exactes et approchées seront ensuite détaillées dans la section 2.3 qui ont été largement étudiées dans la littérature dans le contexte de l'hospitalisation à domicile. Ensuite, nous présentons les diverses publications de la littérature connexes à nos travaux de recherche dans la section 2.4. Nous clôturons le chapitre par le positionnement de nos futurs travaux de recherche par rapport aux problématiques étudiées dans la section 2.4.3.

2.2 Concepts de base

2.2.1 Notions pour les problèmes de planification

Nous présentons ici quelques notions de base qui seront utilisées tout au long de la thèse. Comme la plupart des travaux de planification, les problèmes de planification des tournées de véhicules dans le contexte d'hospitalisation à domicile (HHCP, en anglais Home Health Care Problem) sont en général définis sur un graphe. On considère un graphe orienté $G = (V, E)$ composé d'un ensemble V de sommets et d'un ensemble E d'arcs. Les sommets de V peuvent être partitionnés en deux catégories, un ensemble de dépôts noté par D et un ensemble de patients noté par P . Un arc $(i, j) \in E$ relie le sommet i au sommet j et représente en général un plus court chemin pré-calculé dans le réseau réel. Un patient en HAD, peut être défini par son protocole de soins et sa localisation géographique. Il peut être visité pendant son hospitalisation par une ou plusieurs ressources humaines (infirmier, aide-soignant, logisticien). Ces ressources peuvent être caractérisées soit par leur degré de compétences, par leur localisation géographique ou par leur type de contrat (salarié ou libéral, temps plein ou temps partiel). Au niveau des besoins des patients, l'ensemble des tâches est noté par T et la durée de service d'un patient $p \in P$ pour une tâche $t \in T$ est notée d_t . Chaque arc $(i, j) \in E$ est muni d'un temps de déplacement noté par t_{ij} . Généralement si on parle des problèmes de tournées de véhicules, on parle de l'horizon de planification. Dans notre thèse, on s'intéresse à deux types d'horizon ; un problème journalier et un problème hebdomadaire. Ceci correspond aux deux points de prise de décision pour la planification de nombreux HAD. La charge de travail réelle des ressources humaines est donnée par W_r . Cette charge est la somme des temps de déplacement et des temps de service de chaque tâche.

2.2.2 Optimisation combinatoire

L'optimisation combinatoire occupe une place très importante en recherche opérationnelle, en mathématiques discrètes et en informatique. Son importance se justifie d'une part par de nombreuses applications pratiques pouvant être formulées sous la forme d'un problème d'optimisation combinatoire [Ribeirou 1994] et d'autre part par la grande difficulté des problèmes d'optimisation combinatoire [Papadimitriou & Steiglitz 1998]. Un problème d'optimisation consiste à chercher une instanciation d'un ensemble de variables soumises à un certain nombre de contraintes, de façon à maximiser ou minimiser un critère. Les problèmes abordés dans cette thèse impliquent la planification et l'organisation des tournées de véhicules soumises à des contraintes d'imprévis afin de minimiser le temps de transport et la charge de travail. Toutes ces décisions sont représentées par des variables binaires, entières et réelles. Comme nous le verrons plus tard, ces problèmes peuvent se

modéliser sous la forme de problèmes d’optimisation combinatoire.

Le problème P d’optimisation combinatoire peut être défini par le couple $P(S, f)$. L’ensemble S représente les combinaisons et une fonction $f : S \rightarrow \mathbb{R}$, qui désigne la fonction coût, la fonction économique ou la fonction objectif (selon le contexte). Il s’agit de trouver la combinaison de S minimisant f , i.e., $s^* \in S$ telle que $f(s^*) \leq f(s_i), \forall s_i \in S$. Cette solution s^* est appelée optimum global.

Trouver une solution optimale dans un ensemble discret et fini se résout par un algorithme très simple : tester toutes les solutions et comparer leur coût pour voir la meilleure. Cependant, en pratique, l’énumération de toutes les solutions possibles peut prendre trop de temps. Les travaux théoriques dans ce domaine, ont permis d’identifier différentes classes de problèmes en fonction de la complexité de leur résolution [Papadimitriou & Steiglitz 1998]. Pour simplifier, on se limitera ici à deux types de classes P et NP . La classe P contient l’ensemble des problèmes polynomiaux, i.e, pouvant être résolus par un algorithme de complexité polynomiale par exemple par un algorithme glouton, un algorithme de programmation dynamique ou en montrant que le problème peut être formulé comme un problème d’optimisation linéaire en variables réelles. L’ensemble des problèmes contenant cette classe peuvent être résolus efficacement. Par contre, la classe NP contient l’ensemble des problèmes polynomiaux non déterministes et dans la plupart des cas, le problème est NP -difficile. À ce jour on ne connaît pas de problème NP -difficile que l’on peut résoudre par un algorithme de complexité polynomiale. Les méthodes de résolution garantissant l’optimalité font alors appel à des algorithmes de séparation et évaluation progressive, à l’optimisation linéaire en nombre entiers ou encore à la programmation par contraintes. L’optimisation combinatoire trouve des applications dans des domaines aussi variés que l’ingénierie, la production, la planification, les transports, les sciences sociales et l’informatique.

Étant donnée l’importance de ces problèmes, et comme il n’existe pas d’algorithmes polynomiaux pour résoudre les problèmes NP -difficiles, de nombreuses méthodes de résolution ont été développées en recherche opérationnelle. Ces méthodes peuvent être classées sommairement en deux grandes catégories : les méthodes exactes (optimales) qui garantissent la complétude de la résolution et les méthodes approchées qui perdent la complétude pour gagner en rapidité d’obtention de bonnes solutions. La section 2.3 rappelle les différentes méthodes de résolution des deux familles.

2.3 Méthodes de résolution

Dans cette section, nous présentons les méthodes de résolution exactes et approchées. Dans un premier temps, nous présentons un schéma général de ces méthodes et dans un deuxième temps nous détaillons les méthodes utilisées dans cette thèse.

2.3.1 Méthodes exactes

Les méthodes de résolution exactes permettent d'obtenir une ou plusieurs solutions dont l'optimalité est garantie. Le principe essentiel d'une méthode classique consiste généralement à énumérer, souvent de manière implicite, l'ensemble des solutions de l'espace de recherche. Pour améliorer l'énumération des solutions, une telle méthode dispose de techniques pour détecter le plus tôt possible les échecs (calculs de bornes ou de solutions partielles incompatibles) et d'heuristiques spécifiques pour orienter les différents choix. Parmi les méthodes exactes nous présentons ici la méthode de « séparation et évaluation » et la « génération de colonnes ».

2.3.1.1 La méthode de séparation et évaluation

L'algorithme de séparation et évaluation, plus connu sous son appellation anglaise *Branch-É-Bound* est une méthode algorithmique classique pour résoudre un problème d'optimisation combinatoire. Il s'agit de rechercher une solution optimale dans un ensemble combinatoire de solutions possibles. La méthode repose d'abord sur la séparation de l'ensemble des solutions en sous-ensembles plus petits. L'exploration de ces solutions utilise ensuite une évaluation optimiste pour majorer ou minorer (borner) les sous-ensembles, ce qui permet de ne plus considérer que ceux susceptibles de contenir une solution potentiellement meilleure que la solution courante. Le schéma général de l'algorithme 1 est donné dans les 9 étapes suivantes, où $b(S)$ désigne la borne obtenue sur un sous-espace des solutions S et $v(X)$ l'évaluation d'une solution X .

Algorithme 1 : Algorithme de séparation et évaluation

- 1: $V_{opt} :=$ borne pessimiste sur la meilleure valeur possible
 - 2: $B :=$ borne optimiste sur la meilleure valeur possible
 - 3: Liste de nœuds $L := [S_0]$ l'espace de solution complet
 - 4: Si $L = \emptyset$ **retourner** X_{opt} **et terminer**
 - 5: $S \leftarrow L$
 - 6: Calculer la borne $b(S)$
 - 7: Si $b(S)$ pire que V_{opt} alors **aller à Étape 4**
 - 8: Si on obtient une solution réalisable X dans S meilleure que la meilleure solution X_{opt} alors $X_{opt} := X$ et $V_{opt} := v(X)$
 - 9: $L \leftarrow [S_1, S_2, \dots, S_k]$ les k nœuds fils de S et **aller à Étape 4**
-

L'algorithme construit une recherche arborescente où les nœuds fils séparent le nœud parent. L'évaluation des bornes optimistes et pessimistes y est donc plus serrée. Nous détaillons les différentes opérations de l'algorithme dans ce qui suit :

Séparation : Pour décrire l'opération de séparation, il suffit de dire comment on divise un ensemble de solutions en sous-ensembles. Cela revient à décrire comment construire l'arbre permettant d'énumérer toutes les solutions. L'ensemble de nœuds de l'arbre qu'il reste encore à parcourir comme étant susceptibles de contenir une solution optimale, c'est-à-dire encore à diviser, est appelé ensemble des nœuds actifs.

Évaluation optimiste : Étant donné l'arbre énumérant toutes les solutions, chaque feuille contient une solution dont on peut calculer la valeur exacte. Pour un nœud interne de l'arbre, k , on va évaluer ce nœud en calculant un majorant de la valeur de toutes les solutions contenues dans le sous-ensemble représenté par le sous-arbre de racine k . Si l'arbre entier était connu, on pourrait évaluer un nœud par la meilleure solution portée par ses feuilles. Mais ce n'est bien sûr pas le cas ! Il faut donc essayer d'estimer par majoration la meilleure solution qu'il est possible d'atteindre à partir du nœud. Comme un nœud interne représente une solution partielle (une partie des variables du problème est fixée), on l'évalue en cherchant la meilleure valeur qu'on peut obtenir grâce aux degrés de liberté restants. Cette fonction d'évaluation, spécifique à chaque problème, est dite optimiste (étape 2) car elle calcule un majorant du meilleur résultat possible à partir d'une solution partielle. Une bonne fonction doit majorer au plus près la solution maximale, tout en restant la moins coûteuse possible d'un point de vue algorithmique. C'est un des aspects cruciaux quant aux performances de la résolution du problème.

Élaguage : Une fois que l'évaluation d'un nœud interne est calculée, on peut l'utiliser pour interrompre éventuellement l'exploration de cette partie de l'arbre. En particulier, il est inutile de diviser le nœud dans les cas suivants :

1. L'évaluation a permis de calculer une solution qui a exactement cette valeur. Cette solution est nécessairement optimale dans ce sous-ensemble de solutions. Si cette solution est la meilleure trouvée jusque là, elle devient la meilleure solution courante. Ce cas est plutôt rare.
2. L'évaluation est inférieure ou égale à la valeur de la meilleure solution trouvée jusque là. On n'a donc aucune chance de trouver mieux dans ce sous-ensemble. Ceci peut permettre des gains importants, car on élimine une partie de l'arbre de recherche.
3. Le sous-ensemble est réduit à un seul élément.

Dans les cas 1 et 2, on gagne dans l'exploration de l'arbre puisque la branche suivant le nœud considéré ne sera pas explorée. On dit que cette branche est élaguée (pruning en anglais). À noter que dans le cas 1, si la meilleure solution courante a changé, il convient de parcourir tous les nœuds actifs pour voir s'ils le restent.

Approximation : Le succès de la méthode dépend essentiellement de la précision de la fonction d'évaluation. On peut l'accélérer en se contentant d'une solution approchée avec garantie de qualité. On peut décider d'élaguer tout nœud dont l'évaluation est inférieure

à $(1 + \alpha)$ fois la valeur de la meilleure solution courante. Par exemple si $\alpha = 0,05$, alors quand on s'arrêtera la valeur de la solution trouvée sera à moins de 5% de l'optimum.

À l'étape 7, si la borne optimiste est moins bonne que la meilleure solution connue, il est donc inutile de poursuivre la séparation du nœud considéré. Ce mécanisme permet d'éviter l'énumération complète des solutions.

Beaucoup de problèmes d'optimisation combinatoire peuvent être formulés sous forme d'un problème de programmation linéaire mixte. Ils peuvent ensuite être résolus par la méthode de (Branch & Cut) combinant la méthode des plans sécants¹ et un algorithme de (Branch & Bound). Ces procédures fonctionnent en résolvant une séquence de relaxations de programmation linéaire en nombre entiers. La méthode des plans sécants permet d'avoir une meilleure amélioration par une relaxation du problème en rajoutant des contraintes au programme linéaire pour le raffiner et le rapprocher des solutions intégrales.

2.3.1.2 Méthode de résolution par génération de colonnes

La génération de colonnes a été introduite pour la première fois en 1960 par les auteurs [Dantzig & Wolfe 1960]. La méthode consiste à décomposer le problème et à résoudre, d'une manière itérative, une série de problèmes de petites tailles, en vue d'obtenir une solution optimale du problème linéaire initial, dit « problème maître ». Souvent le problème maître et le sous-problème sont le fruit de la décomposition d'un programme linéaire compact (avec un nombre réduit de variables). Le problème maître a alors un très grand nombre de variables et implique une résolution par génération de colonnes.

Dans cette section, nous présentons le principe de la méthode de résolution par génération de colonnes que nous utilisons pour résoudre les problèmes de planification des soins à domicile dans le chapitre 4. Cette méthode est souvent utilisée en planification sous forme de méthode exacte mais aussi en tant qu'heuristique. Pour une vision détaillée de la génération de colonnes et de ses applications en planification nous conseillons aux lecteurs les articles de [Mourgaya & Vanderbeck 2007], [Coppi *et al.* 2013] et le livre [Desaulniers *et al.* 2005].

Le principe de base est de résoudre optimalement le programme linéaire, appelé maître restreint, défini sur le sous-ensemble de variables courantes. Il est alors possible de calculer le coût réduit des variables qui ne sont pas intégrées au problème maître restreint. Si aucune variable ne peut améliorer l'objectif (coût réduit négatif dans le cas d'une minimisation) l'optimum est atteint, similairement à la dernière itération du simplexe. Sinon, de telles variables sont intégrées au problème maître restreint et on peut réitérer la procédure. Lorsque les variables du problème maître restreint ne sont pas connues explicitement, un sous-problème permet de chercher les variables satisfaisant les conditions sur les coûts

1. La méthode des plans sécants est utilisée pour trouver une solution entière d'un programme linéaire. Elle fut introduite par Ralph E. Gomory puis étudiée par R. Gomory et Václav Chvátal [Chvátal 1973]

réduits. Ce sous-problème est généralement posé comme un problème d'optimisation où le critère d'optimisation est le coût réduit.

Cette approche est généralement performante pour le calcul de tournées de véhicules. Les variables sont des tournées qui satisfont les contraintes applicables sur la tournée elle-même. Les contraintes du problème maître représentent les contraintes couplant les tournées et servent généralement à couvrir la demande et respecter un nombre limité de véhicules. La fonction objectif combine les coûts individuels de chaque tournée sélectionnée dans la solution. Les variables de décision sont donc des variables binaires de sélection ou non d'une tournée. Avec ce schéma, trouver une tournée non explicitement connue se pose comme un problème de plus court chemin sous contraintes de ressources (qui représentent les contraintes de faisabilité d'une tournée, *i.e.*, durée maximale, fenêtres de temps,...) avec pour fonction objectif le coût réduit associé. Le coût réduit est généralement cumulé sur les arcs qui composent la tournée, associant un coût du problème initial – par exemple la durée – et la variable duale associée à la contrainte de couverture des sommets traversés par l'arc. De ce fait, des approches constructives de type programmation dynamique sont utilisées pour la résolution des sous-problèmes.

La méthode de génération de colonnes permet de résoudre un programme linéaire qui peut servir de calcul de borne dans un schéma de *branch-and-bound*, on parle alors de *branch-and-price* ou *branch-and-cut-price* si on ajoute des algorithmes de plans sécants.

2.3.2 Méthodes approchées

Les méthodes approchées constituent une alternative très intéressante pour traiter les problèmes d'optimisation de grande taille si l'optimalité n'est pas primordiale. En effet, elles permettent d'obtenir des solutions de qualité intéressante en un temps de calcul réduit. Ces méthodes sont utilisées depuis longtemps par de nombreux chercheurs et dans différents domaines. Elles peuvent être classées en deux types, heuristiques et métaheuristiques. Les métaheuristiques sont encore plus générales que les heuristiques et s'adaptent à plusieurs problèmes d'optimisation. Dans le cadre de cette thèse, l'adaptation d'une métaheuristique s'avère primordiale pour proposer des solutions pratiques pour les problèmes de planification des soins à domicile. Parmi les méthodes approchées, on distingue trois grandes familles qui peuvent se combiner : les méthodes constructives (algorithme glouton, algorithme de listes, algorithme de colonies de fourmis), les méthodes à base de voisinages (recherche tabou, Variable Neighbourhood Search (VNS)) qui ont tendance à intensifier la recherche en exploitant une partie de l'espace de recherche et les méthodes à base de population (algorithmes génétiques, essais particuliers) ont plutôt tendance à la diversifier en explorant différentes parties de l'espace de recherche.

2.3.2.1 Les recherches locales

L'espace de recherche associé à un problème d'optimisation combinatoire est souvent non énumérable en un temps raisonnable. On essaie donc de relier certaines solutions entre elles. Ainsi, à partir d'une solution courante, un opérateur de voisinage est appliqué qui permet de définir un ensemble de solutions proches de la solution de départ initiale. Il est nécessaire de définir une relation de voisinage qui est une application qui associe à toute solution de l'espace de recherche un voisinage i.e. un ensemble de solutions (ne la contenant pas elle-même) appelées voisins. Les recherches locales sont des méthodes fondées sur une relation de voisinage et sur une procédure exploitant ce voisinage. L'algorithme s'arrête lorsqu'aucune solution améliorante n'est trouvée dans le voisinage. Les recherches locales se différencient par la procédure d'exploitation du voisinage, le voisinage pouvant être considéré comme un paramètre de celle-ci.

Les métaheuristiques représentent une classe de méthodes algorithmiques permettant de résoudre ou d'approcher la meilleure solution d'un problème d'optimisation combinatoire. Or pour résoudre un problème d'optimisation combinatoire trois questions se posent :

1. Comment doit-on le modéliser ? (fonction objectif, relation de voisinage, représentation des solutions, contraintes du problème...)
2. Quelle métaheuristique est la plus favorable ? (méthode à base de population de solution, recherche locale et exploration du voisinage,...)
3. Quel est le paramétrage optimal ?

Pour répondre à ce genre de questions, il est possible de définir puis analyser une structure, appelée paysage, associée au problème d'optimisation à résoudre. La notion du paysage (ou paysage de fitness) consiste à représenter des individus par rapport à leur fitness et donner une structure géométrique au problème, ceci pour essayer de comprendre les dérives de l'évolution. Cette notion fut ensuite transposée à de nombreux domaines comme celui de l'optimisation combinatoire. Le paysage d'un problème d'optimisation combinatoire est défini par un triplet (Ω, f, V) tel que :

- Ω est l'ensemble des solutions réalisables (espace de recherche).
- $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ est une fonction objectif qui mesure la qualité des solutions réalisables.
- $V : \Omega \rightarrow 2^\Omega$ est une relation de voisinage, une application qui associe à toute solution s de l'espace de recherche un ensemble $V(s)$ de solutions réalisables, appelées voisins.

La recherche locale peut être défini dans l'algorithme 2.

La définition du paysage permet de définir une structure géométrique basée sur deux composantes à un problème d'optimisation : une relation de voisinage et une fonction objectif. Dans le cadre d'une métaheuristique, la fonction objectif permet de faire des choix entre les solutions rencontrées et la relation de voisinage est considéré comme un élément important d'une recherche locale. Cette méthode représente la base de notre métaheuris-

Algorithme 2 : Algorithme d'une recherche locale

```

1: choisir une solution initiale  $s \in S$ 
2: repeat
3:   choisir  $s' \in V(s)$ 
4:    $s \rightarrow s'$ 
5: until critère d'arrêt non vérifié
  
```

tique (recherche tabou) introduite dans la section 2.3.2.2 et développée plus tard dans la section 3.3.4 du chapitre 3.

Par exemple, la figure 2.1 illustre deux paysages différenciés par leur relation de voisinage et pour un même problème d'optimisation. La figure montre deux graphiques de deux situations pour une recherche locale (ici, le Hill Climbing²) partant de trois solutions (en bleu). Dans le premier, alors qu'une solution première solution (à droite) trouve bien l'optimum global (en rouge), les deux autres sont piégées par des optima locaux (en vert). Ces solutions représentées dans le deuxième graphique (avec une relation de voisinage différente) conduisent alors à l'optimum global du problème d'optimisation. (Les flèches pleines correspondent à une application de l'opérateur contrairement à celles qui sont en pointillées).

2.3.2.2 Recherche tabou

La recherche tabou (en anglais "Tabu Search" (TS)) a été introduite par Glover [Glover & Laguna 1997] comme une nouvelle stratégie pour échapper aux optima locaux en utilisant une notion de mémoire. C'est une métaheuristique itérative qualifiée de recherche locale au sens large. Le principe est d'explorer un voisinage qui permet de se déplacer de la solution courante vers son meilleur voisin (celui-ci n'ayant pas forcément une qualité meilleure que la solution courante). Afin d'éviter de boucler entre un optimum local et son meilleur voisin, la méthode interdit de se déplacer vers une solution récemment visitée. Une liste tabou est donc tenue à jour contenant les attributs des dernières solutions visitées. Chaque nouvelle solution considérée enlève de cette liste la solution la plus anciennement visitée. Ainsi, la recherche de la solution courante suivante se fait dans le voisinage de la solution courante sans considérer les solutions appartenant à la liste tabou. Néanmoins, la taille de cette liste est un paramètre de la méthode qui s'avère difficile à régler. De même, la méthode tabou nécessite de définir un critère d'arrêt.

Cette méthode peut être considérée parmi les meilleures approches de résolution pour

2. Une technique d'optimisation mathématique qui appartient à la famille de la recherche locale. C'est un algorithme itératif qui commence par une solution arbitraire à un problème, puis tente de trouver une meilleure solution en changeant de manière incrémentielle un seul élément de la solution. Si le changement produit une meilleure solution, un changement progressif est fait à la nouvelle solution, répéter jusqu'à ce qu'aucune amélioration ne puisse être trouvée.

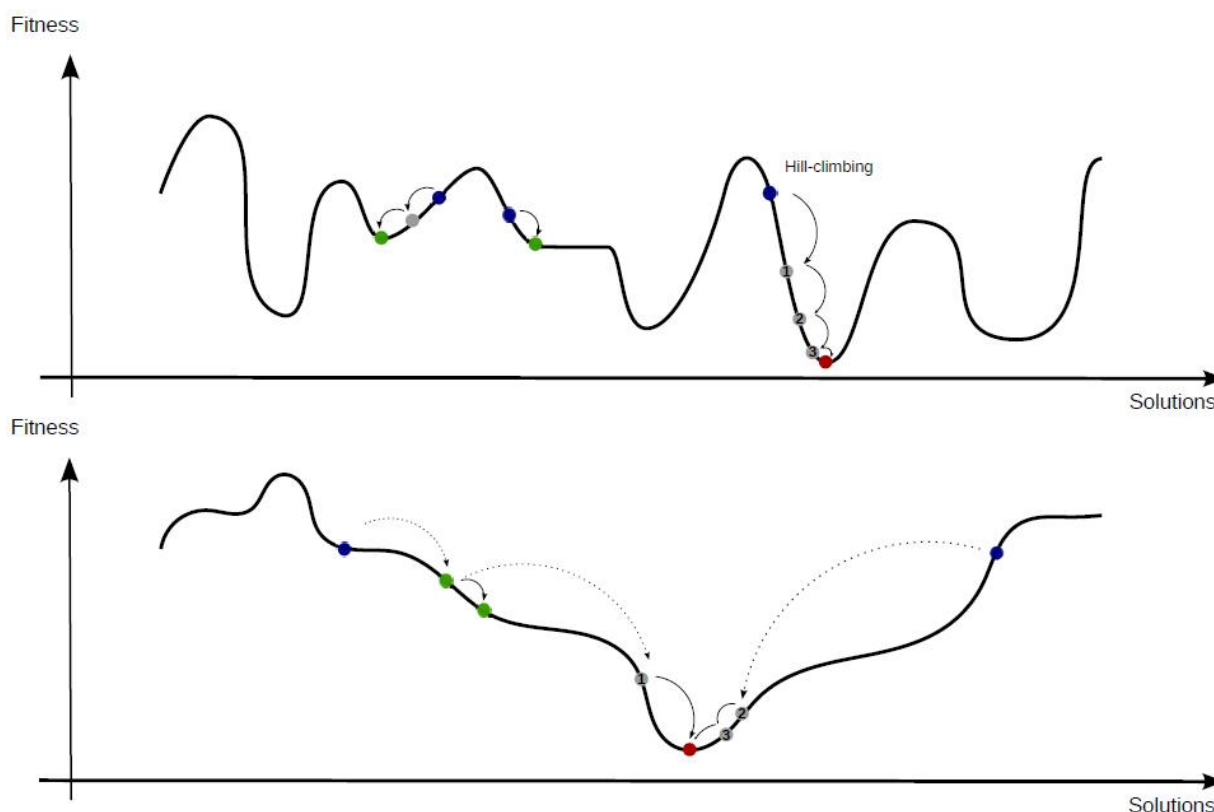


FIGURE 2.1 – Deux paysages adaptatifs pour un problème d'optimisation

résoudre les problèmes de tournées de véhicules comme les problèmes PVRP (Periodic Vehicle Routing Problem) [Cordeau *et al.* 1997], [Liu *et al.* 2014].

2.4 État de l'art de la planification des soins à domicile

Cette section examine les divers travaux connexes à cette thèse. Nous présentons les divers modèles et solutions techniques disponibles dans la littérature du génie industriel sur l'hospitalisation à domicile, et donne un aperçu général des opportunités de recherche non encore explorées. Tout d'abord, nous exposons les différents travaux de la littérature sur les problèmes de planification des tournées des infirmiers en HAD dans la section 2.4.1. Ensuite, nous présentons les autres types de problèmes étudiés dans la littérature à savoir les problèmes portant sur l'étude de la qualité des soins et l'épuisement professionnel des infirmiers dans la section 2.4.2.

2.4.1 Littérature sur les problèmes de planification des tournées des infirmiers en HAD

Une grande partie de la littérature sur la planification des soins à domicile porte sur les problèmes de tournées journaliers. Ce problème est modélisé comme un problème de tournées de véhicules avec ou sans fenêtres de temps. Dans [Coppi *et al.* 2013], une approche de génération de colonnes a été conçue et appliquée à des données réelles. Plusieurs travaux se sont intéressés aux problèmes de planification à moyen terme dans les établissements de soins à domicile et l'insertion dynamique des nouvelles demandes dans le planning des personnels. À ce niveau, le temps de calcul d'une tournée est généralement approché [Lanzarone *et al.* 2010], [Eveborn *et al.* 2006] et [Nickel *et al.* 2012]. Nous détaillons dans ce qui suit les travaux sur les problèmes de tournées du personnel, l'affectation et la planification des tournées des soignants.

2.4.1.1 Affectation des tournées des soignants

Dans [Cheng & Rich 1998], les auteurs ont traité le problème de tournées des infirmiers dans une structure d'hospitalisation à domicile. Deux types de ressources sont considérés : des ressources salariées à temps plein pour lesquels des heures supplémentaires doivent être payées en cas de dépassement du volume horaire et des ressources à temps partiel rémunérées à l'heure. Les compétences et les qualifications des infirmiers sont traduites à l'aide d'une relation de compatibilité avec les patients. Le problème consiste à minimiser les coûts des heures supplémentaires pour les ressources à temps plein et les heures effectuées par les ressources au travail. Le problème d'affectation des ressources aux visites introduisent des contraintes supplémentaires telles que les pauses déjeuner et la plage horaire de travail de chaque ressource. Pour résoudre ce problème ils proposent deux modèles de programmation linéaire mixte et une heuristique à deux phases. La première phase de l'heuristique établit l'ensemble des tournées possibles pour chaque ressource. Cette première phase appartient à la catégorie d'une procédure de construction des tournées en parallèle puisque qu'elle construit typiquement plusieurs chemins simultanément. La deuxième phase vise à apporter des améliorations pour les tournées établies dans la première phase (optimisation des tournées).

Dans les travaux de [Stegg & Schröder 2008], les auteurs considèrent un problème de tournées de véhicules multi-périodique couplé à un problème d'affectation des ressources aux tâches où l'objectif est la continuité des soins tout au long de la semaine. Pour trouver une première solution, ils appliquent un algorithme basé sur la programmation par contraintes, puis ils utilisent une recherche locale pour améliorer les résultats. Dans [Cappanera & Scutellà 2013], les auteurs proposent un modèle de programmation linéaire en nombre entiers basé sur le concept des patterns, c'est à dire un profil de planification,

pour combiner les divers niveaux de décision. Leurs résultats sur des instances réelles montrent que les politiques de génération des patterns sont cruciales pour la planification et le routage sur une grande variété d'instances de soins à domicile.

D'autres auteurs ont travaillé sur ce type de problème afin de développer un système d'aide à la décision pour établir les tournées des infirmiers. Nous citons ici les travaux de [Begur *et al.* 1997] sur une modélisation par programme linéaire mixte pour la construction des tournées d'infirmiers. L'objectif est de minimiser le temps de déplacement et de répartir uniformément la charge de travail entre les infirmiers. L'horizon de planification est la semaine (5 jours ouvrables) où un patient peut nécessiter un certain nombre de visites. Ils intègrent des contraintes de construction d'itinéraires, la disponibilité d'infirmiers et les besoins des patients. Dans le même type de problématique, [Borsani *et al.* 2006] ont proposé un programme linéaire en nombres entiers pour établir le planning hebdomadaire des visites dans le cadre de l'HAD. L'approche consiste à affecter les ressources aux patients et de pouvoir ordonner les activités de chaque ressource en fonction de plusieurs critères à savoir les disponibilités des patients et la qualification des ressources.

Dans [Ben Bachouch *et al.* 2008], les auteurs ont décrit une méthode exacte à l'aide d'un modèle de programmation linéaire en nombres mixtes pour affecter à chaque infirmier un ensemble de patients à visiter durant sa tournée.

[Ettore & Andrea 2010] ont traité le problème d'affectation des patients aux infirmiers sous contraintes de la continuité de soins. À partir d'une politique d'affectation proposée précédemment, ils ont comparé d'abord cette politique avec celle implémentée dans des organisations réelles. Par la suite, ils en déduisent des règles pour choisir l'infirmier qui sera chargé de délivrer le service de soin aux nouveaux patients. Les règles d'affectation proposées prennent en compte la variabilité des besoins des patients, exprimés en termes de nombres de visites demandées au cours du temps.

[Issaoui *et al.* 2015] s'adressent à un problème de service de soins à domicile. Ils ont proposé un modèle multi-objectif de programmation mathématique en nombres entiers qui porte sur : l'augmentation de la satisfaction des patients, le nombre d'interventions ainsi que la minimisation des coûts des interventions de soins. Pour résoudre ce problème, les auteurs ont proposé une approche à trois phases basée sur les algorithmes de (Variable Neighbourhood Decent : VND) et (Longest Processing Time : LPT). Dans la première phase, ils résolvent le problème d'affectation en utilisant l'algorithme d'ordonnancement LPT. Dans une deuxième phase, pour chaque infirmier, ils résolvent le problème de routage afin d'améliorer la distance totale parcourue en utilisant l'algorithme de recherche locale. La troisième phase est consacrée à affiner la deuxième phase en termes de maximisation de la satisfaction des patients au niveau des prestations de services à l'aide d'une heuristique qui réalise des remplacements des patients, si possible, qui ne sont pas satisfaits entre les infirmiers en considérant les distances trouvées dans la première phase.

Dans [Eveborn *et al.* 2006] les auteurs ont proposé un système qui permet de déterminer

l'affectation des infirmiers aux visites. Le but de ce système est de pouvoir équilibrer les charges de travail des ressources en respectant de nombreuses contraintes sur les chemins empruntés pour mieux satisfaire les patients. La résolution des problèmes d'affectation est basée sur des problèmes de couplage successifs. Dans [Bertels & Fahle 2006], les auteurs ont développé une approche hybride entre la programmation linéaire, la programmation par contraintes et une métaheuristique. L'approche proposée considère un ensemble de contraintes visant à satisfaire les acteurs de soins, tout en minimisant les coûts de transport. La problématique a été considérée comme un modèle hybride entre le modèle d'affectation des tâches aux infirmiers et de tournées de véhicules.

Dans [Bard *et al.* 2013], les auteurs affectent les plannings hebdomadaires aux thérapeutes pour fixer des rendez-vous à l'avance. L'intégration de la charge de travail relie le problème de planification des soins à domicile (Home Health Care Problem : HHCP) au problème de tournées de véhicules multi-périodique (Periodic Vehicle Routing Problem : PVRP), qui sont habituellement traités séparément. Dans une étude récente [Campbell & Wilson 2014] sur le PVRP, les heuristiques et les approches exactes les plus efficaces sont énumérées. La plupart des méthodes efficaces et exactes sont dérivées de l'algorithme proposé dans [Baldacci *et al.* 2011]. Les algorithmes de recherche tabou fournissent de bons résultats, mais d'autres heuristiques plus efficaces [Gulczynski *et al.* 2011], comme la recherche par voisinage variable (Variable Neighbourhood Search : VNS) [Hemmelmayr *et al.* 2009] et les algorithmes génétiques [Vidal *et al.* 2012] sont en mesure d'améliorer ces résultats. La version dynamique est traitée dans [Wen *et al.* 2010] et [Mourgaya & Vanderbeck 2007]. Dans le premier article, une approche myope est développée. Une approche en deux étapes est utilisée dans le deuxième article, où les performances des tournées sont premièrement approximativement mesurées par une agrégation d'objectifs avant une ré-optimisation quotidienne exacte.

2.4.1.2 Ordonnancement des tournées des personnels

Dans une étude récente [Liu *et al.* 2013], les auteurs ont développé un modèle qui vise à trouver un ensemble de tournées de coût minimum pour répondre à la demande qui consiste à délivrer les médicaments aux patients de la pharmacie de l'hôpital et de ramasser les échantillons du sang au laboratoire médical. La disponibilité du patient et la capacité maximale des véhicules sont considérées comme des critères à optimiser. [Nguyen & Montemanni 2013] ont proposé un modèle de programmation linéaire en variables mixtes pour minimiser les coûts liés à la violation des fenêtres de temps pour les patients et les dépassements du temps de travail du personnel. Ils considèrent aussi l'équilibrage de charge de travail du personnel.

Dans [Lanzarone & Matta 2014], les auteurs ont développé un modèle d'allocation avec des contraintes de robustesse permettant d'exploiter le potentiel d'un modèle de program-

mation mathématique sans générer des scénarios. Ce modèle a été testé sur des instances d’une structure d’hospitalisation à domicile italienne. Les auteurs ont évalué sa capacité à réduire les coûts de prolongation des heures de travail des infirmiers. Dans une étude récente [Mesghouni *et al.* 2015], les auteurs ont proposé un modèle de programmation linéaire en nombres mixtes pour la planification journalière des services des soins à domicile afin de minimiser les durées de travail journalières. Le modèle intègre un concept original lié au comportement humain (par exemple, le comportement du patient). Plusieurs critères ont été testés sur un ensemble d’instances réelles. Les résultats ont montré que le modèle proposé peut résoudre des problèmes réels de grandes tailles dans un temps de calcul acceptable.

D’autres travaux [Akjiratikar *et al.* 2007] visent à minimiser la distance totale parcourue par les infirmiers et à satisfaire les patients en respectant les contraintes de fenêtres de temps. Les auteurs ont développé une métaheuristique PSO (Particle Swarm Optimization) basée sur un algorithme d’ordonnancement de soins aux infirmiers. Cet algorithme combine des techniques d’amélioration locale pour planifier les activités des infirmiers.

2.4.1.3 Allocation des ressources en HAD

Dans cette section, une description des travaux qui se sont intéressés à la répartition des ressources en HAD est réalisée. Dans les travaux de [De Angelis 1998], l’auteur a traité le problème d’allocation de ressources dans le cas de soins à domicile et plus particulièrement pour le cas des patients sidéens. Il propose une modélisation mathématique par programmation linéaire pour la répartition des ressources pour les patients sidéens nécessitant une assistance à domicile (assistance sociale, assistance médicale, ou accompagnement de patients). Deux sortes de problèmes sont différenciés : un problème local d’allocation des ressources et un problème global concernant le budget qui doit allouer le service de santé public à l’assistance médicale à domicile. Le modèle proposé permet de produire un planning optimisé des visites des patients sur un horizon de planification donné (12 semaines). Il permet aussi, de maximiser le nombre de patients à visiter tout en accordant des priorités de soins et en prenant en compte la variabilité de la demande.

Au Québec, chaque clinique de soins publics est responsable de la santé de ses patients à domicile. [Blais *et al.* 2003] proposent une approche pour partitionner le territoire canadien en unités de base. Cinq critères doivent être respectés pour le partitionnement, à savoir l’indivisibilité des unités de base (les zones étant constituées par des unités de base), le respect des frontières, les relations entre les différentes unités, la mobilité du personnel (moyens de transport) et l’équilibrage de la charge de travail des infirmiers (entre différentes zones du territoire). Les auteurs ont proposé une approche basée sur la recherche tabou hybridée avec un algorithme développé par [Bozkaya *et al.* 2003] dans le quel les auteurs [Blais *et al.* 2003] apportent des modifications au niveau de la fonction objectif à optimiser.

Une approche multicritères a été mise en place en relaxant les contraintes de mobilité et d'équilibrage de la charge de travail pour les intégrer dans la fonction objectif. Le but est de décomposer le territoire en districts dans lesquels la répartition de la charge de travail sera équitable entre le personnel.

Dans les travaux de [Lahrichi *et al.* 2006], les auteurs ont examiné l'optimalité de la méthode proposée par [Blais *et al.* 2003] en analysant les données historiques des années 1998-1999 et 2002-2003 concernant le nombre des visites ainsi que la distribution de ces visites entre les districts. Deux lacunes principales ont été mises en évidence. Premièrement, l'approche proposée pourrait conduire au déséquilibre de la charge de travail même en absence de fluctuations de demande entre les districts. Deuxièmement, cette approche n'est pas flexible en termes de la cession des dispensateurs de soins dans les districts qui ne favorisent pas la collaboration entre les différents prestataires de soins.

Dans les travaux de [Boldy & Howell 1980], les auteurs ont proposé une approche pour résoudre le problème d'allocation des ressources d'une organisation des soins à domicile réparties sur plusieurs secteurs géographiques. Ils prennent en compte dans cette approche, différentes hypothèses et critères tels que la répartition de la charge de travail entre les différents territoires, les données des patients (nombre de patients par zone, besoin de soins, type de soins demandés, etc). La meilleure allocation étant prise par un manager.

[Hertz & Lahrichi 2006] se sont intéressés à l'hospitalisation à domicile au Québec. Les auteurs proposent de diviser le territoire en six zones en assignant à chaque zone une équipe pluridisciplinaire de professionnels. Ils ont pris en compte plusieurs critères tels que le nombre de patients dans chaque zone, le nombre de visites nécessaires afin d'assurer un meilleur équilibrage de la charge de travail entre les ressources. Cela conduit à une meilleure affectation des patients aux ressources et une réduction des temps de déplacement, d'où l'augmentation du nombre de patients pris en charge. En effet, ils ont établi deux méthodes : une basée sur la programmation linéaire mixte et une deuxième basée sur la programmation non linéaire. Les auteurs constatent qu'il est possible de réduire le nombre de visites et les charges de travail des infirmiers s'ils sont autorisés à se déplacer loin de leur localisation et qui peuvent, par conséquent, appartenir à d'autres zones. D'où une meilleure flexibilité entre les zones. C'est une alternative intéressante comparée à la réorganisation des zones qui est coûteuse en temps et en ressources et qui peut causer d'importants changements dans le cadre du suivi des patients.

2.4.2 Étude de la qualité des soins et l'épuisement professionnel des infirmiers

L'hospitalisation à domicile permet de réduire les coûts tout en maintenant à la fois la qualité des soins et le patient dans son cadre familial. L'HAD mène depuis sa création une politique qui vise à s'assurer que les conditions de sécurité et de qualité des soins

lors de la prise en charge du patient soient optimales et s'inscrivent dans une dynamique d'amélioration continue. L'HAD cerne une qualité de prise en charge médicamenteuse qui vise à sécuriser le circuit du médicament afin de donner le bon médicament, au bon patient, au bon moment et dans de bonnes conditions.

[Sentilhes-Monkam 2006] présente le point de vue des patients et des proches sur leur prise en charge de la fin de vie par l'HAD sur une enquête qualitative réalisée auprès des patients dont l'espérance de vie était estimée à moins de trois mois, de leurs proches et de leurs soignants d'HAD [Sentilhes-Monkam-Daverat 2004]. L'auteur propose d'évaluer les pratiques des équipes de soins en HAD, le niveau de qualité de prise en charge des patients, le niveau de qualité des interventions. Il constate que les patients se sentaient plus à l'aise chez eux plutôt que dans les murs de l'hôpital.

Dans [Jacobs *et al.* 2007], les auteurs étudient l'impact de l'hospitalisation à domicile sur la population et sur le système hospitalier à Jérusalem. Ils montrent que la fermeture de l'HAD entraîne une forte augmentation des coûts de la médecine générale et gériatrique. L'étude montre que les personnes âgées nécessitent de plus en plus de soins. À la suite de cette étude, une décision a été prise pour augmenter le budget attribué aux soins à domicile permettant ainsi de soigner plus de 300 patients.

Dans une étude récente [Reid *et al.* 2010], les auteurs examinent l'impact de l'hospitalisation à domicile sur l'expérience des patients. L'analyse des données fournies pour une période entre 21 et 24 mois pour suivre l'évolution réalisée pour atteindre de multiples objectifs tels que l'amélioration de la qualité des soins, la création d'un environnement de travail durable, la réduction des coûts et enfin l'impact de l'HAD sur l'épuisement professionnel des professionnels. Les résultats montrent des améliorations dans l'expérience des patients, la qualité des soins et l'épuisement des professionnels sur une période de deux ans.

À notre connaissance la pénibilité n'a jamais été abordée dans la littérature de l'optimisation de la planification des soins à domicile. Le phénomène et ses impacts eux-mêmes ayant eu du mal à être acceptés. Cependant, après l'apparition des premiers articles, il y eut un changement majeur dans les services de ressources humaines [Maslach 1993]. Ces professionnels ont donné un appui substantiel à la fois sur la validité du phénomène et sur son importance comme un risque professionnel. Une fois reconnue comme une question légitime, la pénibilité a commencé à attirer l'attention de divers chercheurs. Depuis, la concentration au tour des phénomènes extrêmes de *burnout* a augmenté de façon spectaculaire. Il est maintenant reconnu comme un problème social important. Nous allons introduire un état de l'art plus détaillé dans le chapitre 4 sur les travaux existants traitant les problèmes de la pénibilité.

2.4.3 Synthèse et classification des travaux

Les structures de soins à domicile ont beaucoup grandi au cours de cette dernière décennie et ont émergé comme un véritable substitut à l'hospitalisation traditionnelle qui permet la réduction des coûts de soins et l'amélioration du bien-être des patients. Nous récapitulons la liste des travaux que nous avons relevés dans le tableau (2.1) s'adressant aux problématiques des soins à domicile.

TABLE 2.1 – *Problématiques identifiées en soins à domicile*

Problématique	Travaux
Tournées de personnels	[Cheng & Rich 1998], [Steeg & Schröder 2008], [Cappanera & Scutellà 2013], [Begur <i>et al.</i> 1997], [Borsani <i>et al.</i> 2006], [Ben Bachouch <i>et al.</i> 2008], [Ettore & Andrea 2010], [Issaoui <i>et al.</i> 2015], [Eveborn <i>et al.</i> 2006], [Bertels & Fahle 2006], [Bard <i>et al.</i> 2013]
Ordonnancement des tournées des soignants	[Liu <i>et al.</i> 2013], [Nguyen & Montemanni 2013], [Lanzarone & Matta 2014], [Mesghouni <i>et al.</i> 2015], [Akjiratikarl <i>et al.</i> 2007]
Répartition des ressources par secteur géographique	[Blais <i>et al.</i> 2003], [Hertz & Lahrichi 2006], [Boldy & Howell 1980]
Allocation des ressources en HAD	[De Angelis 1998], [Bozkaya <i>et al.</i> 2003], [Lahrichi <i>et al.</i> 2006]
Etude de la qualité des soins	[Sentilhes-Monkam 2006], [Sentilhes-Monkam-Daverat 2004], [Jacobs <i>et al.</i> 2007], [Reid <i>et al.</i> 2010]
L'épuisement professionnel des infirmiers	[Maslach 1993]
Impacts des soins à domicile	[Chevalier <i>et al.</i> 2015], [Peter 2015], [Lasserre 2010], [Exley & Allen 2007]

D'après le tableau (2.1), nous remarquons que les problématiques sur l'épuisement professionnel des infirmiers ainsi que la répartition des ressources par secteur géographique sont les moins étudiés dans les travaux de la littérature et que la plupart des travaux ont été réalisés depuis les années 2000. Ce qui s'explique par le développement récent

de l'HAD. Nous pouvons également répartir les travaux par niveau de décision. En effet, des travaux se situent au niveau stratégique afin de connaître les besoins de la structure en ressources humaines et matérielles. Quelques travaux au niveau tactique existent et se focalisent sur la gestion des compétences des ressources humaines, le dimensionnement du personnel et d'affectation des ressources humaines aux secteurs géographiques. Enfin, certains travaux existent au niveau opérationnel, où la majorité des travaux traitent l'affectation des ressources aux activités, la planification des tournées du personnel ou encore les livraisons des médicaments.

Nous constatons que la plupart des problématiques rencontrées en HAD sont des problématiques qui relèvent de l'optimisation de la planification des ressources. Dans la littérature, nous avons identifié des travaux qui se sont intéressés aux problématiques de tournées du personnel, à la répartition des ressources par secteur géographique, à la problématique d'allocation des ressources en HAD et à la problématique sur l'épuisement professionnel des infirmiers. En réalisant une revue de la bibliographie sur l'HAD, nous avons constaté que les thématiques issues de ce domaine applicatif ne se sont développées que très récemment au cours du 21^{ème} siècle avec peu de travaux traités sur la pénibilité, la planification des tournées des infirmiers sur plusieurs périodes ainsi que la répartition des ressources par secteur géographique.

La majorité des critères optimisés dans les travaux que nous avons cité traitent la minimisation du coût total du trajet avec 85% des articles. D'autres travaux se sont focalisés sur la maximisation du nombre de services réalisés ([Akjratikar *et al.* 2007], [Nickel *et al.* 2012]) alors que d'autres travaux se sont intéressés par la minimisation du nombre de patients ([Allaoua *et al.* 2013], [Bräysy *et al.* 2009]).

Dans nos travaux, nous allons se positionner par rapport la prise de décision au niveau tactique (sectorisation) et au niveau de la planification des HAD avec la prise en compte des facteurs essentiels en organisation des soins à domicile à savoir la robustesse vis-à-vis des demandes incertaines et la pénibilité de travail. Nous étudions la pénibilité tout en considérant trois critères d'optimisation (la charge de travail, la nature des tâches et enfin le rythme de travail).

2.5 Conclusion

L'HAD assure une prise en charge globale du patient à son domicile en lui offrant la possibilité d'une meilleure qualité de vie dans son environnement habituel. L'HAD a connu une forte croissance ces dernières années où plusieurs chercheurs se sont intéressés pour résoudre diverses thématiques et problématiques des soins à domicile.

Afin d'éclaircir l'origine de toutes ces problématiques, nous avons rappelé, dans une première étape, les concepts utiles de la planification d'activités et les différentes méthodes

de résolution que nous allons utiliser dans cette thèse. Dans une deuxième étape, nous avons présenté les problématiques que nous avons trouvé dans la littérature et nous les avons réparti suivant trois niveaux décisionnels : stratégique, tactique et opérationnel. Nous avons constaté que la planification à moyen terme en intégrant les tournées des infirmiers, la pénibilité et la répartition des ressources par secteur géographique ont été les moins étudiés dans la littérature. Ces trois sujets constituent les trois prochains chapitres de cette thèse.

Chapitre 3

Planification multipériode des tournées des infirmiers en HAD

Sommaire

3.1	Introduction	52
3.2	Problématique	53
3.3	Planification Hebdomadaire (PH)	54
3.3.1	Description des activités de soin	54
3.3.2	Description du plan hebdomadaire	55
3.3.3	Formulation mathématique (MIP-3.1)	56
3.3.3.1	Paramètres et notations	56
3.3.3.2	Modèle mathématique	57
3.3.4	Recherche tabou	58
3.4	Planification Journalière (PJ)	60
3.4.1	Modélisation	61
3.4.1.1	Notations et données	61
3.4.1.2	Formulation mathématique (MIP-3.2)	61
3.4.2	Heuristique basée sur le MIP-3.2	62
3.5	Résultats et expérimentations	63
3.6	Conclusion	66

Ce chapitre a pour objectif d'étudier la première problématique de planification multipériode des tournées des infirmiers en hospitalisation à domicile

3.1 Introduction

L'hospitalisation à domicile (HAD) est apparue comme un moyen de réduction des dépenses du domaine de la santé tout en maintenant une bonne qualité de service. Les structures d'HAD permettent d'assurer au domicile du malade, pour une période limitée mais révisable en fonction de son état de santé, des soins médicaux et paramédicaux. L'HAD répond à une demande générale et croissante de prise en charge à domicile, de la part des patients comme des aidants. L'HAD peut également contribuer à la coordination des différentes formes de prise en charge à domicile en apportant son expérience et son savoir-faire (permanence des soins, coordination, protocolisation des soins infirmiers où les soins infirmiers font l'objet de protocoles précis et où, par ailleurs, la multiplication des démarches qualité aboutit à une normalisation croissante de l'activité à l'exemple des « plans de soins » qui guident désormais l'activité quotidienne des infirmiers d'un hôpital local, tenues, au nom de la continuité des soins). Les structures d'HAD font intervenir de nombreux personnels médicaux (médecins, infirmiers), paramédicaux (kinésithérapeutes, auxiliaires de vie, ...) et de support (secrétaires, livreurs) qui interviennent en partie au domicile du patient. Ainsi, la mise en œuvre d'une coordination extrêmement fine entre les différents acteurs et les professionnels intervenants dans la prise en charge s'avère nécessaire. Cette coordination permet de garantir l'efficacité des soins (en minimisant les retards, les annulations, les redondances), de maîtriser les coûts et d'améliorer la prise en charge des patients grâce à des soins de qualité.

Le problème de planification abordé dans ce chapitre, est appelé problème de planification des soins à domicile (en anglais Home Health Care Planning problem : HHCP). Il consiste à affecter les personnels aux tâches afin d'optimiser les coûts et respecter les contraintes de temps de travail (l'utilisation du temps de travail supplémentaire est limité) et les contraintes de qualité de service. Deux problèmes de planification des soins à domiciles sont considérés : la Planification Hebdomadaire (PH) et la Planification Journalière (PJ). Au début de chaque semaine, les tâches connues de la semaine sont planifiées afin de satisfaire les contraintes de leur plan de soins de la semaine. Par conséquent, le problème HHCP est considéré comme un problème de tournées de véhicules multi-période avec fenêtres de temps, où le jour et l'heure des visites sont décidées. Les fenêtres de temps proviennent depuis les soins spécifiques ou depuis des contraintes légales des temps de service. Chaque jour, le plan journalier doit être mis à jour pour intégrer des nouvelles demandes. Ainsi, une variante du problème de tournées de véhicules classique (VRP) peut être résolue de manière à conserver certaines caractéristiques principales du plan hebdomadaire. Les principales caractéristiques à préserver peuvent être la date (jour et heure) des visites des patients, les dates de début et de fin des tournées des soignants. Les tâches logistiques comme les fournitures ou la délivrance des médicaments peuvent être effectués par un soignant, logisticien, infirmier ou une aide-soignante. Il est donc nécessaire d'intégrer tous

les types d'employés dans la planification.

Le chapitre est organisé de la manière suivante. Dans la section 3.2, nous décrivons la problématique de la planification des visites en HAD. Les problèmes hebdomadaires et journaliers sont présentés à la section 3.3 et la section 3.4 avec leur algorithmes de résolution dédiés, respectivement. Les expérimentations numériques ainsi que les résultats obtenus sur une grande variété d'instances sont décrites et discutées dans la section 3.5. Nous clôturons le chapitre avec la contribution du chapitre ainsi que des perspectives de recherche dans la section 3.6.

3.2 Problématique

La planification est un outil permettant de structurer la dispensation des soins. Le plan est évalué et mis à jour par le personnel chaque semaine. Ensuite, le planning est construit sur une base hebdomadaire. Les employés peuvent appeler les patients pour fixer les rendez-vous et commander les médicaments et matériaux médicaux. Certains services doivent être livrés dans des fenêtres de temps en raison des conditions médicales ou les préférences des patients. Comme la plupart des séjours sont très courts - moins de deux semaines - la continuité des soins (dans le sens d'un aide-soignant pour chaque patient) n'est pas nécessaire et l'affectation des tâches aux infirmiers est soumise uniquement à des contraintes de capacité.

Chaque semaine, de nombreuses demandes sont révélées. Les nouvelles demandes sont principalement liées à des nouvelles admissions, mais les patients actuels peuvent également avoir besoin de soins supplémentaires. Un planning hebdomadaire optimisé doit faciliter l'insertion des nouvelles demandes, tout en optimisant la charge de travail quotidienne pour chaque infirmier. Bien que le plan de soins permette une certaine souplesse sur la date de service, tous les rendez-vous déjà fixés ne peuvent pas être reportés à un autre jour. En effet, le changement d'une date de service implique l'accord du patient. En raison de cette étape de validation, il ne peut pas être intégré correctement dans le modèle d'optimisation. Ainsi, à la veille de chaque jour, le plan journalier final est calculé afin d'insérer toutes les nouvelles demandes et conserver toutes les tâches déjà affectées à ce jour. En pratique, cela suppose en cas de surcharge sur une journée que le manager cherche à déplacer certaines visites puis réoptimise et valide au près des patients.

D'autres caractéristiques du plan hebdomadaire sont conservées à l'aide des contraintes souples. Comme les patients connaissent déjà leur date de visite, tout retard qui dépasse un seuil Δ est pénalisé. Les personnels doivent réaliser d'autres activités que de livrer des soins. Par exemple, ils doivent préparer les médicaments et le matériel pour chaque tournée ou organiser leurs prochaines tournées. On pénalise alors le fait de commencer leur tournée plus tôt ou plus tard par rapport à la date originale donnée avant le début de la semaine.

Dans ce qui suit, nous allons décrire brièvement les différentes caractéristiques de chaque problème d’optimisation traité.

3.3 Planification Hebdomadaire (PH)

Nous abordons dans cette section, le problème de planification hebdomadaire. Nous allons décrire les différents types d’activités de soin dans les structures HAD. Nous proposons par la suite, une formulation sous forme de programme linéaire en nombres entiers notée MIP-3.1. Un solveur dédié ne permet pas d’obtenir des solutions pertinentes pour des instances de taille réaliste (environ 10 ressources humaines et 400 tâches), mais ce modèle donne une définition formelle du problème qui constitue aussi la base de la solution du plan journalier. Ce problème est étroitement lié à l’objet de nombreuses études de types tournées de véhicules périodiques (PVRP : *Periodic Vehicle Routing Problem*). Nous décrivons, par la suite, une méthode de recherche tabou pour la résolution de ce problème.

3.3.1 Description des activités de soin

Les différents types de ressources en HAD sont en charge de plusieurs types d’activités. Dans certaines structures, ils s’occupent même du standard téléphonique ou des activités administratives. Quand nous parlons d’activités en HAD, nous visons les actes médicaux, la visite de contrôle (visite qui permet à l’HAD de vérifier le bon déroulement de la prise en charge au domicile du patient), la livraison/collecte de produit ou de matériel, les actes non médicaux, les soins psychologiques et sociaux nécessités par l’état du patient.

Dans le cadre de sa contribution à l’évaluation de l’état de santé du patient et à la réalisation du plan de soins, l’infirmier peut procéder à un planning qui comprend un ensemble des soins appelées « tâches ». Tout comme l’aide-soignante à domicile (qui n’a cependant pas les mêmes missions), l’infirmier à domicile a cependant plusieurs missions (soins, appui administratif etc. . .). L’infirmier à domicile accomplit les tâches suivantes lors de ses visites au sein du domicile de la personne malade :

- Dispense de soins infirmiers prenant des formes différentes selon la prescription du médecin traitant (exemples : traitement des escarres, injections, surveillance des sondes, perfusions, lavements. . .).
- Dispense de soins d’hygiène générale,
- Suivi thérapeutique et administration de traitements,
- Surveillance de l’évolution de l’état de santé des personnes,
- Aide à l’accomplissement des actes essentiels de la vie : mobilité, se lever, coucher,
- Aide au maintien ou à la restauration de l’autonomie,
- Appui administratif : aide à l’accomplissement des formalités liées aux soins.

3.3.2 Description du plan hebdomadaire

L'horizon de planification est divisé en périodes. Un patron est une série de périodes où le patient doit être visité. Pour chaque jour, les itinéraires de la flotte de véhicules doivent visiter les patients. Ces flottes partent d'un dépôt et se rendent aux domiciles de tous les patients devant être visités le même jour. Le temps total de transport sur un horizon est généralement minimisé. Dans notre cas, les périodes correspondent à une demi-journée et l'horizon de planification est d'une semaine. Les durées d'une tournée ne doivent pas dépasser une demi-journée. Dans les problèmes de HHCP, un client est une tâche et un patron est un ensemble de périodes possibles pour cette tâche. Le dépôt est le centre de HAD, la flotte de véhicules est hétérogène comme des véhicules qui représentent le personnel avec des compétences différentes : infirmier, aide-soignant et logisticien. Chaque tâche exige une qualification spécifique. Les qualifications sont liées par des tâches logistiques qui peuvent être effectuées par n'importe quel employé. Les contraintes de fenêtres de temps peuvent être définies pour toute tâche.

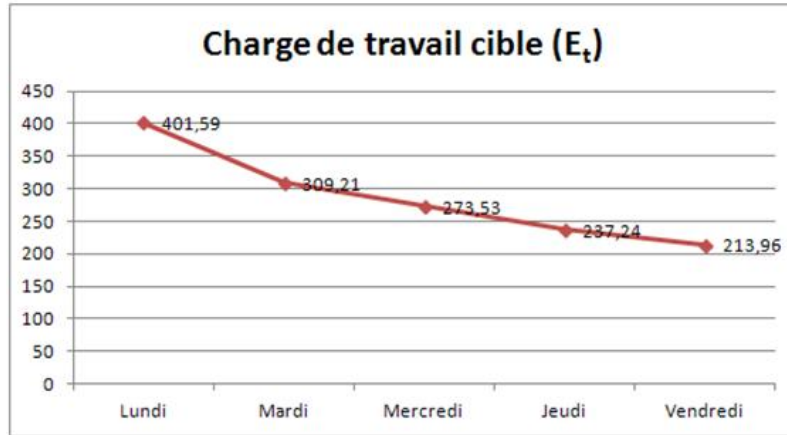
Chaque jour, les personnels soignants travaillent sur deux demi-journées. Ils prennent leurs fonctions le matin et reviennent à midi pour prendre leur déjeuner et assistent à des réunions d'équipes. Ces réunions ne sont pas généralisées à tous les services HHC. Nous n'avons pas intégré la prise en compte des pauses déjeuner. Les pratiques à ce niveau dépendent des HAD et peuvent complexifier le modèle sans réellement impacter notre approche de résolution. C'est pourquoi nous avons choisi une coupure obligatoire en milieu de journée. L'affectation du personnel aux tâches et les tournées sont optimisés afin de déterminer la charge de travail du personnel et la date de service pour chaque tâche qui représentent le résultat de cette phase d'optimisation. Certaines marges doivent être prévues afin de pouvoir absorber les nouvelles demandes. Comme les incertitudes augmentent dans le temps, les marges doivent augmenter avec le temps, c'est à dire les derniers jours du plan hebdomadaire doivent être moins chargés. La charge de travail totale « cible » est définie pour chaque jour.

La charge de travail cible est ce qui caractérise notre approche de résolution car elle va définir la robustesse de PH face aux nouvelles demandes. Dans notre cas, la répartition de la charge de travail globale estimée sur la semaine se calcule sur la base de l'équation (3.1) avec E_t désigne la charge de travail cible pour chaque jour, d_j représente la durée de chaque tâche j et $distance_j^{dept}$ désigne les distances au dépôt.

$$E_t = \sum_{j \in J} d_j + (\sum_{j \in J} distance_j^{dept})/2 \quad \forall t \in T \quad (3.1)$$

Cette équation est validée empiriquement sur nos instances avec l'hypothèse que 20% de demandes révélées de façon croissante dans le temps comme le montre le tableaux 3.1 et la figure 3.1. L'objectif étant de laisser suffisamment de marge pour absorber les nouvelles demandes arrivant durant la semaine.

Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi
$\approx 0\%$	$\approx 2\%$	$\approx 4\%$	$\approx 6\%$	$\approx 8\%$

TABLE 3.1 – *Pourcentage demandes inconnues/ jour*FIGURE 3.1 – *Charge de travail cible*

Dans ce qui suit, nous proposons un modèle de programmation linéaire en nombres mixtes, MIP-3.1, pour la planification hebdomadaire. L'objectif du PH est de minimiser le coût total du transport prévu ainsi que l'écart entre la charge de travail réelle et la charge de travail cible pour chaque jour. En raison de la taille des problèmes du monde réel - des centaines de tâches - les solveurs commerciaux actuellement disponibles ne peuvent pas résoudre tel quel MIP-3.1. Un algorithme de recherche tabou est conçu pour fournir des solutions optimisées.

3.3.3 Formulation mathématique (MIP-3.1)

Dans cette partie, nous décrivons le modèle proposé pour la planification hebdomadaire. Nous présentons, les données du problème, la fonction objectif à optimiser et les contraintes prises en compte. Nous modélisons le modèle mathématique sous la forme d'un programme linéaire en nombres mixtes que l'on note par (MIP-3.1).

3.3.3.1 Paramètres et notations

Nous présentons dans cette section les différents paramètres et variables de décision ainsi que la fonction objectif et les contraintes. Un ensemble d'infirmiers noté $R = \{1, \dots, r\}$ doit effectuer un ensemble de tâches. Un ensemble de périodes noté par $T = \{1, \dots, t\}$ représente l'horizon de planification. $A = \cup_{r \in R, t \in T} A(r, t)$ est l'ensemble de tâches avec $A(r, t)$ indiquant l'ensemble des tâches faisables par chaque ressource r et pour chaque

période t . $V = \cup_{r \in R, t \in T} V(r, t)$ est l'ensemble de tâches avec $V(r, t) = A(r, t) \cup \{dd_r\} \cup \{ad_r\}$ et dd_r et ad_r des tâches fictives représentant les dépôts de départ et d'arrivée pour chaque ressource r , respectivement. Les temps de déplacement entre deux tâches j et k notés t_{jk} avec $j, k \in V$ sont supposés connus. Chaque tâche j nécessite une durée de service d_j . Les dates de visites au plus tôt et au plus tard sont représentées tous les jours par e_j et l_j respectivement. La charge de travail cible de chaque période $t \in T$ est donnée par E_t . On définit $\alpha \in \mathbb{R}^+$ un coefficient de pénalisation. On pénalise par α la somme des écarts H_t entre la charge de travail réelle et la charge de travail cible de chaque période. M est une valeur choisie assez grande.

Nous définissons trois variables de décisions relatives au premier modèle. Une première variable binaire X_{jk}^{rt} qui vaut 1 si la ressource r se déplace directement de la tâche j vers la tâche k à la période t . Une deuxième variable de décision notée S_{rj}^t qui représente l'horaire de début de service de la tâche j par la ressource r à la période t . La dernière variable de décision notée H_t décrit le dépassement de la charge de travail cible à la période t .

3.3.3.2 Modèle mathématique

Dans la littérature, plusieurs critères ont été optimisés tels que la minimisation des heures de travail supplémentaires [Cheng & Rich 1998], la maximisation du nombre de visites à domicile [De Angelis 1998] et la minimisation des coûts de transport [Bertels & Fahle 2006]. Dans la plupart des problèmes pratiques d'optimisation, plusieurs critères sont à prendre en considération afin d'obtenir une solution satisfaisante.

Dans ce chapitre, nous considérons deux objectifs : la minimisation du coût de déplacement et la minimisation du dépassement de la charge de travail cible. Le modèle MIP-3.1 est décrit comme suit :

$$\text{MIP-3.1 : } \min z = \sum_{r \in R} \sum_{j \in V} \sum_{k \in V} \sum_{t \in T} t_{jk} X_{jk}^{rt} + \alpha \sum_{t \in T} H_t \quad (3.2)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{t \in T: k \in A(r, t)} \sum_{j \in V(r, t)} X_{jk}^{rt} \geq 1 \quad \forall k \in A \quad (3.3)$$

$$(X_{jk}^{rt} - 1)M \leq S_{rk}^t - S_{rj}^t - d_j - t_{jk} \quad \forall j, k \in V(r, t), r \in R, t \in T \quad (3.4)$$

$$\sum_{j \in V(r, t)} X_{jk}^{rt} = \sum_{j \in V(r, t)} X_{kj}^{rt} \quad \forall r \in R, t \in T, k \in A(r, t) \quad (3.5)$$

$$\sum_{r \in R} \sum_{j \in V(r, t)} \sum_{k \in V(r, t)} X_{kj}^{rt} (d_j + t_{jk}) \leq H_t + E_t \quad \forall t \in T \quad (3.6)$$

$$H_t \geq 0 \quad \forall t \in T \quad (3.7)$$

$$X_{jk}^{rt} = 0 \quad \forall r \in R, t \in T, k \notin V(r, t) \quad (3.8)$$

$$X_{jk}^{rt} \in \{0, 1\} \quad \forall j, k \in V, r \in R, t \in T \quad (3.9)$$

$$e_j \leq S_{rj}^t \leq l_j \quad \forall j \in V, r \in R, t \in T \quad (3.10)$$

La fonction objectif (3.2) minimise une somme pondérée du coût total de transport et de la somme de dépassements des charges de travail cibles. Les contraintes (3.3) assurent que chaque tâche est affectée à une seule ressource et une seule période. Les contraintes (3.4) déterminent le temps d'arrivée en fonction des contraintes de précédences. Les contraintes (3.5) assurent la continuité des tournées. Les contraintes (3.6) et (3.7) définissent le dépassement de la charge de travail cible. Les contraintes (3.8) mettent certaines variables à zéro ; ils peuvent être maintenu par une étape de prétraitement. Les contraintes (3.9) définissent les variables binaires. Les contraintes (3.10) assurent que les fenêtres de temps sont respectées. Appliquées aux dépôts, les contraintes (3.10) imposent la durée maximale des tournées.

3.3.4 Recherche tabou

La recherche tabou (TS) est l'une des approches métaheuristiques les plus efficaces sur de nombreux problèmes de tournées de véhicules. En outre, TS requiert un développement et un paramétrage relativement léger. Notre TS est inspirée de la recherche tabou proposée dans [Cordeau *et al.* 1997] pour les problèmes de tournées de véhicules périodiques multi-dépôts pour lesquels les opérateurs de voisinage standards génèrent de nombreuses solutions irréalisables. Le schéma général de notre recherche tabou est décrit dans l'algorithme 3.

Algorithme 3 : Algorithme de recherche tabou

- 1: $X^* := X$:= déterminer une solution initiale ;
 - 2: $N(X)$:= ensemble des solutions voisines ;
 - 3: $\mathcal{M} \subset P(N(X))$:= meilleur ensemble des mouvements indépendants ;
 - 4: $X := \mathcal{M}$ appliqué pour X ;
 - 5: $X^* := X$ si $Z(X^*) > Z(X)$;
 - 6: Mettre à jour la liste tabou et les niveaux d'aspirations ;
 - 7: Si le critère d'arrêt n'est pas satisfait, aller à l'étape 2.
-

Une solution initiale est générée avec un algorithme de liste glouton à l'étape (1) ; la liste des patients est générée aléatoirement. Un ensemble des solutions voisines à l'étape (2) est déterminé avec les opérateurs de voisinages (0-1) et (1-1). Le premier voisinage compte toutes les solutions d'insertion possibles pour chaque tâche après l'avoir retirée de sa position courante. L'opérateur de voisinage (1-1) est défini par l'échange de deux tâches. On

notera, dans notre implémentation, que les mouvements sont considérés entre les tournées des différents jours possibles de la réalisation de chaque tâche.

La figure 3.2 montre un exemple d'application des opérateurs de voisinages et les mouvements indépendants. Supposant qu'on a une solution de départ avec un centre HAD (dépôt), 3 tournées d'infirmiers et 11 patients à visiter. Dans un premier cas, la position du patient 3 est déplacée dans la même tournée en appliquant l'opérateur de voisinage (0-0). Ce mouvement coûte 6. Dans un deuxième cas, l'opérateur de voisinage (1-1) est appliqué en remplaçant les positions des deux patients 7 et 10 de deux tournées différentes et des deux journées différentes. Ce mouvement coûte 8. Parmi tous les mouvements évalués, le meilleur ensemble de mouvements indépendants est sélectionné à l'étape (3). Les mouvements qualifiés doivent satisfaire toutes les contraintes du modèle (3.2)- (3.10) à l'exception des contraintes de fenêtres de temps. Les mouvements sont indépendants si la combinaison de leurs contributions (lorsque les mouvements sont tous effectués) à la fonction objectif est égale à la somme des contributions indépendantes de chaque mouvement. Par exemple, deux mouvements faisant intervenir différents jours sont indépendants. Des mouvements sur une seule tournée, peuvent être indépendants quand aucune contrainte de fenêtre de temps n'est violée avant et après les mouvements. Le sous ensemble optimal de mouvements indépendants est calculé par la résolution d'un problème général d'appariement (*General matching problem*) sur un graphe où les nœuds sont des paires d'employés (tournées) et de périodes, et les arêtes sont pondérées par la meilleure valeur parmi tous les voisins portant sur ses deux nœuds extrêmes.

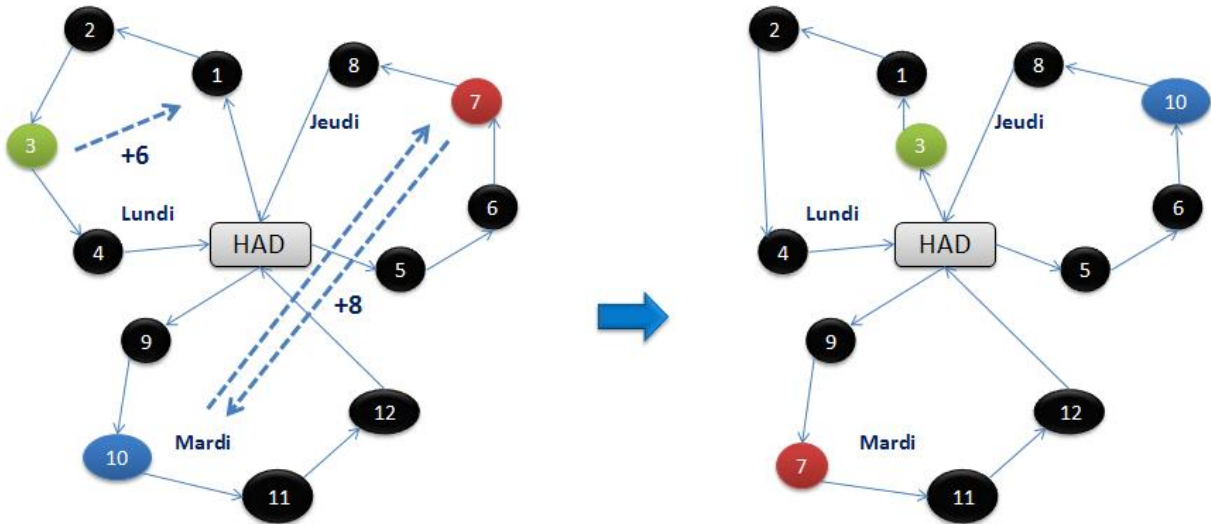


FIGURE 3.2 – Opérateurs de voisinage et mouvements indépendants

Une solution voisine est évaluée par une fonction fitness g définie dans l'équation (3.11). Le dernier terme pénalise les contraintes de violation de fenêtres de temps avec le paramètre

variable γ .

$$g(X) := \sum_{r \in R} \sum_{j \in V} \sum_{k \in V} \sum_{t \in T} t_{jk} X_{jk}^{rt} + \sum_{t \in T} H_t + \gamma \sum_{j \in V, r \in R, t \in T} \max(e_j - S_{rj}^t; S_{rj}^t - l_j; 0) \quad (3.11)$$

Chaque nœud est reproduit afin de modéliser les voisins sur des itinéraires simples. L'indépendance est vérifiée pour le temps de travail et les coûts des fenêtres de temps, mais pas pour le dépassement des charges cibles. Des expérimentations ont montré que ce biais peut être négligé puisque ce cas apparaît rarement et induit de petits écarts dans l'évaluation globale des solutions. L'algorithme polynomial (cubique) résolvant le *General matching problem* est celui implémenté par [Gabow 1976].

À l'étape (5), la meilleure solution connue est mise à jour avec la solution obtenue par l'application des mouvements sélectionnés. Comme dans [Cordeau *et al.* 1997], deux paramètres sont mis à jour à l'étape (6) en vue de contrôler la divergence de l'exploration. Le principal est la liste tabou. Pour chaque tâche repérée dans un mouvement sélectionné, l'attribut d'origine (jour, employé, position dans la séquence) de la tâche est interdit pour un certain nombre fixe d'itérations. De cette façon, on peut espérer éviter les boucles sur un petit ensemble de solutions.

Chaque position est également associée à une valeur d'aspiration, qui est définie comme le coût de la meilleure solution possible trouvée avec cette position. Ainsi, une solution voisine $\bar{X}$ de la solution courante X peut être considérée uniquement si : (i) toutes les nouvelles positions qui ne sont pas dans X mais dans $\bar{X}$, sont non-tabou, ou (ii) $\bar{X}$ est faisable et $z(\bar{X})$ est inférieure aux valeurs d'aspiration de ces positions. Les étapes (2)- (7) sont répétées jusqu'à ce qu'un nombre limité d'itérations soit atteint.

La complexité en temps des deux voisinages explorés est cubique car l'évaluation de la violation des contraintes de fenêtres de temps est de complexité linéaire. Généralement, ce pire des cas n'est pas rencontré car les mouvements à évaluer ne concernent que les employés qualifiés et les jours de visites possibles.

3.4 Planification Journalière (PJ)

Quand le plan hebdomadaire est calculé, certaines demandes inconnues doivent être insérées chaque jour. Nous supposons que toutes les demandes journalières sont connues à l'avance (avant chaque jour). L'insertion de nouvelles demandes doit préserver autant que possible le planning hebdomadaire. L'affectation aux membres du personnel est considérée comme une variable de décision libre. Nous prévoyons que la solution optimale après l'insertion soit proche de la solution initiale, puisque la fonction objectif pénalise l'écart par rapport à la solution originale. La taille du problème journalier permet d'utiliser un solveur de *branch-and-cut* pour améliorer la solution originale. La formulation du modèle linéaire

en nombres entiers du problème journalier et l'approche heuristique basée sur un modèle linéaire en nombres mixtes sont décrits dans les sections suivantes.

3.4.1 Modélisation

Dans ce problème, de nouveaux paramètres et variables sont introduits. Les contraintes (3.10) sur les fenêtres de temps sont remplacées par une fonction de coût linéaire par morceaux sur l'écart de temps de service. À chaque tâche j est associé un intervalle d'indifférence (A_j, B_j) contenant la date de visite du plan hebdomadaire tel que le coût est nul dans cet intervalle et le coût croît en dehors de cet intervalle. La date de début au plus tôt et la date de fin au plus tard des tournées pour chaque ressource sont également pénalisées par des fonctions linéaires. Dans ce qui suit, nous proposons une formulation mathématique du problème de planning journalier. L'objectif du plan journalier est de minimiser le coût total du transport et les pénalités sur les avances et les retards par rapport au plan hebdomadaire. Les contraintes liées à la charge de travail cible sont supprimées et de nouvelles contraintes sont ajoutées. Les paramètres et les variables supplémentaires sont énumérés ci-dessous.

3.4.1.1 Notations et données

Les nouvelles fenêtres de temps définies pour la tâche j sont données par $[A_j, B_j]$. Les horaires de début et de fin pour chaque tournée et pour chaque ressource r à la période t dans le plan initial sont donnés par $[TG_r^t, TD_r^t]$. Les écarts par rapport aux dates de début au plus tôt et au plus tard pour chaque tâche j sont mesurés par EA_j et EB_j , respectivement. Les dates de début au plus tôt et au plus tard pour chaque tournée r et pour chaque période t sont mesurés par Av_r^t et Rv_r^t respectivement. Les poids de pénalisation des deux types d'écarts (avance et retard) du plan hebdomadaire sont notés μ et σ .

3.4.1.2 Formulation mathématique (MIP-3.2)

Le modèle MIP-3.2 est décrit comme suit :

$$\begin{aligned} \text{MIP-3.2 : } Min Z = & \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} \sum_{j \in V(r,t)} \sum_{k \in V(r,t)} t_{jk} \cdot X_{jk}^{rt} + \mu \sum_{j \in A} EA_j + \mu \sum_{j \in A} EB_j \\ & + \delta \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} (TG_r^t - Av_r^t) + \delta \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} (Rv_r^t - TD_r^t) \end{aligned} \quad (3.12)$$

sous contraintes (3.3), (3.4), (3.5), (3.8), (3.9), et

$$Av_r^t \leq TG_r^t \quad \forall r \in R, t \in T \quad (3.13)$$

$$Av_r^t \leq S_{rddr}^t \quad \forall r \in R, t \in T \quad (3.14)$$

$$Rv_r^t \geq TD_r^t \quad \forall r \in R, t \in T \quad (3.15)$$

$$Rv_r^t \geq S_{rad_r}^t \quad \forall r \in R, t \in T \quad (3.16)$$

$$S_{rj}^t + EA_j \geq A_j \quad \forall r \in R, t \in T, j \in A(r, t) \quad (3.17)$$

$$S_{rj}^t - EB_j \leq B_j \quad \forall r \in R, t \in T, j \in A(r, t) \quad (3.18)$$

$$S_{rj}^t \geq 0 \quad \forall r \in R, t \in T, j \in A \quad (3.19)$$

$$EA_j, EB_j \geq 0 \quad \forall j \in A \quad (3.20)$$

$$Av_r^t, Rv_r^t \geq 0 \quad \forall r \in R, t \in T \quad (3.21)$$

Les contraintes (3.13)-(3.14) déterminent la date de départ réelle permettant de déterminer l'écart par rapport au plan hebdomadaire. Les contraintes (3.15)-(3.16) déterminent les écarts de dates de visites par rapport au plan hebdomadaire. Les avances et les retards des temps de services sont calculés dans les contraintes (3.17) et (3.18) respectivement. Les contraintes d'intégrité sont données par les contraintes (3.19)-(3.20) et (3.21).

3.4.2 Heuristique basée sur le MIP-3.2

Plusieurs chercheurs ont essayé de concevoir des algorithmes heuristiques ou méta-heuristiques en exploitant l'efficacité des solveurs et les propriétés de convergence des méthodes exactes, basées par exemple sur la programmation linéaire ou la programmation par contraintes. Ces approches constituent une partie des métaheuristiques. Pour plus de détails, le lecteur est prié de lire les deux travaux en matheuristique pour les problèmes de tournées [Archetti & Speranza 2014] et [Doerner & Schmid 2010]. Ces approches peuvent fournir de bonnes solutions lorsque les métaheuristiques classiques ne parviennent pas à obtenir des améliorations. Une autre caractéristique intéressante est la robustesse de ces méthodes à ces problèmes, comme il est facile d'ajouter des contraintes en utilisant les solveurs. L'heuristique proposée ici suit cette direction de recherche en appliquant la recherche intensive sur des séries de sous-problèmes.

La figure 3.3 décrit brièvement les différentes étapes de l'heuristique. Dans une première phase, un algorithme de liste insère toutes les tâches non couvertes dans la solution obtenue en résolvant le problème hebdomadaire. Une meilleure insertion uniquement basée sur la minimisation des temps de transport est utilisée ici. Enfin, toutes les tâches de la journée courante sont couvertes dans ce qu'on appelle la solution initiale. Le jour de la visite du nœud de la solution initiale est conservé, mais la période peut changer entre le matin et le soir. Notre heuristique considère un plan journalier pour chaque paire de périodes dans le même jour. À partir de la solution initiale, certaines sous-séquences de tournées sont fixées. Le MIP-3.2 du problème journalier est exécuté avec des contraintes supplémentaires qui imposent certaines sous-séquences, comme dans l'équation (3.22) (si j précède k dans la sous-séquence).

$$\sum_{r \in R} \sum_{t \in T} X_{jk}^{rt} = 1 \quad (3.22)$$

En d'autres termes, les sous-séquences deviennent des nœuds dans le problème de tournées. Les sous-séquences peuvent être affectées à toute ressource avec les compétences requises. Un nombre limité de sous-séquences est généré aléatoirement. Ce nombre est défini par la capacité de calcul du solveur de fournir des solutions optimisées dans un temps limité. Ce problème nous permet de considérer des combinaisons complexes de mouvements de bases.

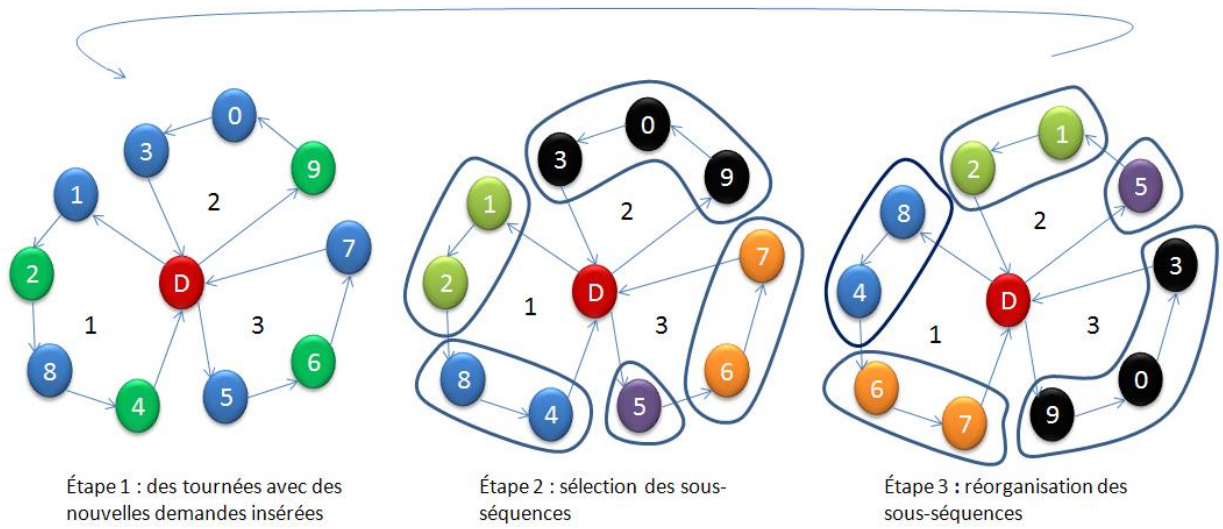


FIGURE 3.3 – *Étapes de l'heuristique*

On note que tous les sous-séquences sont sélectionnées aléatoirement. Leur nombre dépend de la performance du solveur de PLNE. Chaque sous-séquence est imposée indivisible et est traitée comme un sommet ce qui donne un problème de taille réduite.

3.5 Résultats et expérimentations

Cette section présente les résultats d'une série d'expérimentations pour évaluer notre approche en deux étapes et de notre modélisation. À notre connaissance aucun papier ne traite le problème de planification hebdomadaire des soins à domicile comprenant des demandes dynamiques. Aucun benchmark n'existe pour tester notre approche. Nous avons construit nos propres instances de la manière suivante. Les ratios des types de tâches sont définis à partir des données historiques de la structure d'hospitalisation à domicile à Sallanches (France). Nous tirons les paramètres à partir des données et des expériences de ce centre HAD, afin de générer un ensemble d'instances. La moitié des soins infirmiers

exigent des durées de service comprises entre 10 et 30 minutes, 20% nécessitent des aides-soignants avec une durée entre 30 et 60 minutes et d'autres tâches concernent la logistique et nécessitent des durées de 5 minutes (délivrance de médicaments en général). Les employés sont distribués avec 50% des aides-soignants, 40% des infirmiers et 10% des logisticiens. Les tâches sont générées dans un carré 100x100 et les temps de trajet sont définis par des distances euclidiennes. Un seul dépôt est considéré comme le centre HAD et est placé dans le centre du carré.

Les algorithmes ont été codés en C++ et exécutés sur un processeur 2.4 Ghz. Le logiciel IBM Ilog Cplex 12.6 est utilisé pour exécuter les algorithmes branch-and-cut dans la deuxième étape de l'heuristique. Les modèles complets des problèmes hebdomadaires et journaliers ont également été résolus sur certain nombre d'instances mais Cplex ne parvient pas à trouver des solutions réalisables même pour des problèmes sur 3 périodes et 5 ressources et moins de 60 tâches. Dix instances ont été générées avec 10 ressources (4 infirmiers, 5 aides-soignants et un logisticien), 300 tâches (connues avant le début de la semaine) et 10 périodes de 4 heures (2 par jour). Tous les objectifs sont exprimés en minutes et leurs poids dans les fonctions objectifs (α , μ et σ) sont fixés à 1.

Dans le tableau (3.2), nous présentons les résultats obtenus par l'algorithme de recherche tabou. Pour chaque instance, 3 séries de 1000 itérations (quelques améliorations se produisent après les 500 itérations) ont été effectuées. Les temps de calcul moyens et les valeurs des fonctions objectifs (temps de travail total, écart avec la charge de travail cible et la violation des contraintes de fenêtres de temps) peuvent être trouvés dans les trois dernières colonnes, mesurés en minutes. Les valeurs obtenues pour les 10 instances sont agrégées sur chaque ligne par valeur moyenne, minimum et maximum, respectivement. La charge de travail totale (environ 5 heures par jour, puisque la valeur dans la colonne charge de travail est donnée en minutes et concerne 10 salariés pendant les 5 jours) semble faible, mais un certain temps est requis pour les prochaines arrivées et faire face à d'autres activités (administratives) dans le centre HAD.

Le temps total de travail supplémentaire est très grand mais il est calculé à partir d'une estimation approximative (les durées des tâches plus la moitié de la distance vers le dépôt). La performance la plus importante à noter est la diminution de la charge de travail dans le tableau 3.3, où l'on peut voir l'impact de l'objectif sur la charge de travail cible. Bien que les fenêtres de temps soient définies comme des contraintes dures dans le problème hebdomadaire, notre recherche tabou n'est pas toujours en mesure de trouver des solutions réalisables (il peut ne pas en exister).

Le nombre total de minutes de l'écart au cours de la semaine est donné dans la colonne fenêtre de temps. Les valeurs minimales et maximales du tableau 3.2 indiquent que les solutions obtenues sont stables sur les 10 instances générées. Mais dans le tableau 3.3, l'écart entre le minimum et le maximum de la charge de travail planifiée sur toute la semaine peut varier de plus de 40%. Cela signifie que cette variation dépend de la répartition

géographique des patients, l'algorithme mettant plus au moins de marges à différents jours.

TABLE 3.2 – *Résultats de la recherche tabou du plan hebdomadaire*

	cpu (s.)	charge de travail	charge de travail espérée	fenêtres de temps
moyenne	14	14355.3	3019.6	86.7
minimum	13	13007	2076	0
maximum	16	14898	3446	267

TABLE 3.3 – *Charge de travail quotidienne du plan journalier*

	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi
moyenne	4015.9	3092.1	2735.3	2372.4	2139.6
minimum	3600	2431	2385	1765	1521
maximum	4721	3714	3383	2663	2822

Les nouvelles demandes sont générées pour chaque jour de la semaine pour atteindre 475 tâches au cours de la semaine. Cela correspond à des données réelles, où environ 20% des tâches sont révélées durant toute la semaine. Notre algorithme a été exécuté trois fois sur chaque instance selon trois politiques différentes. La première politique (P1) est comparée aux deux autres politiques : dans (P2) le plan hebdomadaire n'autorise pas la flexibilité sur la période pour la réalisation de la tâche (la période préférée est imposée) ; dans (P3) l'étape de pénalisation basée sur la demande cible est écartée. Dix itérations (une itération nécessite environ 1 minute) de notre deuxième heuristique sont réalisées pour chaque jour (une paire de périodes).

Les résultats moyens obtenus à la première et la deuxième phase sont listés pour chaque politique dans les tableaux 3.4 et 3.5. Les coûts finaux totaux (somme de plus de cinq jours) et les valeurs des différents objectifs sont donnés en minutes (les avances et les retards sur les tâches, ainsi que les tournées des ressources). Les résultats obtenus pour les deux instances sont dans les deux premières séries des trois lignes. Les trois dernières lignes représentent les valeurs moyennes pour 10 instances. Le temps de travail obtenu après la première phase (P1) n'est pas minimal par rapport aux autres politiques, mais le coût total final après la deuxième phase est minimal pour (P1). Ainsi, sur l'ensemble de ces instances, la politique (P1) permet de fournir des solutions plus robustes que (P2) et (P3) compte tenu d'une combinaison de cinq objectifs. Même si le temps de travail total est plus élevé dans la solution de la première phase de la politique (P1), il permet d'atteindre, en moyenne, une meilleure solution après l'insertion des nouvelles demandes après la deuxième phase.

TABLE 3.4 – *Comparaison des trois politiques : première phase*

Pol.	Charge de travail	Charge de travail espérée	Fenêtres de temps
P(1)	15129	3468	96
P(2)	14825	3166	31
P(3)	14586	0	28
P(1)	15274	3730	97
P(2)	14872	0	69
P(3)	14768	3224	56
P(1)	14241	2939	69
P(2)	14981	3677	105
P(3)	14258	14258	85

TABLE 3.5 – *Comparaison des trois politiques : deuxième phase*

Pol.	Coût total	transport	Tâches (avances)	tâches (retard)	Ressources (avances)	Ressources (retard)
P(1)	15867	10027	143	2733	54	2874
P(2)	16609	10461	66	2736	88	3223
P(3)	16423	10457	81	2877	18	2954
P(1)	15102	10116	93	2184	63	2623
P(2)	16310	10838	89	2377	101	2874
P(3)	16387	10378	196	2613	66	3114
P(1)	15328	9786	87	2352	0	2699
P(2)	15932	10457	96	2581	26	2745
P(3)	15664	9912	99	2610	40	2974

3.6 Conclusion

Ce chapitre étudie le problème de planification des ressources humaines dans les services des soins à domicile y compris certaines caractéristiques spécifiques du système Français. Notre problème est lié à des problèmes de tournées de véhicules très complexes incluant le PVRP (problème de tournées de véhicules multi-périodes) et le PVRPTW (problème de tournées de véhicules multi-périodes avec fenêtres de temps). Il peut être facile de prouver que notre problème est fortement NP-Difficile, car il a comme cas particulier le problème classique de VRP. Même pour un centre HAD de petite taille, la littérature sur les problèmes de tournées de véhicules multi-périodes montrent que les problèmes avec au moins 400 nœuds deviennent intraitables pour l'état de l'art des approches exactes. Ainsi, nous concevons une métaheuristique capable de fournir des solutions à deux problèmes connexes : le problème hebdomadaire et journalier où les nouvelles demandes sont révélées. Malgré le manque d'informations sur la position des demandes, nos expérimentations montrent que

le planificateur peut profiter d'une estimation approximative des demandes imprévues et une estimation précise pour le calcul de l'itinéraire des tournées.

La combinaison des caractéristiques suivantes de notre approche constitue la contribution de ce chapitre : (a) les décisions de routage à l'étape de décision hebdomadaire ; (b) la charge de travail quotidienne est anticipée ; (c) les compétences des employés et (4) la minimisation de l'écart entre les solutions tactiques et les solutions opérationnelles. L'algorithme développé pour la première phase de décision exploite un cas particulier de VRP, où chaque patron possible - une liste de jours pour les visites - pour un client est une seule journée. En réalité, les clients dans le VRP sont des tâches pour les HHCP à la place des patients.

Ce travail a donné lieu à un article publié dans IEEE [Triki *et al.* 2014] et qui peut être poursuivi en deux manières. Premièrement, la performance des algorithmes peut être améliorée, en particulier la deuxième phase. Il semble qu'une heuristique plus rapide peut être appliquée avant d'exécuter la deuxième phase métaheuristique. La recherche tabou de la première phase peut être facilement adaptée à ce problème. Une deuxième recherche future est l'évaluation de notre approche dans des applications réelles et sur des benchmarks d'autres applications.

Chapitre 4

La pénibilité dans les problèmes de planification des soins à domicile

Sommaire

4.1	Introduction	70
4.2	Contexte général de la pénibilité	70
4.3	Littérature sur les problèmes de la pénibilité	71
4.4	La pénibilité dans le problème de planification des soins à domicile	72
4.5	Approche de résolution	73
4.6	Planification journalière (étapes 1 & 2) - Génération de colonnes	74
4.7	Problème d'affectation des tournées pénibles sur la semaine - étape 3	77
4.7.1	Infirmiers toujours présents (MIP-4.1)	77
4.7.1.1	Notations et données	77
4.7.1.2	Modèle mathématique	77
4.7.2	Des jours de présence infirmiers différents (MIP-4.2)	78
4.7.2.1	Notations et données	78
4.7.2.2	Modèle mathématique	78
4.7.3	Optimisation du rythme (MIP-4.3)	79
4.7.3.1	Notations et données	79
4.7.3.2	Modèle mathématique	79
4.8	Expérimentations numériques	80
4.9	Construction des instances	80
4.10	Planification journalière	83
4.11	Planification hebdomadaire	86
4.12	Conclusion	86

Dans le chapitre précédent, nous avons étudié le problème d'affectation du personnel aux tâches sur une semaine divisée en périodes d'une demi-journée tout en considérant la prise en compte des nouvelles demandes révélées pendant la semaine. Un plan hebdomadaire optimisé est donc établi afin de faciliter l'insertion des nouvelles demandes. Dans ce présent chapitre, nous étudions un nouveau concept qui s'applique dans le domaine de la planification des soins à domicile à savoir l'aspect de la pénibilité.

4.1 Introduction

Depuis quelques années, les structures HAD sont confrontées à un nouvel enjeu : assurer pour leurs collaborateurs de meilleures conditions de travail. Plusieurs études ont montré que les travailleurs en soins de santé, en particulier les infirmiers, ont un risque supérieur que les autres professionnels de développement de la détresse émotionnelle liée au stress du travail. D'où, le concept de la « pénibilité ». Dans ce cadre, nous considérons ce concept comme résultant d'une situation de travail difficile et contraignante, pouvant causer un désintérêt, une situation de stress, voire une dégradation de l'état de santé du travailleur. Les travailleurs soumis à des conditions pénibles sont les plus susceptibles de développer un cas de « burnout » aux conséquences dramatiques pour le travailleur et aussi pour l'employeur avec un arrêt de travail souvent à longue durée.

L'organisation du document est la suivante. Le contexte général du concept de la pénibilité est introduit dans la section 4.2. Nous rappelons quelques travaux existants dans la littérature qui traitent les problèmes de la pénibilité dans la section 4.3. Ensuite, nous décrivons les critères de la pénibilité que nous considérons dans le cadre de la planification des soins à domicile dans la section 4.4. L'approche de résolution adressée dans ce chapitre pour résoudre le problème de la pénibilité est détaillée dans la section 4.5.

4.2 Contexte général de la pénibilité

La pénibilité se trouve au croisement de plusieurs notions : le fait d'être exposé à des contraintes liées au travail, ayant potentiellement des effets sur la santé des infirmiers et donnant lieu à un ressenti différencié en fonction des caractéristiques des individus (patients) et des caractéristiques des situations de travail. Ces différentes notions (contraintes, effets, ressenti) constituent autant de points d'entrée pour aborder la pénibilité dans le contexte de la planification des soins à domicile. En effet, plusieurs recherches en matière de santé au travail permettent d'identifier certaines contraintes liées au travail comme ayant potentiellement un impact direct sur l'état de santé des patients. Il est question, en

particulier, des contraintes physiques marquées, des environnements agressifs et de certains rythmes de travail.

Toutefois, il n'existe pas toujours de liens de causalité directs entre l'exposition à une contrainte et les effets sur la santé. C'est pourquoi il est très difficile de fixer des seuils a priori. Selon le code du travail, plusieurs facteurs de risque d'exposition à la pénibilité retenus par l'État classés en trois catégories. La première catégorie concerne le rythme de travail à savoir le travail de nuit et le travail en équipes successives alternatives. La deuxième catégorie concerne l'environnement de travail à savoir le bruit, les températures extrêmes et enfin les risques chimiques. La dernière catégorie concerne tous les types de Troubles Musculo-Squelettiques (TMS).

4.3 Littérature sur les problèmes de la pénibilité

Le terme *burnout* est apparu pour la première fois dans les années 70 dans la littérature psychologique par un psychologue américain [Freudenberger 1974] pour décrire les symptômes de l'épuisement professionnel et mener une étude complète sur le syndrome d'épuisement professionnel. Le terme burnout peut être défini dans [Maslach & Leiter 2008] comme un syndrome d'épuisement caractérisé par un épuisement émotionnel (se sentir émotionnellement surchargé de travail), le cynisme (le désengagement actif à partir de son emploi) et l'inefficacité (diminution de l'accomplissement personnel).

Les conséquences du stress au travail et l'épuisement professionnel ne se limitent pas à la propre santé des travailleurs, mais affectent également la qualité des soins prodigués aux patients et le bien-être général dans l'organisation. En particulier, les principaux effets du stress en milieu de travail comprennent l'absentéisme [Rugulies *et al.* 2007], la diminution de la satisfaction des patients et de la conformité [Argentero *et al.* 2008], un risque accru d'accident du travail [Salminen *et al.* 2003], l'intention de quitter le lieu de travail [Williams *et al.* 2001] et les erreurs de diagnostic [Rogers *et al.* 2004]. Par exemple, des études ont montré que les infirmiers qui ont déclaré des niveaux plus élevés de pénibilité ont été considérés par leurs patients pour fournir un niveau inférieur des soins de santé [Leiter *et al.* 1998], [Vahey *et al.* 2004] et d'une sécurité inférieure du patient [Halbesleben *et al.* 2008].

Traditionnellement, la plupart des études menées dans les milieux de santé ont mis l'accent sur une ou deux catégories professionnelles (en particulier, les infirmiers et les médecins) et accordent moins d'attention à l'ensemble du personnel hospitalier ([McVicar 2003], [Lindsay *et al.* 2008]). Plusieurs chercheurs ont écrit sur les niveaux élevés de stress au travail et la pénibilité chez les infirmiers ([Lim *et al.* 2010], [McVicar 2003]), mais peu d'études ont comparé ce groupe professionnel avec d'autres personnels de soins (par exemple, les aides-soignantes, physiothérapeutes). De plus, nous n'avons pas trouvé

d'étude spécifique au cas des infirmiers à domicile intégrant les activités de déplacement en voiture ou en transport en commun.

Des études récentes sur les corrélations de la pénibilité ont principalement porté sur les conditions de l'environnement de travail et ont identifié plusieurs facteurs de risque organisationnel qui peuvent influencer sur le degré de concordance ou discordance entre les professionnels de santé et de leur lieu de travail. En particulier la charge de travail, une perception d'injustice, les conflits du travail à domicile et les faibles contrôles de l'emploi ([Escribà-Agüir *et al.* 2006], [Wu *et al.* 2008], [Lasalvia *et al.* 2009], [Langballe *et al.* 2011]).

De nombreuses études ont montré que la haute charge de travail des infirmiers est associée à l'épuisement professionnel ([McVicar 2003], [Stuart *et al.* 2008], [Kowalski *et al.* 2010]). Dans les travaux de [Lasalvia *et al.* 2009], les auteurs ont constaté que la faiblesse de la cohésion du groupe de travail, la perception d'injustice et le contrôle faible de l'emploi étaient les facteurs organisationnels permettant une bonne prédiction de l'épuisement et la santé mentale du personnel.

Dans le secteur des soins à domicile, la surcharge de travail, l'isolement et la confrontation à des situations émotionnelles difficiles peuvent être à l'origine d'une usure prématurée, voire d'un épuisement professionnel, des soignants. L'écoute, l'instauration de temps de partages et d'un soutien, la possibilité d'adapter ou d'ajuster les tournées de soins en cas de besoin sont des mesures fondamentales pour prévenir ces risques. Nous détaillons dans la section suivante les différents critères pour pouvoir mesurer la pénibilité dans le contexte des soins à domicile.

4.4 La pénibilité dans le problème de planification des soins à domicile

La pénibilité est mesurée sur deux échelles de temps. Le niveau hebdomadaire où sont affectés de manière équitable des postes (tournées) pénibles ou non. Ici le nombre de tournées pénibles et le rythme dans la semaine (par exemple, préférer deux tournées pénibles séparés à deux qui se suivent). Nous définissons la pénibilité au niveau journalier autour de cinq critères : la pénibilité des tâches effectuées, l'excès de charge de travail, la durée passée en transport, le déséquilibre des charges de travail en enfin le rythme de travail.

- La pénibilité des tâches effectuées est mesurée par le nombre de visites « pénibles » effectuées. La pénibilité d'une visite est liée à la pénibilité des tâches effectuées chez le patient, l'environnement (habitats, hygiène, présence des aidants ou d'animaux de compagnie) et l'état de santé du patient (grabataire, fin de vie).
- L'excès de charge de travail est mesuré par le dépassement de la durée de travail journalier contractuelle.

- La durée passée en transport reflète la pénibilité ressentie par l’accomplissement de tâches qui ne sont pas le cœur du métier pour un infirmier.
- L’équilibre des charges de travail est lui lié au sentiment d’iniquité et à l’injustice ressentie entre collègues.
- Le rythme de travail est lié au travail de nuit et le travail en équipes successives alternatives.

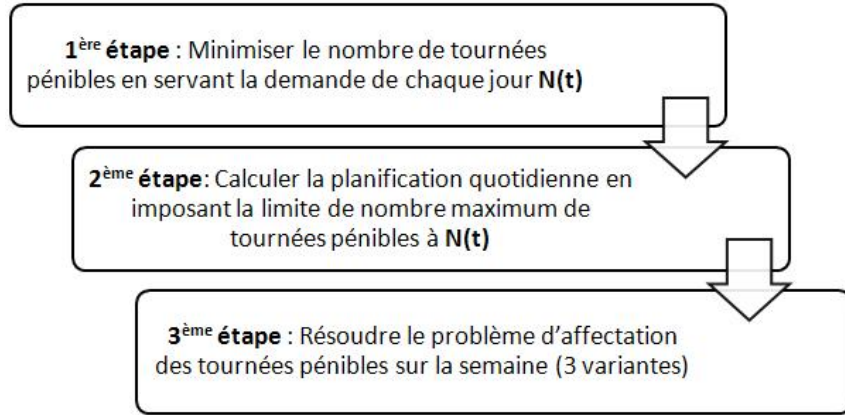
Afin de juger le type de la tournée (pénible ou pas), nous définissons trois seuils de pénibilité qui caractérisent les trois premiers critères cités ci-dessous. En effet, si un des seuils est dépassé alors cette tournée est considérée pénible. Les deux autres critères ne fonctionnent pas sous forme de seuils étant donné que l’équilibrage des charges de travail est un objectif journalier sur les charges de travail individuelles et hebdomadaire en affectant les tournées pénibles alors que pour le rythme de travail, l’objectif au niveau hebdomadaire est d’espacer les tournées pénibles pour une même personne.

Le but de ce chapitre étant d’étudier la prise en compte de la pénibilité, nous simplifions ici les décisions en supposant que toutes les tâches de la semaine sont connues et que le jour de réalisation de chaque tâche est fixé. De même les infirmiers sont supposés pouvoir effectuer n’importe quelle visite. Intégrer ces contraintes ne pose pas de problèmes techniques mais risque de rendre les conclusions sur la prise en compte de la pénibilité plus difficiles à illustrer dans nos expérimentations.

4.5 Approche de résolution

Le problème hebdomadaire de planification abordé dans ce chapitre se décompose en trois étapes (voir figure 4.1). Dans la première étape, le nombre minimum d’infirmiers ayant une tournée pénible est calculé pour chaque jour selon les cinq critères décrits dans la section 4.4. Ensuite, les infirmiers sont affectés à des tournées pénibles au cours de la semaine avec un objectif d’équilibrage de la pénibilité. La troisième étape consiste à calculer la planification quotidienne avec un objectif de performance combinant la minimisation du temps de transport et l’équilibrage des charges de travail sous la contrainte du nombre maximum de tournées pénibles calculée à la première étape.

Pour générer les plannings individuels du problème journalier (étapes 1 et 2), l’algorithme utilisé dans nos expérimentations numérique est basé sur une méthode de génération de colonnes détaillée dans la section 4.6. Pour résoudre le problème d’affectation des tournées pénibles sur la semaine (étape 3), plusieurs modèles mathématiques sont proposés. En raison de la taille réduite du problème d’affectation hebdomadaire des tournées pénibles (avec nos instances) tout solveur de programmation linéaire peut être utilisé pour atteindre rapidement des solutions optimales. Pour résoudre le problème d’affectation des infirmiers aux tournées pénibles sur la semaine, nous proposons trois modèles mathéma-

FIGURE 4.1 – *Approche de résolution*

tiques en nombres entiers (MIP-4.1, MIP-4.2 et MIP-4.3) pour répondre aux trois variantes suivantes : (i) nous supposons que tous les infirmiers sont présents tous les jours, (ii) nous supposons que tous les infirmiers ne sont pas nécessairement présents tous les jours, et enfin (iii) nous supposons que tous les infirmiers ne sont pas nécessairement présents tous les jours avec l'hypothèse d'écarter au maximum les tournées pénibles de chaque infirmier.

Dans la section suivante, nous allons formaliser le problème journalier pour la génération de colonnes.

4.6 Planification journalière (étapes 1 & 2) - Génération de colonnes

Pour la période considérée, un ensemble R d'infirmiers indicés par r , sont disponibles et V l'ensemble des patients indicés par v . Soit J l'ensemble des tournées possibles. On définit pour chaque tournée $j \in J$ les attributs W_j la charge de travail, T_j la durée des déplacements et H_j le nombre de visites pénibles. Si un de ces attributs dépasse le seuil sur le critère associé (seuil sur la charge de travail, seuil sur la durée des déplacements et le seuil sur le nombre de visites pénibles), respectivement, SW_r , ST_r et SH_r la tournée est dite pénible et fixe l'attribut binaire D_j à 1 et 0 sinon. Le paramètre A_{vj} représente que si le patient v est visité dans la tournée j . Le problème d'optimisation visant à minimiser le nombre de tournées pénibles sur une journée s'écrit avec les variables de décisions binaires x_j de sélection des tournées j :

$$\text{Modèle - GC1 : } N_t = \min \sum_{j \in J} D_j x_j \quad (4.1)$$

$$\sum_{j \in J} A_{vj} x_j = 1 \quad \forall v \in V \quad (4.2)$$

$$\sum_{j \in J} x_j \leq |R| \quad (4.3)$$

$$x_j \in \{0, 1\}, \forall j \in J \quad (4.4)$$

L'ensemble J des tournées réalisables étant potentiellement très grand, le modèle -GC1 est résolu dans un algorithme de *branch-and-price* ; *i.e.*, un algorithme de génération de colonnes dans une méthode de séparation et d'évaluation progressive. Le choix de la résolution du modèle-GC par génération de colonnes est justifié par le fait que la méthode est actuellement considérée comme l'approche la plus performante sur la plupart des problèmes de tournées de véhicules. En effet, nous avons adapté une implémentation pour le transport de personnes handicapées.

Un problème maître restreint est défini à l'identique de (4.1)-(4.4) sur un ensemble restreint $J' \setminus J$ de tournées pénibles, en relaxant les contraintes d'intégralité des variables x . À chaque itération des tournées pénibles susceptibles d'améliorer la solution courante (*i.e.*, avec un coût réduit négatif) sont ajoutées. Lorsqu'aucune tournée pénible à coût réduit négatif n'est trouvée, la relaxation continue du problème maître restreint courant est résolue et le mécanisme de séparation et évaluation peut poursuivre à partir de cette solution. Le problème esclave qui recherche les tournées pénibles de coût réduit négatif est résolu par un algorithme de *Label setting*.

Les règles de branchement portent sur les flux fractionnaires sur certains arcs entre deux visites. L'implémentation algorithmique est une adaptation de la version décrite dans [Garaix *et al.* 2010]. Afin d'améliorer les performances de résolution, la contrainte (4.5) est ajoutée au modèle.

$$LB \leq \sum_{j \in J} D_j x_j \leq UB \quad (4.5)$$

Elle permet surtout de brancher dans la méthode de séparation et évaluation en utilisant les bornes de cette contrainte. Une première borne inférieure est calculée de façon combinatoire en calculant un nombre minimum de tournées pénibles en résolvant heuristiquement des problèmes de *bin-packing* sur chacun des seuils de pénibilité. Une première borne supérieure est calculée par une adaptation de l'heuristique de Clarke et Wright. En cours de résolution, cette borne peut être mise à jour en essayant de dériver une solution entière des solutions fractionnaires trouvées pour le problème maître restreint.

Pour résoudre le problème journalier comme défini à l'étape 2 ; avec une minimisation et un équilibrage des charges de travail. La fonction objectif du modèle maître devient (4.6) sous les contraintes (4.7) qui assurent le respect du nombre d'infirmiers ayant une tournée pénible. K est une constante. Prendre l'exponentielle d'une valeur proportionnelle à la charge de travail des tournées sélectionnées donne plus de poids aux tournées avec les charges les plus élevées. Ce qui tend bien à améliorer l'équilibrage des charges sur tous les

infirmiers. Ce modèle permet de conserver un problème esclave unique sans distinction des différents infirmiers, par rapport à des modèles de type *min – max*. La croissance de la fonction exponentielle permet de conserver des performances similaires pour la résolution du problème esclave par un algorithme *Label setting*.

Dans les temps de calcul impartis (1 heure), l'algorithme ne parvient pas toujours à converger. Dans ce cas, le problème maître restreint (avec contraintes d'intégrité) est résolu par le solveur commercial Ilog Cplex version 12.5.

$$\text{Modèle - GC2 : } \min \sum_{j \in J} e^{KW_j} x_j \quad (4.6)$$

$$\sum_{j \in J} D_j x_j \leq N_t \quad \forall t \in T \quad (4.7)$$

Les deux modèles (GC1-GC2) sont résolus par la génération de colonnes similairement (figure 4.2). À chaque itération nous résolvons le modèle GC1 par le simplexe. À partir de la solution optimale, nous avons l'information qui permet de juger pour n'importe quelle tournée si elle est susceptible d'améliorer l'objectif (comme une itération du simplexe où on sélectionne les variables de coût réduit négatif). Grâce à ce critère on cherche de nouvelles tournées susceptibles d'être améliorante. Nous appliquons pour cela un algorithme de plus court chemin sous contraintes de ressources (c'est là que nous calculons les tournées et que nous tenons compte des seuils de pénibilité par exemple). Si nous trouvons des tournées possiblement améliorant la solution dans Ω , nous augmentons l'ensemble des tournées connues et nous recommençons dès le début.

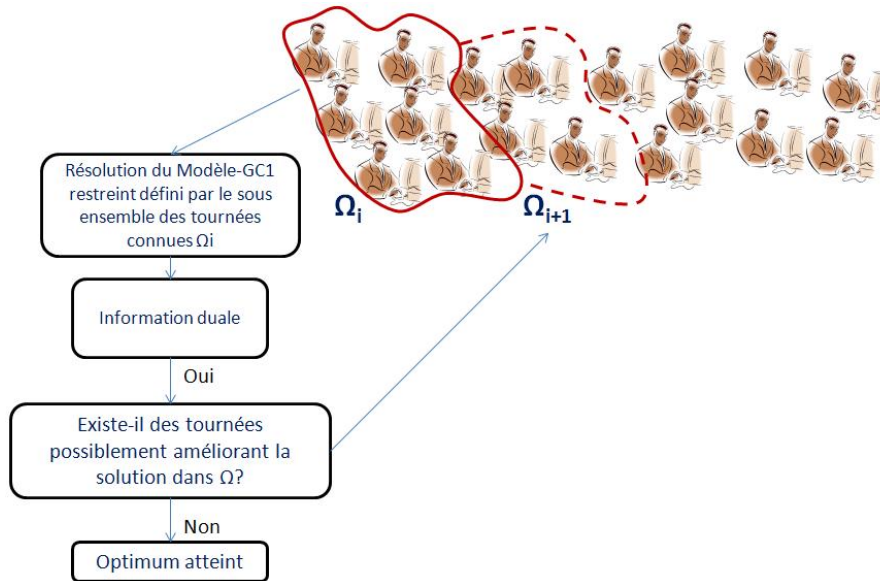


FIGURE 4.2 – Mécanisme de génération de colonnes

Remarque : La génération de colonnes ne permet que de trouver une solution optimale fractionnaire (on autorise à sélectionner un nombre décimal de fois une route). Ce qui n'a pas de sens dans notre cas. La solution entière optimale est donc trouvée en appliquant un classique (Branch & Bound) où chaque nœud est évalué par génération de colonnes.

4.7 Problème d'affectation des tournées pénibles sur la semaine - étape 3

Dans cette section, nous allons proposer les trois modèles mathématiques décrits précédemment afin de trouver un meilleur équilibre de la charge de travail entre les infirmiers sur tout l'horizon de planification.

4.7.1 Infirmiers toujours présents (MIP-4.1)

4.7.1.1 Notations et données

Dans cette première variante, l'affectation est faite sur tout l'horizon en considérant que le personnel est présent tous les jours. Pour modéliser le MIP-4.1, nous aurons besoin de définir deux variables de décisions. Une variable binaire notée par x_r^t qui vaut 1 si l'infirmier r est en tournée pénible au jour t . Une deuxième variable W qui désigne le nombre maximum de tournées pénibles sur l'ensemble des infirmiers. Le paramètre N_t est le nombre de tournées pénibles à couvrir sur la période t . Sa valeur est obtenue par la première étape de l'algorithme.

4.7.1.2 Modèle mathématique

L'objectif du MIP-4.1 est de minimiser le plus grand nombre de tournées pénibles affectées au même infirmier sur tout l'horizon. Cet objectif est exprimé par les contraintes (4.9) et la fonction objectif (4.8). Les contraintes (4.10) assurent le respect du nombre de tournées pénibles affectées pour chaque jour.

$$\text{MIP-4.1 : } \min W \quad (4.8)$$

$$W \geq \sum_{t \in T} x_r^t \quad \forall r \in R \quad (4.9)$$

$$\sum_{r \in R} x_r^t = N_t \quad \forall t \in T \quad (4.10)$$

$$x_r^t \in \{0, 1\} \quad \forall t \in T; r \in R \quad (4.11)$$

Il est clair que ce problème se résout en $\mathcal{O}(|R| \sum_{t \in T} N_t)$ en affectant les tournées pénibles une par une de façon gloutonne, à l'un des infirmiers ayant le moins de tournées pénibles.

4.7.2 Des jours de présence infirmiers différents (MIP-4.2)

Dans cette deuxième variante, l'affectation est faite sur tout l'horizon en considérant que les infirmiers ont des périodes de présence différentes. On appelle « classe » tous les infirmiers présents les mêmes périodes. Une fois déterminé le nombre de tournées pénibles associées à chaque classe pour chaque période, une règle d'affectation similaire à celle de la section précédente pourra être appliquée pour chaque classe indépendamment. Le critère d'équité est pondéré pour chaque classe. Le poids permet par exemple de rapporter le nombre de périodes de présence au nombre de tournées pénibles affectées sur l'horizon.

4.7.2.1 Notations et données

Pour définir le MIP-4.2, nous aurons besoin d'introduire l'ensemble des classes défini par C indexé par c . Le nombre d'infirmiers pour chaque classe c est donné par R_c . Puisque les infirmiers ne sont pas forcément présents tous les jours de l'horizon, l'ensemble des jours de présence des infirmiers de chaque classe c est noté par $T_c \subseteq T$. Le poids dans la fonction objectif associé à chaque classe est noté P_c (par exemple égal à $1/|R_c|$). Nous introduisons deux variables de décisions relatives aux tournées pénibles pour chaque classe. Une première variable W_c qui décrit le nombre de tournées pénibles pour chaque classe c . S_c^t est le nombre de tournées pénibles affectées à la classe c au jour t .

Notons que cette variante est un cas particulier de la variante précédente avec une seule classe de définie, $|C| = 1$.

4.7.2.2 Modèle mathématique

L'objectif de minimisation pondérée du plus grand nombre de tournées pénibles affectées à une classe est exprimé dans les contraintes (4.13) et la fonction objectif (4.12).

$$\text{MIP-4.2 : } \min Z \quad (4.12)$$

$$Z \geq P_c W_c \quad \forall c \in C \quad (4.13)$$

$$W_c = \sum_{t \in T} S_c^t \quad \forall c \in C \quad (4.14)$$

$$S_c^t \leq R_c \quad \forall c \in C; t \in T_c \quad (4.15)$$

$$\sum_{c \in C} S_c^t = N_t \quad \forall t \in T \quad (4.16)$$

$$S_c^t = 0 \quad \forall c \in C; t \notin T_c \quad (4.17)$$

$$S_c^t \in \mathbb{N} \quad \forall c \in C; t \in T \quad (4.18)$$

Les contraintes (4.14) déterminent la valeur de W_c pour chaque classe qui est égale à la somme des tournées pénibles pour chaque classe c . Les contraintes (4.15) assurent le respect du nombre d'infirmiers disponibles pour chaque classe à une période. Les contraintes (4.16) assurent que toutes les tournées pénibles sont couvertes. Les contraintes (4.17) empêchent d'affecter une tournée pénible sur une période où la classe n'est pas présente.

Notons que dans le cas où les classes n'ont pas de jours de présence en commun, on se retrouve avec $|C|$ problèmes à une classe indépendants.

4.7.3 Optimisation du rythme (MIP-4.3)

Dans cette section, nous proposons un modèle mathématique (MIP-4.3) qui consiste à écarter au maximum les tournées pénibles consécutives d'un même infirmier. Cet objectif étant secondaire par rapport au précédent, une limite est imposée sur le nombre (pondéré) de tournées pénibles affectées à chaque classe. En pratique, cette limite est déterminée en résolvant MIP-4.2.

4.7.3.1 Notations et données

Pour modéliser le MIP-4.3, on introduit un nouveau paramètre E qui désigne l'écart minimum qui sépare deux tournées pénibles pour chaque infirmier. Plusieurs valeurs de E sont évaluées – par dichotomie par exemple – afin de trouver la plus grande qui donne une solution réalisable. La valeur de E est bornée par le nombre de périodes de l'horizon. Z^* représente la valeur de la fonction objectif calculée dans le MIP-4.2.

4.7.3.2 Modèle mathématique

Le modèle MIP-4.3 est identique à MIP-4.2 avec la seule contrainte (4.21) en plus.

Pour une valeur de E fixée, les contraintes (4.21) permettent d'imposer un écart d'au moins E périodes entre deux tournées pénibles consécutives pour tout infirmier. Sur chaque ensemble de E périodes consécutives, au plus R_c tournées pénibles sont affectées à la classe c . En numérotant les infirmiers de chaque classe et en affectant les tournées pénibles en suivant cette numérotation en boucle, il est évident que les solutions ainsi définies sont dominantes. Trouver une solution ainsi définie qui viole la contrainte d'écartement pour un infirmier implique par construction qu'une des contraintes (4.21) est violée.

Notons que le cas précédent (MIP-4.2) est un cas particulier de celui-ci avec un écartement $E = 1$.

$$\mathbf{MIP-4.3} : \min Z \quad (4.19)$$

$$Z \geq P_c W_c \quad \forall c \in C \quad (4.20)$$

$$\sum_{\tau=t}^{t+E-1} S_c^\tau \leq R_c \quad \forall c \in C; t = \{1, 2, \dots, T - E + 1\} \quad (4.21)$$

$$W_c = \sum_{t \in T} S_c^t \quad \forall c \in C \quad (4.22)$$

$$S_c^t \leq R_c \quad \forall c \in C; t \in T_c \quad (4.23)$$

$$\sum_{c \in C} S_c^t = N_t \quad \forall t \in T \quad (4.24)$$

$$S_c^t = 0 \quad \forall c \in C; t \notin T_c \quad (4.25)$$

$$S_c^t \in \mathbb{N} \quad \forall c \in C; t \in T \quad (4.26)$$

4.8 Expérimentations numériques

Nos expérimentations ont pour objectif d'étudier sur des instances réelles l'impact de la minimisation de la pénibilité. Peu d'instances réelles ou réalistes de la littérature sont disponibles et aucune ne contient les données relatives à notre caractérisation de la pénibilité. Nous avons effectué des premiers essais avec des instances générées par nous mêmes, les instances de [Mankowska *et al.* 2014] et celles de [Yalçındağ *et al.* 2016].

4.9 Construction des instances

Les résultats présentés ici ont été obtenus à partir des instances de [Yalçındağ *et al.* 2016] car elles sont tirées d'un service réel en Italie et n'ont pas de fenêtres de temps. En effet, bien que des fenêtres de temps sur les horaires de visites simplifient la résolution du problème journalier elles contraignent trop fortement les solutions sur des instances de taille réduite (dizaines de visites) pour observer correctement l'impact des critères de pénibilité. C'est avec le même objectif que nous avons ignoré les contraintes de compétences des infirmiers et leurs jours d'absence.

Dans les 20 fichiers fournis par Yalçındağ *et al.* 100 ou 200 patients sont décrits avec des fréquences de visite. Nous avons défini des journées de service – 5 par fichier – respectant les distributions de probabilité de présence de chaque patient déduites des fréquences de visite hebdomadaire.

Parmi les 100 journées ainsi générées, nous avons retenu les 69 pour lesquelles nous avons obtenu des solutions réalisables en moins d'une heure de calcul. Les valeurs des attributs caractéristiques des 69 instances journalières se trouvent dans le tableau 4.1. Ces attributs sont le nombre d'infirmiers disponibles, le nombre total de visites à effectuer et le nombre de visites pénibles.

Pour ces instances, nous avons ajouté les seuils de pénibilité avec des valeurs identiques pour tous les infirmiers définies par $H_r = H$ pour le nombre de visites pénibles, $W_r = W$ pour la charge de travail et $T_r = T$ pour le déplacement. Des seuils individuels laissent la méthode de résolution valide (un sous-problème différent doit être défini pour chaque type d'infirmier) mais ne présentent pas d'intérêt pour notre étude.

Afin de définir les seuils pour la charge de travail et de déplacement, nous avons résolu une première fois le problème de planification en minimisant le critère sur la charge de travail sans tenir compte de la pénibilité. Cela a permis de trouver des valeurs moyennes pour ces seuils cohérentes avec les données et nous permettant d'obtenir des journées avec certaines tournées pénibles. Les visites pénibles ont été déterminées par un tirage aléatoire uniforme. Ainsi 35% en moyenne des visites sont pénibles et le seuil à éviter de dépasser est fixé à 2. L'ordre de grandeur des durées de service est de 45 minutes. Les valeurs des seuils utilisés sont dans le tableau 4.2.

Cinq séries d'instances correspondant à des semaines sont ensuite générées en sélectionnant par un tirage aléatoire uniforme 5 jours (périodes) parmi les 69 disponibles. Des classes d'infirmiers (qui définissent les jours de présence des infirmiers) sont construites afin de conserver la cohérence avec le nombre d'infirmiers disponibles chaque jour. Les classes sont définies à partir d'un patron définissant les jours de présence de chaque classe. Nous avons établi trois patrons décrits dans le tableau 4.3, à une, deux et trois classes respectivement. Pour ces trois patrons ($S1$, $S2$ et $S3$), 50 instances sont générées en piochant parmi les 69 instances de la première étape. À partir des deux premiers patrons, deux autres séries de 50 instances ($S4$ et $S5$) sont générées en restreignant le choix de journées aux instances journalières avec plusieurs tournées pénibles. Pour le troisième patron, il n'y a pas de combinaison de ce sous ensemble d'instances journalières qui permette de satisfaire le patron, *i.e.*, il n'y a pas d'affectation du nombre d'infirmiers aux classes du troisième patron qui permette d'obtenir exactement le nombre total d'infirmiers chaque jour qui correspond aux instances journalières.

Afin d'obtenir des semaines critiques avec un ratio élevé de visites pénibles par infirmier, une sixième série ($S6$) de 50 instances est générée. Elles contiennent de 1 et 5 classes composées de 1 à 8 infirmiers sur 10 périodes. La probabilité pour chaque classe d'être présente dans une période est de $2/3$. Le nombre de tournées pénibles pour chaque période est ensuite déterminé comme une valeur comprise entre 4 et 9 dixièmes du nombre d'infirmiers disponibles à cette période toutes classes confondues.

instance	infirmiers	visites	pénibles
INS11_1	7	25	8
INS11_2	7	29	8
INS11_3	7	26	11
INS11_4	7	28	13
INS11_5	7	27	10
INS12_1	7	30	11
INS12_3	7	29	7
INS13_1	7	30	11
INS13_2	7	29	8
INS13_3	7	31	11
INS13_4	7	26	10
INS14_1	7	28	9
INS14_2	7	32	13
INS14_3	7	29	7
INS14_4	7	29	8
INS14_5	7	29	12
INS15_1	7	32	12
INS15_2	7	33	13
INS15_3	7	27	5
INS15_4	7	32	14
INS15_5	7	31	8
INS16_1	10	46	16
INS16_3	10	49	19
INS17_1	10	55	15
INS17_3	10	57	22
INS17_5	10	53	20
INS18_2	10	49	16
INS18_3	10	54	18
INS18_5	10	58	21
INS19_1	10	45	13
INS19_2	10	51	15
INS19_5	10	44	14
INS20_5	10	52	21
INS21_1	7	34	12
INS21_4	7	32	14
INS21_5	7	35	16

instance	infirmiers	visites	pénibles
INS22_1	7	31	16
INS22_3	7	30	14
INS22_4	7	30	10
INS23_1	7	24	5
INS23_2	7	27	12
INS23_3	7	24	7
INS23_4	7	24	8
INS23_5	7	26	10
INS24_1	7	25	8
INS24_2	7	27	12
INS24_3	7	23	12
INS24_4	7	23	9
INS24_5	7	27	10
INS25_1	7	26	12
INS25_2	7	27	12
INS25_3	7	25	11
INS25_5	7	25	11
INS26_2	10	54	19
INS26_3	10	56	23
INS26_4	10	63	20
INS26_5	10	45	9
INS27_2	10	52	18
INS27_5	10	51	18
INS28_1	10	49	18
INS28_3	10	60	20
INS28_5	10	55	11
INS29_1	10	53	22
INS29_2	10	57	18
INS29_4	10	65	21
INS29_5	10	51	18
INS30_2	10	51	15
INS30_3	10	53	15
INS30_4	10	64	32

TABLE 4.1 – *Description des instances journalières*

seuil	visites pénibles H	temps de déplacement T	charge de travail W
valeur	2	30 min.	340 min.

TABLE 4.2 – *Seuils de pénibilité*

patron	classe 1	classe 2	classe 3
$S1$	1 1 1 1 1		
$S2, S4$	0 0 1 0 1	1 1 0 1 0	
$S3, S5$	1 1 1 1 1	1 1 0 1 1	1 1 1 0 0

TABLE 4.3 – *Périodes de présence des classes d'infirmiers*

4.10 Planification journalière

Dans les tableaux 4.4 et 4.5, on donne les résultats de l'étape 1 de notre approche. C'est-à-dire, le nombre de tournées pénibles minimum trouvé (colonne 'pénibles'), obtenu par minimisation du nombre de tournées pénibles dans la limite d'une heure de calcul. En imposant ces valeurs comme contrainte (valeur initiale de UB dans l'inégalité (4.5)), on minimise l'objectif d'équilibrage défini par l'équation (4.6). On obtient ainsi les solutions pour chaque journée à l'étape 2. Outre la valeur de la fonction objectif (colonne 'équilibrage'), on trouve dans les tableaux 4.4 et 4.5 les valeurs obtenues pour la somme des durées de déplacements et des charges de travail, respectivement dans les colonnes 'déplacement' et 'charge'. Les valeurs entre parenthèses représentent la déviation en pourcentage par rapport à une résolution où le nombre de tournées pénibles n'est pas borné supérieurement ($UB = \infty$). Pour le nombre de tournées pénibles la valeur donnée entre parenthèses n'est pas une déviation mais la valeur brute trouvée lors de la résolution avec $UB = \infty$.

L'objectif d'équilibrage étant non-linéaire, les deux critères 'déplacement' et 'charge', permettent de mieux appréhender l'impact des contraintes de pénibilité sur le nombre de tournées pénibles, par rapport à une solution où on en tient pas compte.

Peu d'instances sont résolues à l'optimum lorsque l'équilibrage est minimisé mais les gaps d'optimalité sont de quelques pourcents. En observant les déviations avec ou sans prise en compte de la pénibilité, il apparaît que le coût de prise en compte de la pénibilité est assez faible sur ce jeu d'instances. En revanche, le nombre de tournées pénibles obtenues est relativement important si on n'en tient pas compte lors de l'optimisation. On parvient d'ailleurs souvent à obtenir une solution sans aucune tournée pénible.

instance	difficiles	équilibre	déplacement	charge
INS11_1	0 (1)	49,4 (9,6)	178 (9,2)	1303 (1,2)
INS11_2	0 (2)	64,9 (8,8)	193 (4,3)	1498 (0,5)
INS11_3	0 (2)	50,6 (4,3)	182 (8,3)	1352 (1,0)
INS11_4	0 (3)	61,2 (11,6)	191 (6,1)	1451 (0,8)
INS11_5	0 (3)	55,6 (6,6)	190 (5,6)	1405 (0,7)
INS12_1	0 (1)	75,9 (19,0)	189 (3,8)	1539 (0,5)
INS12_3	0 (2)	58,3 (0,0)	172 (0,0)	1477 (0,0)
INS13_1	0 (2)	66,8 (6,4)	184 (7,0)	1534 (0,8)
INS13_2	0 (1)	59,7 (2,8)	169 (0,6)	1474 (0,1)
INS13_3	0 (3)	67,6 (0,0)	175 (-3,8)	1570 (-0,4)
INS13_4	0 (3)	51,7 (5,6)	183 (4,0)	1353 (0,5)
INS14_1	0 (2)	53,8 (0,0)	168 (-4,5)	1428 (-0,6)
INS14_2	0 (3)	72,3 (0,0)	175 (-1,1)	1615 (-0,1)
INS14_3	0 (1)	57,2 (0,0)	158 (0,0)	1463 (0,0)
INS14_4	0 (2)	58,6 (0,3)	172 (3,0)	1477 (0,3)
INS14_5	0 (3)	60,4 (2,7)	175 (0,6)	1480 (0,1)
INS15_1	0 (3)	73,9 (1,3)	194 (4,9)	1634 (0,6)
INS15_2	0 (4)	90,6 (17,4)	199 (8,7)	1729 (3,7)
INS15_3	0 (0)	49,7 (0,2)	149 (1,4)	1364 (0,1)
INS15_4	0 (2)	74,3 (2,7)	183 (4,6)	1623 (0,5)
INS15_5	0 (2)	71,7 (6,1)	187 (8,1)	1582 (0,9)
INS16_1	0 (1)	109,7 (4,0)	275 (7,4)	2345 (0,8)
INS16_3	0 (3)	137,7 (15,6)	277 (6,1)	2482 (0,6)
INS17_1	1 (4)	161,6 (0,0)	279 (-5,1)	2754 (-0,5)
INS17_3	3 (6)	182,0 (0,0)	291 (-2,7)	2856 (-1,8)
INS17_5	1 (5)	157,6 (7,1)	290 (4,3)	2675 (0,5)
INS18_2	0 (4)	133,8 (9,8)	275 (-3,5)	2480 (-0,4)
INS18_3	1 (4)	160,1 (3,3)	296 (6,9)	2726 (0,7)
INS18_5	1 (4)	190,4 (0,0)	284 (-1,7)	2894 (-0,2)
INS19_1	0 (2)	101,1 (1,8)	248 (0,8)	2273 (0,1)
INS19_2	0 (4)	133,6 (1,7)	267 (-1,8)	2562 (-0,2)
INS19_5	0 (3)	96,9 (1,8)	254 (3,7)	2234 (0,4)
INS20_5	1 (6)	142,6 (3,2)	273 (0,7)	2613 (0,1)
INS21_1	0 (3)	86,5 (4,2)	187 (-3,1)	1717 (-0,3)
INS21_4	0 (2)	73,1 (1,5)	185 (5,1)	1625 (0,6)
INS21_5	2 (3)	87,6 (0,9)	193 (3,2)	1768 (0,3)

TABLE 4.4 – *Plannings journaliers*

instance	difficiles	équilibre	déplacement	charge
INS22_1	3 (4)	67,9 (0,2)	178 (1,1)	1573 (0,1)
INS22_3	0 (3)	75,4 (19,1)	195 (10,2)	1545 (1,2)
INS22_4	0 (3)	72,8 (12,8)	188 (-2,1)	1538 (-0,3)
INS23_1	0 (1)	42,2 (0,0)	156 (-5,5)	1236 (-0,7)
INS23_2	0 (3)	50,8 (0,8)	167 (5,7)	1382 (0,7)
INS23_3	0 (0)	41,3 (0,0)	145 (0,0)	1225 (0,0)
INS23_4	0 (2)	43,1 (3,5)	159 (9,7)	1239 (1,1)
INS23_5	0 (1)	47,6 (0,0)	160 (-0,6)	1330 (-0,1)
INS24_1	0 (1)	45,4 (2,0)	171 (10,3)	1296 (1,3)
INS24_2	0 (2)	50,4 (0,0)	161 (4,5)	1376 (0,5)
INS24_3	0 (1)	38,9 (0,2)	153 (1,3)	1188 (0,2)
INS24_4	0 (1)	39,6 (1,1)	160 (5,3)	1195 (0,7)
INS24_5	0 (2)	51,4 (0,6)	175 (3,6)	1390 (0,4)
INS25_1	0 (3)	48,9 (0,0)	176 (-3,8)	1346 (-0,5)
INS25_2	0 (2)	59,5 (14,3)	192 (6,1)	1407 (0,8)
INS25_3	0 (3)	52,4 (15,0)	197 (17,3)	1322 (2,2)
INS25_5	0 (2)	46,9 (4,2)	161 (0,0)	1286 (0,0)
INS26_2	1 (4)	168,6 (8,9)	292 (1,4)	2722 (0,1)
INS26_3	4 (5)	171,1 (0,0)	295 (1,7)	2815 (0,2)
INS26_4	3 (7)	244,6 (0,0)	321 (4,9)	3156 (0,5)
INS26_5	0 (2)	112,2 (11,1)	276 (4,9)	2301 (0,6)
INS27_2	1 (4)	162,5 (15,1)	294 (0,0)	2634 (0,0)
INS27_5	1 (5)	159,5 (17,7)	304 (0,0)	2599 (0,0)
INS28_1	0 (4)	128,9 (6,9)	269 (-1,5)	2474 (-0,2)
INS28_3	2 (6)	207,3 (0,0)	303 (-5,3)	3003 (-0,6)
INS28_5	0 (1)	162,6 (0,8)	273 (-0,7)	2748 (-0,1)
INS29_1	3 (5)	153,0 (0,8)	296 (1,7)	2681 (0,2)
INS29_2	1 (5)	186,4 (4,5)	293 (-2,0)	2858 (-0,2)
INS29_4	7 (7)	265,9 (0,0)	327 (2,2)	3252 (0,2)
INS29_5	1 (6)	139,7 (3,2)	286 (-3,4)	2581 (-0,4)
INS30_2	1 (4)	140,6 (3,4)	292 (1,7)	2587 (0,2)
INS30_3	1 (5)	150,3 (0,8)	277 (-7,7)	2662 (-0,9)
INS30_4	7 (10)	251,5 (0,0)	314 (-6,5)	3194 (-2,1)

TABLE 4.5 – *Plannings journaliers (2)*

4.11 Planification hebdomadaire

Pour chacune des séries d'instances hebdomadaires, le MIP-4.3 est résolu avec le solveur commercial ILOG Cplex 12.6 avec des valeurs de E incrémentales de 1 (aucun écart imposé entre deux tournées pénibles) jusqu'à ce que le problème devient irréalisable. Les temps de calcul sont négligeables (< 1 seconde), sauf pour deux instances où quelques minutes sont nécessaires pour obtenir et prouver l'optimum.

Les résultats de chaque série d'instances sont présentés dans les tableaux 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10 et 4.11. En parcourant les colonnes de gauche à droite, on lit le nombre de classes ($|C|$), le nombre de périodes ($|T|$), le nombre total d'infirmiers ($\sum_{c \in C} R_c$), le nombre total de tournées ($\sum_{c \in C} |T_c| R_c$), le nombre de tournées pénibles ($\sum_{t \in T} N_t$), le plus grand écart minimum pour lequel on obtient une solution réalisable (E), le nombre moyen de tournées pénibles par infirmier ($\frac{\sum_{t \in T} N_t}{\sum_{c \in C} R_c}$), le ratio maximum parmi toutes les classes entre le nombre de tournées pénibles associées et le nombre d'infirmiers dans la solution optimale ($\max_{c \in C} \frac{W_c}{R_c}$), et la valeur optimale de la fonction objectif (Z).

Pour les trois premières séries, le nombre de tournées pénibles est relativement faible par rapport aux infirmiers disponibles ce qui rend l'affectation peu contraignante pour équilibrer les charges. Même en imposant un écartement maximal qui revient à imposer une seule tournée pénible par infirmier sur tout l'horizon, il est possible de trouver une solution dans la plupart des cas. Dans le cas des instances générées en privilégiant les journées à plusieurs tournées pénibles, le ratio $\max_{c \in C} \frac{W_c}{R_c}$ augmente et il est ainsi plus difficile d'imposer un écart important entre deux tournées pénibles pour tous les infirmiers. En regardant le rapport $r = \frac{\sum_{t \in T} N_t}{\sum_{c \in C} R_c} / \max_{c \in C} \frac{W_c}{R_c}$ pour les séries avec plusieurs classes ($r = 0,57$ pour $S2$, $r = 0,54$ pour $S3$, $r = 0,69$ pour $S5$ et $r = 0,88$ pour $S6$) on constate que l'équilibrage entre les classes est plus difficile à maintenir. L'augmentation de la valeur Z pour ces séries indique même en normalisant les ratios de tournées pénibles par infirmiers par le nombre de périodes en présence, on obtient toujours un déséquilibre.

4.12 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons cherché à intégrer des critères de pénibilité dans la planification de l'activité des soins à domicile. Les critères définis tiennent compte de la spécificité de l'activité et notamment du fait de se déplacer pour servir les patients. Face à la difficulté de mesurer la pénibilité qui est personne dépendante et multicritère, nous avons opté pour une modélisation non linéaire et même discontinue, définie par des seuils. Nous avons développé une approche informatique qui permet de calculer des plannings en intégrant ces plannings. Nous avons ensuite montré sur des instances issues de cas réels que nos critères de pénibilité avaient un impact réduit sur les critères économiques liés aux déplacements

et aux durées de travail. Nous avons aussi montré que même si un équilibrage journalier de la pénibilité est difficile à obtenir, il peut également être lissé sur un horizon plus long comme la semaine.

D'autres modélisations plus complexes des fonctions de pénibilité peuvent ainsi être envisagées. Nous pensons que l'approche proposée reste valide pour plusieurs modélisations qui pourrait s'approximer par des fonctions linéaires par morceaux. De plus, les observations qualitatives restent aussi valides si on considère les critères présentés dans ce travail même si on les mesure par d'autres fonctions. Les extensions à des caractérisations personnalisées ne posent pas à priori de difficultés méthodologiques. La véritable difficulté est d'arriver à paramétrer le poids de chaque critère. Pour cela un retour d'expérience sur le terrain est nécessaire.

$ C $	$ T $	$\sum_{c \in C} R_c$	$\sum_{c \in C} T_c R_c$	$\sum_{t \in T} N_t$	E	$\frac{\sum_{t \in T} N_t}{\sum_{c \in C} R_c}$	$\max_{c \in C} \frac{W_c}{R_c}$	Z
1	5	7	35	1	5	0,14	0,14	0,03
1	5	10	50	3	5	0,30	0,30	0,06
1	5	10	50	8	5	0,80	0,80	0,16
1	5	10	50	3	5	0,30	0,30	0,06
1	5	10	50	8	5	0,80	0,80	0,16
1	5	7	35	1	5	0,14	0,14	0,03
1	5	10	50	13	2	1,30	1,30	0,26
1	5	10	50	6	5	0,60	0,60	0,12
1	5	7	35	3	5	0,43	0,43	0,09
1	5	10	50	2	5	0,20	0,20	0,04
1	5	10	50	5	5	0,50	0,50	0,10
1	5	10	50	3	5	0,30	0,30	0,06
1	5	10	50	5	5	0,50	0,50	0,10
1	5	10	50	1	5	0,10	0,10	0,02
1	5	7	35	2	5	0,29	0,29	0,06
1	5	10	50	1	5	0,10	0,10	0,02
1	5	7	35	4	5	0,57	0,57	0,11
1	5	7	35	2	5	0,29	0,29	0,06
1	5	10	50	11	1	1,10	1,10	0,22
1	5	7	35	3	5	0,43	0,43	0,09
1	5	10	50	4	5	0,40	0,40	0,08
1	5	7	35	2	5	0,29	0,29	0,06
1	5	7	35	0	5	0,00	0,00	0,00
1	5	7	35	0	5	0,00	0,00	0,00
1	5	7	35	3	5	0,43	0,43	0,09
1	5	10	50	4	5	0,40	0,40	0,08
1	5	10	50	6	5	0,60	0,60	0,12
1	5	7	35	0	5	0,00	0,00	0,00
1	5	7	35	0	5	0,00	0,00	0,00
1	5	7	35	0	5	0,00	0,00	0,00

TABLE 4.6 – Résultats pour $S1$

$ C $	$ T $	$\sum_{c \in C} R_c$	$\sum_{c \in C} T_c R_c$	$\sum_{t \in T} N_t$	E	$\frac{\sum_{t \in T} N_t}{\sum_{c \in C} R_c}$	$\max_{c \in C} \frac{W_c}{R_c}$	Z
2	5	17	41	2	5	0,12	0,20	0,10
2	5	17	41	1	5	0,06	0,10	0,05
2	5	17	44	3	5	0,18	0,30	0,10
2	5	20	50	3	5	0,15	0,30	0,10
2	5	17	41	1	5	0,06	0,10	0,05
2	5	17	41	2	5	0,12	0,20	0,10
2	5	17	41	1	5	0,06	0,10	0,05
2	5	20	50	8	5	0,40	0,70	0,23
2	5	17	41	1	5	0,06	0,10	0,05
2	5	17	44	4	5	0,24	0,40	0,13
2	5	20	50	3	5	0,15	0,30	0,10
2	5	17	44	5	5	0,29	0,50	0,17
2	5	17	41	4	5	0,24	0,43	0,14
2	5	20	50	8	5	0,40	0,80	0,40
2	5	17	44	8	5	0,47	0,80	0,27
2	5	17	41	1	5	0,06	0,10	0,05
2	5	17	41	2	5	0,12	0,15	0,05
2	5	14	35	1	5	0,07	0,14	0,05
2	5	20	50	13	5	0,65	1,20	0,40
2	5	17	41	4	5	0,24	0,40	0,20
2	5	20	50	6	5	0,30	0,50	0,17
2	5	17	41	2	5	0,12	0,20	0,10
2	5	14	35	3	5	0,21	0,43	0,21
2	5	17	41	3	5	0,18	0,30	0,15
2	5	17	41	2	5	0,12	0,20	0,10
2	5	17	41	1	5	0,06	0,10	0,05
2	5	14	35	0	5	0,00	0,00	0,00
2	5	20	50	2	5	0,10	0,20	0,07
2	5	17	41	7	5	0,41	0,70	0,35
2	5	17	41	3	5	0,18	0,30	0,15

TABLE 4.7 – Résultats pour $S2$

$ C $	$ T $	$\sum_{c \in C} R_c$	$\sum_{c \in C} T_c R_c$	$\sum_{t \in T} N_t$	E	$\frac{\sum_{t \in T} N_t}{\sum_{c \in C} R_c}$	$\max_{c \in C} \frac{W_c}{R_c}$	Z
3	5	10	41	5	5	0,50	0,75	0,15
3	5	10	41	2	5	0,20	0,42	0,08
3	5	10	41	12	3	1,20	1,67	0,33
3	5	10	41	3	5	0,30	0,50	0,10
3	5	10	41	3	5	0,30	0,50	0,10
3	5	10	41	2	5	0,20	0,42	0,08
3	5	10	41	4	5	0,40	0,56	0,11
3	5	10	41	1	5	0,10	0,25	0,05
3	5	10	41	5	5	0,50	0,75	0,15
3	5	10	41	1	5	0,10	0,25	0,05
3	5	10	41	2	5	0,20	0,50	0,10
3	5	10	41	1	5	0,10	0,25	0,05
3	5	10	41	0	5	0,00	0,00	0,00
3	5	10	41	2	5	0,20	0,42	0,08
3	5	10	41	2	5	0,20	0,42	0,08
3	5	10	41	1	5	0,10	0,25	0,05
3	5	10	41	3	5	0,30	0,50	0,10
3	5	10	41	0	5	0,00	0,00	0,00
3	5	10	41	1	5	0,10	0,25	0,05
3	5	10	41	3	5	0,30	0,50	0,10
3	5	10	41	1	5	0,10	0,25	0,05
3	5	10	41	0	5	0,00	0,00	0,00
3	5	10	41	5	5	0,50	0,75	0,15
3	5	10	41	4	5	0,40	0,56	0,11
3	5	10	41	2	5	0,20	0,42	0,08
3	5	10	41	4	5	0,40	0,56	0,11
3	5	10	41	5	5	0,50	0,75	0,15
3	5	10	41	3	5	0,30	0,50	0,10
3	5	10	41	1	5	0,10	0,25	0,05
3	5	10	41	2	5	0,20	0,42	0,08

TABLE 4.8 – Résultats pour $S3$

$ C $	$ T $	$\sum_{c \in C} R_c$	$\sum_{c \in C} T_c R_c$	$\sum_{t \in T} N_t$	E	$\frac{\sum_{t \in T} N_t}{\sum_{c \in C} R_c}$	$\max_{c \in C} \frac{W_c}{R_c}$	Z
1	5	10	50	17	2	1,70	1,70	0,34
1	5	10	50	22	1	2,20	2,20	0,44
1	5	10	50	18	2	1,80	1,80	0,36
1	5	10	50	17	2	1,70	1,70	0,34
1	5	10	50	18	2	1,80	1,80	0,36
1	5	10	50	17	2	1,70	1,70	0,34
1	5	10	50	16	2	1,60	1,60	0,32
1	5	10	50	22	1	2,20	2,20	0,44
1	5	10	50	17	2	1,70	1,70	0,34
1	5	10	50	13	3	1,30	1,30	0,26
1	5	10	50	18	2	1,80	1,80	0,36
1	5	10	50	12	4	1,20	1,20	0,24
1	5	10	50	18	2	1,80	1,80	0,36
1	5	10	50	19	2	1,90	1,90	0,38
1	5	10	50	18	1	1,80	1,80	0,36
1	5	10	50	17	2	1,70	1,70	0,34
1	5	10	50	18	1	1,80	1,80	0,36
1	5	10	50	22	2	2,20	2,20	0,44
1	5	10	50	18	1	1,80	1,80	0,36
1	5	10	50	16	2	1,60	1,60	0,32
1	5	10	50	23	1	2,30	2,30	0,46
1	5	10	50	19	1	1,90	1,90	0,38
1	5	10	50	18	2	1,80	1,80	0,36
1	5	10	50	18	2	1,80	1,80	0,36
1	5	10	50	17	2	1,70	1,70	0,34
1	5	10	50	17	2	1,70	1,70	0,34
1	5	10	50	14	1	1,40	1,40	0,28
1	5	10	50	20	1	2,00	2,00	0,40
1	5	10	50	24	1	2,40	2,40	0,48
1	5	10	50	18	1	1,80	1,80	0,36

TABLE 4.9 – Résultats pour S_4

$ C $	$ T $	$\sum_{c \in C} R_c$	$\sum_{c \in C} T_c R_c$	$\sum_{t \in T} N_t$	E	$\frac{\sum_{t \in T} N_t}{\sum_{c \in C} R_c}$	$\max_{c \in C} \frac{W_c}{R_c}$	Z
2	5	20	50	17	5	0,85	1,50	0,50
2	5	20	50	21	3	1,05	1,50	0,50
2	5	20	50	22	2	1,10	2,10	0,70
2	5	20	50	22	2	1,10	1,60	0,53
2	5	20	50	22	2	1,10	2,10	0,70
2	5	20	50	18	3	0,90	1,20	0,40
2	5	20	50	12	5	0,60	0,75	0,25
2	5	20	50	16	5	0,80	1,35	0,45
2	5	20	50	22	3	1,10	1,50	0,50
2	5	17	44	17	3	1,00	1,20	0,40
2	5	20	50	21	3	1,05	1,35	0,45
2	5	20	50	18	2	0,90	1,65	0,55
2	5	17	44	12	5	0,71	1,07	0,36
2	5	17	44	17	3	1,00	1,20	0,40
2	5	20	50	18	3	0,90	1,20	0,40
2	5	20	50	19	3	0,95	1,20	0,40
2	5	20	50	24	2	1,20	1,70	0,57
2	5	20	50	17	3	0,85	1,20	0,40
2	5	20	50	17	5	0,85	1,50	0,50
2	5	20	50	18	3	0,90	1,20	0,40
2	5	20	50	14	5	0,70	0,90	0,30
2	5	20	50	18	2	0,90	1,65	0,55
2	5	20	50	16	5	0,80	1,35	0,45
2	5	20	50	22	2	1,10	2,10	0,70
2	5	20	50	23	2	1,15	1,70	0,57
2	5	17	44	16	3	0,94	1,10	0,37
2	5	20	50	13	5	0,65	0,80	0,27
2	5	20	50	18	3	0,90	1,10	0,37
2	5	17	44	17	3	1,00	1,20	0,40
2	5	20	50	19	2	0,95	1,30	0,43

TABLE 4.10 – Résultats pour $S5$

$ C $	$ T $	$\sum_{c \in C} R_c$	$\sum_{c \in C} T_c R_c$	$\sum_{t \in T} N_t$	E	$\frac{\sum_{t \in T} N_t}{\sum_{c \in C} R_c}$	$\max_{c \in C} \frac{W_c}{R_c}$	Z
4	10	16	121	71	1	4,44	5,40	0,60
1	10	1	2	2	3	2,00	2,00	1,00
1	10	2	16	8	2	4,00	4,00	0,50
4	10	9	62	36	1	4,00	5,50	0,61
1	10	3	24	12	1	4,00	4,00	0,50
1	10	7	42	27	1	3,86	3,86	0,64
4	10	20	128	82	1	4,10	4,57	0,65
4	10	19	145	95	1	5,00	6,00	0,67
5	10	26	164	100	1	3,85	5,00	0,63
1	10	2	10	5	3	2,50	2,50	0,50
4	10	13	99	53	1	4,08	5,00	0,56
5	10	25	158	91	1	3,64	4,71	0,59
1	10	5	40	20	1	4,00	4,00	0,50
2	10	6	39	22	1	3,67	4,00	0,57
2	10	11	70	42	1	3,82	4,25	0,61
1	10	1	5	5	1	5,00	5,00	1,00
3	10	10	66	43	1	4,30	4,67	0,67
4	10	22	101	62	1	2,82	3,75	0,63
2	10	8	45	16	3	2,00	2,20	0,37
3	10	18	99	55	1	3,06	4,00	0,57
3	10	10	63	29	2	2,90	3,80	0,48
2	10	10	72	39	1	3,90	4,33	0,54
1	10	5	35	17	1	3,40	3,40	0,49
2	10	7	70	45	1	6,43	6,50	0,65
4	10	14	100	48	1	3,43	4,00	0,50
2	10	10	60	35	1	3,50	4,67	0,58
4	10	16	101	43	2	2,69	3,50	0,44
4	10	13	88	53	1	4,08	4,29	0,61
4	10	19	147	85	1	4,47	5,33	0,59
5	10	29	209	123	1	4,24	5,95	0,60

TABLE 4.11 – *Résultats pour S6*

Chapitre 5

Problème de sectorisation pour l'hospitalisation des soins à domicile

Sommaire

5.1	Introduction	96
5.2	Revue de la littérature sur les problèmes de sectorisation	97
5.2.1	La sectorisation politique	97
5.2.2	L'alignement des territoires de ventes	98
5.2.3	La sectorisation scolaire	99
5.2.4	Les territoires d'officiers de police	100
5.2.5	Problème de sectorisation d'énergie électrique	101
5.3	Littérature sur les problèmes de sectorisation en HAD	101
5.4	Synthèse des travaux de la littérature	103
5.5	Description et modélisation du problème	103
5.5.1	Hypothèses	104
5.5.2	Modélisation avec un niveau de service local	105
5.5.3	Modélisation avec un niveau de service global	105
5.5.4	Calcul du nombre d'infirmiers couvrant un district sur une journée	107
5.6	Expérimentations et résultats	108
5.6.1	Génération d'un territoire	108
5.6.2	Génération d'un échantillon de journées sur un territoire	109
5.6.3	Résultats	109
5.7	Conclusion	112

Dans ce dernier chapitre, nous étudions le problème de sectorisation appliqué dans le cadre de l'hospitalisation à domicile des tournées des infirmiers.

5.1 Introduction

La sectorisation ou le districting est le processus de partitionnement d'un territoire (grande région) en zones plus petites pour des raisons d'organisation ou d'administration. Ce processus est réalisé dans de nombreux domaines d'application à savoir les districts politiques, les districts scolaires, les territoires d'officiers de police, l'alignement des ventes et services du territoire, les districts pour la livraison des véhicules et les districts d'énergie électrique. La plupart des approches de districting dans la littérature sont de type agglomération. Cela signifie qu'une grande région géographique est divisée en districts qui sont eux-mêmes pré-partitionnés en bases plus petites (ou unités). En effet, le districting consiste à trouver des groupes pour des zones plus petites afin d'optimiser certains critères ou objectifs tout en satisfaisant certaines contraintes latérales. Certaines fonctions objectifs utilisées pour le problème de districting peuvent être la minimisation des coûts, la minimisation de la distance parcourue et l'équilibrage de la charge de travail. Les contraintes habituelles utilisées sont l'indivisibilité des unités de base, la contiguïté ou la connectivité des districts, la compacité, le respect des limites administratives, etc. Une approche commune pour traiter ce problème consiste à diviser la région en un grand nombre de zones élémentaires (ou unités de base et de regrouper ces unités en districts), tandis qu'une fonction objectif est optimisée et certaines contraintes sont satisfaites. En général, les contraintes du districting consistent à assurer la contiguïté, la compacité et l'équilibrage des districts, alors qu'il n'est généralement pas autorisé à diviser une unité sur plusieurs districts.

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur le problème de sectorisation des services de soins de santé à domicile. La sectorisation pour l'hospitalisation des soins à domicile (HHCDP : Home Health Care Districting Problem) est un problème de planification tactique où un ensemble de zones géographiques est divisé en districts pour être desservis par des équipes d'infirmiers, de telle sorte que la charge de travail est équilibrée entre les districts et que les employeurs de soins à domicile voyagent est réduit au minimum (temps de transport). La localisation géographique d'un patient détermine l'infirmier à laquelle il est affecté. La capacité de chaque équipe d'infirmiers est limitée et leur productivité est influencée par la taille de la région et la façon dont laquelle les demandes des patients y sont distribuées. Une grande région équivaut à des temps de déplacement plus longs, ce qui nécessite plus de temps total pour visiter le même nombre de patients que dans une petite région. Si la demande n'est pas correctement équilibrée entre les districts, les infirmiers peuvent être invités à couvrir temporairement la demande dans les districts où ils ne sont pas affectés. Généralement, les gestionnaires sont motivés par plusieurs facteurs qui justifient qu'on s'intéresse au problème de sectorisation. La sectorisation facilite la gestion de l'affectation des patients aux infirmiers. De plus, chaque infirmier peut ainsi acquérir une meilleure connaissance de la patientèle, des autres collaborateurs locaux et du réseau

de transport. Cependant, au sein d'un district les variations de la demande sont a priori plus importantes qu'à l'échelle de tout le territoire. Le découpage doit donc tenir compte de la variabilité de la demande dans les différents districts.

Nous étudions ce problème dans le contexte d'un district à plusieurs secteurs où un secteur est caractérisé par les fluctuations de la demande et un nombre de ressources nécessaires pour couvrir cette demande. Nous proposons deux formulations mathématiques qui intègrent de diverses contraintes qui caractérisent la couverture de la demande. Comme le problème HHCDP est informatiquement très difficile à résoudre ; donc il est logique de regarder les métaheuristiques, afin de trouver de bonnes solutions réalisables avec un effort de calcul modeste.

Le chapitre est organisé comme suit : dans un premier temps une liste des travaux connexes au problème de sectorisation dans divers domaines d'applications est présentée dans la section 5.2. Dans un deuxième temps, dans la section 5.3 nous présentons une étude de la littérature traitant le problème de sectorisation en HAD. La problématique traitée et la modélisation proposée sont décrites dans la section 5.5. Nous terminons le chapitre par les expérimentations et les résultats dans la section 5.6 suivies d'une conclusion en section 5.7.

5.2 Revue de la littérature sur les problèmes de sectorisation

Le problème de sectorisation a été largement traité dans la littérature dans une variété d'applications. Les applications typiques de ce problème comprennent la conception des districts politiques ([Bozkaya *et al.* 2003], [Garfinkel & Nemhauser 1970], [Mehrotra 1992]), l'alignement des territoires de ventes ([Hess & Samuels 1971] ; [Zoltners & Sinha 1983]), les territoires d'officiers de police [D'Amico *et al.* 2002], etc. Nous présentons dans cette section les divers travaux connexes à ces différents domaines d'applications et nous nous concentrons particulièrement sur le problème de districting pour les services de soins de santé à domicile.

5.2.1 La sectorisation politique

Le problème de sectorisation politique a été étudié depuis les années 60 et de nombreux modèles différents et techniques ont été proposés dans le but d'empêcher la manipulation de districts qui peut favoriser un certain parti politique spécifique.

Dans le problème de sectorisation politique, un territoire est divisé en un certain nombre de districts de que les candidats politiques sont élus. L'exigence de base pour la sectorisation politique est de garantir le principe "un-homme-un-vote". Comme un des membres est élu

dans chaque district, les districts conçus doivent avoir un nombre presque égal d'électeurs tout en satisfaisant d'autres critères. Ce type de problème est formulé mathématiquement pour la première fois par [Hess *et al.* 1965] comme un problème "location-allocation". Les auteurs ont examiné les critères de contiguïté et de compacité pour les districts conçus qui respectent l'indivisibilité des contraintes des unités de base et dont les populations doivent se situer dans un intervalle prédéterminé.

Après ce travail, dans les travaux de [Garfinkel & Nemhauser 1970], les auteurs ont abordé le problème de districting politique comme un problème de *Set Partitioning*. Ils ont présenté une procédure en deux étapes énumératives qui minimisent l'écart maximum de chaque taille de district à partir de la taille moyenne. Dans la première étape, ils ont généré des districts réalisables en fonction des critères liés à l'égalité de la population (des électeurs totaux au sein d'un intervalle), la compacité et la contiguïté. Dans la deuxième étape, ils ont déterminé l'ensemble des districts optimaux qui pourraient minimiser l'écart maximum de la population de chaque district à partir de la population moyenne tout en satisfaisant la contrainte de l'indivisibilité des unités de base.

Plus récemment, dans les travaux de [Hojati 1996], les auteurs ont appliqué une approche "location-allocation" en trois étapes pour diviser un territoire en un nombre fini de districts, tout en respectant des critères liés à la contiguïté, la compacité et l'égalité de la population. Les centres de districts ont été déterminés à partir de cette approche. Ensuite, les unités de base ont été allouées à ces districts. Enfin, les unités de base qui ont été divisés entre deux districts ont été réaffectées à un seul district.

En outre, dans [Mehrotra 1992], les auteurs ont construit leur travail en se basant les travaux antérieurs de [Garfinkel & Nemhauser 1970] en formulant le problème comme un *Set Partitioning* des districts. Ce dernier a été caractérisé par l'inégalité de la population, la contiguïté, la non-séparation des unités de base et le respect des limites administratives autant que possible. Dans [Bozkaya *et al.* 2003], les auteurs ont également proposé une approche multi-critères basée sur cinq critères : la contiguïté, l'égalité de la population, la compacité, l'homogénéité socio-économique et la similarité avec le plan existant où le premier critère est considéré comme une contrainte dure tandis que les autres sont combinées dans une fonction objectif pondérée à multicritères.

Dans une autre étude plus récente, dans [Ricca & Simeone 2008], les auteurs ont formulé le problème de sectorisation politique comme un problème *Set Partitioning* multi-critères. Les critères pris en compte sont : l'indivisibilité des unités de base, la contiguïté, l'égalité de la population, la compacité et la conformité aux limites administratives. L'objectif principal de ce problème consiste à réduire au minimum une combinaison convexe des trois derniers critères.

5.2.2 L'alignement des territoires de ventes

Dans la vente, le territoire est divisé en petits groupes (composés de petites unités de vente) pour équilibrer les responsabilités de la charge de travail en termes de nombre de clients. Ces groupes doivent avoir une taille presque égale. La première application d'un modèle de "location-allocation" a été implémentée par [Hess & Samuels 1971] afin de maximiser la compacité totale de tous les districts, tout en minimisant les changements des limites existantes. Le critère principal était d'équilibrer la charge de travail des vendeurs. Les auteurs ont suggéré différentes mesures d'activités telles que le nombre d'appels de vente ou la vente potentielle. Ils ont souligné ainsi l'importance de choisir la mesure d'activité car elle pourrait influencer sur la qualité de la solution.

Dans d'autres travaux de [Easingwood 1973], l'auteur a proposé une approche heuristique pour la construction de régions de ventes, puis subdiviser chaque région en districts de ventes. Ces districts ont été construits en commençant par leurs centres et qui ont été étendues de telle sorte que la charge de travail de chaque vendeur est approximativement égale à la charge de travail moyenne de la région sans diviser les unités de base entre les districts et en respectant les limites administratives tout en intégrant les préférences des gestionnaires. L'inconvénient de cette approche est qu'elle ne fournit pas une méthode pour le partitionnement du territoire car elle représente une adaptation manuelle des préférences des gestionnaires.

Dans ses travaux [Ronen 1983], l'auteur a proposé un modèle de programmation mixte en nombres entiers pour le problème d'alignement des territoires de ventes. Il a cherché à optimiser la distance totale parcourue des vendeurs tout en respectant l'équilibrage de la distance qui sépare les districts, l'indivisibilité des unités de base, la compacité et la contiguïté des districts. Ce modèle a été résolu par une heuristique itérative qui a fourni la possibilité de modifier les affectations des unités de base aux districts pour les gestionnaires afin qu'ils puissent tenir compte de leurs préférences.

Plus récemment, dans [Ríos-Mercado & Fernández 2009], les auteurs ont proposé un modèle "location-allocation" dont l'objectif est de maximiser compacité totale tout en équilibrant les mesures d'activités tels que le nombre de clients, la demande de produits et la charge de travail entre les districts contigus.

Nous avons trouvé le domaine de la sectorisation dans différents types de services dans la littérature. Parmi ces études, nous pouvons identifier les problèmes de districting scolaire, les territoires d'officiers de police et le problème de districting d'énergie électrique.

5.2.3 La sectorisation scolaire

Dans le problème de districting scolaire, l'élève est spécifié pour chaque école. Cela signifie que nous trouvons les étudiants qui fréquentent une école spécifique. Ici, se sont les

étudiants qui se déplacent et se rendent dans les écoles. Le principal critère à optimiser est la minimisation des distances parcourues par les étudiants entre leurs domiciles et leurs écoles.

Nous retrouvons les travaux de [Schoepfle & Church 1989], où les auteurs ont formulé le problème d'affectation des étudiants dans les écoles comme un modèle "location-allocation" dont l'objectif consiste à réduire au minimum la distance totale pondérée parcourue par les étudiants tout en respectant les limitations de capacité et les contraintes d'équilibre raciales.

Dans une autre étude [Ferland & Guénette 1990], les auteurs ont mis l'accent sur un système interactif d'aide à la décision qui comprenait plusieurs heuristiques afin de concevoir des districts contigus qui garantissent que les étudiants puissent assister à la même école d'une année à une autre tout en respectant la contrainte de capacité de chaque école. Les auteurs n'ont pas proposé un modèle d'optimisation, mais les utilisateurs ont la possibilité d'interagir avec le système pour modifier des solutions afin d'améliorer la contiguïté, l'homogénéité ou le respect des capacités scolaires pour certains critères de qualité. Ce système a également permis une analyse très rapide, précise qui facilite des scénarios afin de déterminer les solutions les plus appropriées.

En utilisant une approche similaire à celle proposée par [Zoltners & Sinha 1983], les auteurs dans [Zoltners & Sinha 1983] ont identifié sept critères pour le bien districting scolaire à savoir l'indivisibilité des unités de base, le respect des capacités des grades, la contiguïté, la compatibilité avec les obstacles géographiques, la compacité liée à la distance totale parcourue par tous les élèves, l'affectation des élèves à la même école pour tous les grades et la similitude avec le motif de districting existant. En outre, les auteurs ont considéré un critère supplémentaire lié à la distance totale de marche par les étudiants afin de garantir la satisfaction individuelle. La fonction objectif pris en compte dans le modèle d'optimisation proposé est la réduction de la distance de marche totale.

5.2.4 Les territoires d'officiers de police

Dans une ancienne étude [Hess & Samuels 1971], les auteurs ont résolu le problème "location-allocation" en relâchant les contraintes d'intégralité. La résolution de la programmation linéaire qui en résulte et en arrondissant la solution afin que les sous-unités ne sont pas répartis entre les districts. L'inconvénient de cette approche est que la solution arrondie peut ne pas être optimale et également susceptible de violer l'attribut d'équilibrage des contraintes.

Dans les travaux de [Mehrotra *et al.* 1998], les auteurs ont présenté une méthode approchée pour résoudre un *Set Partitioning* qui n'a pas besoin d'énumérer tous les districts réalisables à l'avance. Ils ont développé une procédure de *brach-and-price*, en utilisant la génération de colonnes pour générer de nouveaux districts. La première procédure a résolu

la relaxation linéaire du *Set Partitioning* sur un sous-ensemble initial des districts réalisables. Ensuite, un sous problème dans le quel il utilise une fonction à coût linéaire qui a été utilisée pour trouver les districts à coûts réduits négatifs qui pourraient améliorer la solution.

Dans la littérature, le problème de sectorisation dans le contexte de la patrouille de la police avait été étudié par [D'Amico *et al.* 2002]. Ils ont modélisé le problème comme un *Set Partitioning* soumis à des contraintes de compacité, la contiguïté et aussi la qualité de service liée au temps de réponse aux appels de service qui devaient être réduits au minimum. Notons que "l'excellence" d'un quartier était liée à l'écart entre la charge de travail maximale et la charge de travail minimale des agents de patrouille et aussi le temps de réponse à un appel. Après la conception des zones, le nombre optimal de voitures de patrouille a été déterminé pour chaque district.

Dans une étude très récente [Camacho-Collados *et al.* 2015], les auteurs ont adressé un problème multi-critères en collaboration avec la Police Nationale de l'Espagne (PNE). C'est le premier modèle développé pour résoudre le problème de sectorisation pour les territoires d'officiers de police dans le quel ils considèrent les attributs de zone, le risque, la compacité, et le soutien mutuel. Le décideur peut spécifier ses préférences sur les attributs pour l'équilibrage de la charge de travail et de l'efficacité. Le modèle est résolu au moyen d'un algorithme heuristique qui est empiriquement testé sur une étude d'un district central de Madrid pour évaluer la performance de l'algorithme. Le but de leur travail était de présenter un modèle d'optimisation de patrouilles des secteurs, spécialement conçu pour répondre aux exigences de la PNE. Les auteurs ont montré empiriquement que l'algorithme génère rapidement patrouillant configurations qui ne sont plus efficaces que celles actuellement adoptées par la PNE.

5.2.5 Problème de sectorisation d'énergie électrique

Autre domaine d'application de l'aspect de sectorisation est celui de l'énergie électrique. Dans ce contexte, le problème de sectorisation consiste à regrouper les utilisateurs d'électricité en districts à des revenus approximativement égaux. Une approche de programmation mathématique développée par ([Bergey *et al.* 2003a], [Bergey *et al.* 2003b]) a été fondée sur un modèle multi-critères qui pourrait réduire à la fois la compacité totale et l'écart total du potentiel de revenus dans chaque district d'une valeur cible.

Notons qu'il peut être intéressant de développer de tel système pour résoudre le problème de sectorisation de soins de santé à domicile qui intègre le point de vue des employeurs de la santé à domicile et la disponibilité de telle sorte qu'un équilibre adéquat entre ce critère qualitatif et la meilleure solution obtenue grâce à une formulation mathématique qui pourrait être atteinte. Cela constitue l'énumération de la liste des travaux existants dans la littérature traitant la sectorisation dans un contexte HAD.

5.3 Littérature sur les problèmes de sectorisation en HAD

Les problèmes de sectorisation peuvent être classés en termes de nombre de critères. Il existe des modèles impliquant un seul critère à savoir l'équilibrage de la charge de travail. Certains auteurs ont développé des modèles avec plus d'un critère [Bozkaya *et al.* 2003] dont le but est de construire une fonction objectif mixte combinant tous les objectifs. Les différentes approches dans ce type de domaine peuvent également être classées dans les algorithmes exacts et non exacts. Pour résoudre les problèmes avec un seul critère, [Mehrotra 1992] a utilisé les méthodes exactes où il a développé une méthode de génération de colonnes pour résoudre ce problème. Des métaheuristiques ont déjà été proposées par plusieurs chercheurs [Bergey *et al.* 2003b, Muyldermans *et al.* 2002].

Selon [Benzarti *et al.* 2013], la sectorisation d'un territoire est une décision stratégique des établissements des soins de santé à domicile qui vise à regrouper des unités de bases (des rues, des zones de code postal ou un ensemble de patients) dans de plus grands groupes, à savoir les districts, de telle sorte que ces districts sont « bons » selon des critères pertinents. Ces critères peuvent être liés à l'activité, la démographie ou les caractéristiques géographiques des unités de base. Par conséquent, l'objectif majeur d'une structure HAD qui considère l'approche de sectorisation est de mieux gérer ses employés et éventuellement satisfaire ses patients plus efficacement.

Plusieurs approches ont été proposées dans la littérature en recherche opérationnelle pour traiter ce genre de problème. Parmi ces approches, on peut distinguer deux catégories telles que les heuristiques [Lodish 1975, Easingwood 1973] et les méthodes exactes fondées sur des techniques de programmation mathématique. Il existe deux grands types de modèles mathématiques liés aux problèmes de sectorisation : les modèles de partitionnement et les modèles de localisation-allocation. Pour la première approche, les districts sont conçus par le regroupement des unités de base de telle façon qu'une fonction objectif soit optimisée tout en respectant les contraintes prédéfinies. La seconde approche consiste à définir les centres des districts et la détermination de leurs unités de base associées.

Dans [Benzarti *et al.* 2010], un modèle de programmation linéaire en nombre entiers a été proposé pour le problème de sectorisation en soins à domicile. Les caractéristiques pertinentes des districts considérés par les auteurs dans ce contexte sont : l'indivisibilité des unités de base, le respect des limites administratives, l'accessibilité des districts, la compacité et l'équilibre de la charge de travail où le temps de transport représente une composante importante pour les soignants en termes de temps de travail. L'équilibrage de la charge de travail est pris en compte de deux manières différentes : soit en minimisant l'écart maximum de charge de travail entre deux districts, soit en imposant un intervalle de charge de travail. Ils ont également ajouté la dimension temporelle dans cette formulation.

Le défaut de cette approche selon [Lahrichi *et al.* 2006] est la non prise en compte de fluctuations de demande pouvant conduire à un déséquilibre de la charge de travail.

Dans une étude très récente [Gutiérrez-Gutiérrez & Vidal 2015] sur la sectorisation, les auteurs ont étudié le problème dans le contexte d'une ville à croissance démographique rapide, un phénomène qui se réfère à l'augmentation de la population dans les zones urbaines et qui conduit à des problèmes tels que l'accroissement des maladies épidémiques, l'absence de contrôle gouvernemental, l'insécurité et enfin le manque des services de santé de base. Trois facteurs liés à ce phénomène sont étudiés : les conditions de sécurité pour accéder à des unités de base, la disposition géographique de la population, et les tendances de la demande pour les services de soins à domicile. Par la suite, ils ont proposé un modèle mathématique bi-objectif. Ils évaluent le modèle avec des instances réelles provenant d'une structure HAD qui fournit des services dans les grandes villes en Colombie.

5.4 Synthèse des travaux de la littérature

Sur la base de cette revue de la littérature, nous supposons que, malgré les diverses applications du problème de districting, il y a beaucoup de similitudes entre eux. Plus précisément, le problème de sectorisation en HAD qui partage des caractéristiques communes avec d'autres applications par l'importance du facteur humain à savoir l'alignement des territoires de ventes.

En effet, la répartition proposée aurait un impact important sur les salariés (vendeurs et prestataires de services) et les clients. Les critères utilisés dans ces domaines ont permis une meilleure amélioration sur la qualité de service envers les employés et / ou les patients, ainsi que l'amélioration de l'efficacité de la prestation de services ou au niveau des processus de vente (par exemple, la compacité, l'indivisibilité des unités de base, l'équilibre de l'activité, etc.) qui doivent donc être considérés pour le problème de districting HHC dans le but d'améliorer les objectifs l'adoption de cette approche dans le contexte de la sectorisation en HAD.

Néanmoins, nous supposons que les critères utilisés dans le domaine politique sont identiques (tels que la compacité, la contiguïté, l'indivisibilité des unités de base, etc.) ou analogues à ceux utilisés dans les autres applications dans le sens où ils visent à équilibrer la charge de travail, le nombre de clients, etc., pour les ventes et les aires de service. Les approches proposées pour résoudre le problème de districting dans la littérature peuvent être classées en deux types : l'approche de gestion et des méthodes exactes basées sur des techniques de programmation mathématique.

Nous remarquons que la majorité des critères optimisés se répètent dans la plupart des articles issus du domaine de la sectorisation en HAD. En effet, nous étudions le contexte de la sectorisation afin de faciliter la gestion de l'affectation des patients aux infirmiers

(ex : code postal) et pour que l'infirmier aura une meilleure connaissance du territoire et des collaborateurs locaux. Nous introduisons la notion de la robustesse en qualité de contribution dans ce chapitre qui consiste à couvrir la demande d'une zone chaque jour avec l'équipe affectée sans avoir recours à des heures supplémentaires ou des ressources extérieures.

5.5 Description et modélisation du problème

Dans ce chapitre, nous avons considéré le problème de sectorisation dans un contexte de soins de santé à domicile. Les structures HAD fournissent souvent des services dans les grandes zones géographiques. Les services sont fournis aux patients dans leurs résidences par les travailleurs de la santé. Le problème de sectorisation étudié ici consiste alors à regrouper plusieurs secteurs. Nous appelons secteur les unités de base. Un secteur correspond à une zone pour laquelle on est capable d'associer une probabilité d'apparition de la demande et qui peut être couverte dans un temps assez court comparé à des distances entre secteurs. Ainsi, deux types de distances seront considérées dans ce chapitre, une distance moyenne qui sépare deux patients qui se situent dans un même secteur (cette distance est identique entre tous les patients) et une deuxième distance qui sépare deux secteurs qui correspond à la distance pour rejoindre deux secteurs différents. Les objectifs abordés dans ce chapitre étant de proposer des modèles mathématiques qui consistent à améliorer la couverture géographique, la garantie de la continuité des soins, l'équilibre de la charge de travail des infirmiers de soins et la réduction du temps de transport et par conséquent l'augmentation du temps consacré aux soins directs.

Dans la perspective de trouver la meilleure organisation pour les équipes des HAD, nous explorons ici la pertinence d'un découpage en districts d'infirmiers pour couvrir de façon robuste une demande incertaine. La robustesse est ici mesurée par la capacité des infirmiers à couvrir la demande de chaque jour en œuvrant uniquement dans leur district.

Le problème de sectorisation adressé dans ce chapitre est caractérisé par un ensemble de districts $D = \{1, \dots, |D|\}$ indexés par d . Le nombre de districts que nous considérons est fixé à l'avance. Chaque district est composé d'un ensemble de secteurs $S = \{1, \dots, |S|\}$ indexés par s , dont la fonction de répartition de la demande est connue. Le paramètre binaire A_{sd} désigne si le secteur s est couvert par le district d . Un secteur peut être couvert par des districts différents. Les décisions portent sur le nombre d'infirmiers affectés aux districts sélectionnés qui permettent de couvrir tous les secteurs avec un minimum d'infirmiers.

Afin de définir la couverture on utilise le paramètre N_d qui désigne le nombre de ressources minimales nécessaires pour couvrir un pourcentage α souhaité de demande dans chaque district. Ce paramètre est obtenu via la simulation sur plusieurs scénarios de demandes journalières – obtenus grâce aux fonctions de répartition de la demande des secteurs

– pour lesquels on applique un algorithme de recherche Tabou qui calcule le nombre minimum d’infirmiers nécessaires pour couvrir toute la demande du jour. Dans un deuxième modèle, nous assurons la couverture à un niveau β , non pas sur chaque district (niveau de service local) mais sur la totalité du territoire.

Dans cette section, nous proposons deux formulations mathématiques pour le problème de sectorisation en HAD avec les deux variantes de couverture.

5.5.1 Hypothèses

Dans la problématique abordée dans ce chapitre, plusieurs hypothèses sont prises en compte :

- Un territoire est composé de plusieurs secteurs.
- Tous les secteurs sont couverts ce qui signifie que tous les patients admis à l’HAD doivent être affectés à un district donné.
- Les demandes sont indépendantes entre les secteurs.
- Les ressources humaines fournissant des soins aux patients sont du même type, à savoir les infirmiers, qui sont multi-compétences, afin qu’ils puissent traiter tous les types de patients.
- Chaque infirmier a une capacité prédéterminée de charge de travail.
- Chaque district est sous la responsabilité d’une unique équipe d’infirmiers.
- L’ensemble des districts possibles est prédéterminé par les gestionnaires HAD.

5.5.2 Modélisation avec un niveau de service local

Cette variante consiste à couvrir la demande avec un niveau de service prédéterminé pour chaque district. Par exemple, un niveau de service de 80%, signifie que dans 80% des cas, chaque équipe peut couvrir toute la demande de son district sans faire appel à des ressources extérieures ou des heures supplémentaires. Pour résoudre la première variante, nous proposons un premier modèle mathématique qu’on appelle MIP-5.1.

Dans le programme linéaire en nombre entiers MIP-5.1 qui n’est autre qu’un problème de couverture classique, les variables de décisions Y_d représentent la sélection ou non du district d .

$$\text{MIP-5.1 : } \min \sum_{d \in D} N_d Y_d \quad (5.1)$$

$$\sum_{d \in D} Y_d A_{sd} \geq 1 \quad \forall s \in S \quad (5.2)$$

$$Y_d \in \{0, 1\} \quad \forall d \in D \quad (5.3)$$

La fonction objectif (5.1) consiste à minimiser le nombre de ressources utilisées dans les districts sélectionnés tout en satisfaisant le niveau de service souhaité dans chaque district sélectionné. Les contraintes (5.2) assurent que chaque secteur doit être couvert par un des districts sélectionnés.

5.5.3 Modélisation avec un niveau de service global

Dans cette variante, nous étudions le fait qu'un ensemble de ressources est apte à couvrir l'ensemble de la demande avec un niveau de service souhaité sur tout le territoire. L'idée est d'obtenir une solution qui garantisse d'être capable de couvrir toute la demande de chaque district avec une probabilité supérieure à β pour n'importe quelle journée. On modélise cette probabilité par le produit des probabilités de couvrir la demande de chaque district pour une solution donnée.

Il est nécessaire ici de définir la probabilité p_{zd} de couvrir la demande du district d avec z infirmiers. Les résultats des simulations permettant de calculer N_d , le nombre d'infirmiers nécessaires pour couvrir $\alpha\%$ de la demande, donnent aussi une estimation des valeurs de p_{zd} pour tout z . En effet, à l'issue de ces simulations on connaît le nombre minimum d'infirmiers pour couvrir toute la demande de chaque journée. On en déduit directement une estimation de la fonction de répartition de la couverture de la demande en fonction du nombre d'infirmiers affectés. On note Z_d l'ensemble des tailles d'équipe d'infirmiers ayant un intérêt, $Z_d = \{z \in \mathbb{N}\} \setminus \{z \in \mathbb{N} : \exists w < z \in \mathbb{N} \text{ sachant que } p_{zd} = p_{wd}\}$. Avec des variables x_{zd} qui indique si exactement z d'infirmiers sont affectés au district d , on peut écrire la contrainte de couverture globale sous la forme de l'équation (5.4).

$$\prod_{d \in D} \left(\sum_{z \in Z_d} p_{zd} x_{zd} \right) \geq \beta \quad (5.4)$$

Afin de linéariser cette inégalité, nous utilisons la stricte croissance de la fonction logarithmique et le fait que $\sum_{z \in Z_d} x_{zd} = 1$. On obtient ainsi l'inégalité (5.6) et par suite le modèle de partitionnement MIP-5.2 avec $l_{zd} = \log(p_{zd})$.

$$\begin{aligned} \log\left(\prod_{d \in D} \left(\sum_{z \in Z_d} p_{zd} x_{zd}\right)\right) &= \sum_{d \in D} \log\left(\sum_{z \in Z_d} p_{zd} x_{zd}\right) \\ &= \sum_{d \in D} \sum_{z \in Z_d} \log(p_{zd} x_{zd}) \\ &= \sum_{d \in D} \sum_{z \in Z_d} x_{zd} \log(p_{zd}) \\ &= \sum_{d \in D} \sum_{z \in Z_d} l_{zd} x_{zd} \end{aligned}$$

$$\text{MIP-5.2 : } \min \sum_{d \in D} \sum_{z \in Z_d} z \cdot x_{zd} \quad (5.5)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{z \in Z_d \setminus \{0\}} l_{zd} x_{zd} \geq \log(\beta) \quad (5.6)$$

$$\sum_{d \in D} \sum_{z \in Z_d \setminus \{0\}} x_{zd} A_{sd} \geq 1 \quad \forall s \in S \quad (5.7)$$

$$N_d \leq \sum_{z \in Z_d} z \cdot x_{zd} \quad \forall d \in D \quad (5.8)$$

$$x_{zd} \in \{0, 1\} \quad \forall d \in D, z \in Z_d, \quad (5.9)$$

La fonction objectif (5.5) consiste à minimiser le nombre de ressources utilisées dans les districts sélectionnés sur tout le territoire. La contrainte (5.6) permet de satisfaire la couverture de la demande du territoire avec une probabilité supérieure à β . Les contraintes (5.8) assurent que localement à chaque district la demande est couverte avec une probabilité d'au moins α . Les contraintes (5.7) assurent que chaque secteur doit être couvert par au moins un district. Lorsque la solution recherchée forme une partition du territoire, c'est-à-dire qu'un secteur n'est présent que dans un seul des districts de la solution, alors l'indépendance des demandes des secteurs s'étend aux districts aux intersections vides.

Dans nos expérimentations, nous avons parfois considéré un ensemble restreint de districts qui n'autorisent pas à trouver une partition comme solution. Dans ce cas, l'hypothèse d'indépendance des demandes dans les secteurs ne s'étend pas aux demandes des districts d'une solution ; un même secteur pouvant se trouver dans plusieurs districts de la solution. Le terme de gauche de l'inégalité (5.6) devient alors une approximation de la probabilité de couvrir la demande sur le territoire. Et l'égalité des contraintes (5.7) est relâchée en supérieur ou égal.

Le modèle MIP-5.2 permet d'intégrer un critère de robustesse du service global au territoire dans un problème d'optimisation de la couverture. Il réside sur le précalcul des données l_{zd} et donc des probabilités de couvrir la demande de chaque district pour chaque nombre d'infirmiers potentiellement affectés, notées p_{zd} . Ces valeurs sont obtenues par la simulation décrite dans la section suivante.

5.5.4 Calcul du nombre d'infirmiers couvrant un district sur une journée

Notre approche de résolution proposée pour résoudre le problème de minimisation des tournées de véhicules est basée sur une métaheuristique d'optimisation « recherche tabou » qui consiste à calculer le nombre de ressources minimales. Le calcul de ces paramètres est une étape cruciale pour pouvoir résoudre les modèles mathématiques proposés auparavant.

Un scénario définit les données suivantes :

- (a) la demande des patients, leur localisation et leur fenêtre de disponibilité ;
- (b) les durées de service d'une visite chez le patient.

En outre sont connues :

- (a) la durée maximale d'une tournée ;
- (b) les durées de transport entre les patients.

On suppose que tous les infirmiers quittent en début le HAD et y retournent en fin de tournée.

L'implémentation utilisée est une adaptation de celle présentée dans [Liu *et al.* 2014] qui est décrite dans la section 3. La modification majeure porte sur l'objectif qui est le nombre de véhicules (infirmiers). Par rapport à l'implémentation originale les voisinages sur chaque tournée sont calculés en parallèle. À la fin de la métaheuristique, un modèle de type *Set Partitioning* est appliqué sur l'ensemble des tournées rencontrées au cours de la recherche afin de trouver la meilleure combinaison possibles.

5.6 Expérimentations et résultats

Dans cette section, nous présentons les résultats d'une série d'expérimentations pour évaluer notre approche de résolution. Toutes les expériences ont été effectuées sur un ordinateur sous Windows XP équipé d'un processeur Intel Core cadencé à 2.4 GHz et 2 Go de RAM. L'algorithme de la recherche tabou ainsi que les modèles mathématiques ont été implémentés en C++. Ces modèles ont été développés en utilisant le solveur de MIP commercial IBM Ilog Cplex version 12.5 pour résoudre les programmes linéaires en nombres entiers.

5.6.1 Génération d'un territoire

Pour nos expériences, nous utilisons les instances de Solomon pour résoudre les problèmes journaliers. Les jeux de données ont été basés sur trois types d'instances « R », « C » et « RC » pour une centaine de sommets chacune.

Les secteurs correspondent aux sommets. Les districts sont construits en sélectionnant un secteur (uniformément aléatoirement) comme secteur de base et en agrégeant tous les secteurs plus proches du secteur de base qu'un rayon prédéfini. Trois instances de base (notée R- ∞ , C- ∞ et RC- ∞) sont générées en appliquant ce procédé sur le territoire défini pour les types « R », « C » et « RC ». Pour chacune de ces instances de base deux instances sont dérivées en limitant la taille des districts possibles. La limite imposée est de 12 ou de 15 et correspond au nombre moyen maximal de ressources nécessaires pour couvrir le district. Pour chaque district ce nombre de ressources moyen est calculé par simulation avec

la procédure présentée dans la section suivante. Les paramètres des instances ainsi obtenues sont décrits dans le tableau 5.1. Dans toutes les instances, le secteur 0 a un statut spécial car il représente le lieu de la structure HAD et est exclu du processus de génération de la demande. Au plus la limite est serrée au plus le sous-ensemble de district possibles est limité. Cela correspond à des organisations pour lesquels on impose aux districts sélectionnables dans le découpage d'impliquer des équipes de taille limitée, pour satisfaire aux objectifs de facilité de gestion et de connaissance du district par le personnel.

TABLE 5.1 – *Liste des paramètres pour R et C*

instance	ressources/district	districts	secteurs
R-12	12	184	100
R-15	15	239	100
R- ∞	∞	500	100
C-12	12	153	100
C-15	15	215	100
C- ∞	∞	350	100
RC-12	12	237	100
RC-15	15	312	100
RC- ∞	∞	450	100

5.6.2 Génération d'un échantillon de journées sur un territoire

Pour chaque district 100 journées sont générées comme suit. La demande pour une journée dans un secteur est générée à partir d'une loi normale propre à chaque secteur. La valeur moyenne est déterminée par une règle de trois entre la demande originale du secteur (dans l'instance d'origine de Solomon), la somme des demandes originales de tous les secteurs et une valeur de 1000 demandes. Cela conserve le ratio moyen de demande associée à chaque secteur mis à l'échelle d'une demande journalière de 1000 patients. L'écart type est 10% de la valeur moyenne. La durée des visites est de 30 ou 60 minutes. Elles ne demandent pas de compétences particulières. La durée de transport entre deux visites est la distance inter-secteur de l'instance d'origine pour deux visites dans des secteurs différents et une distance intra-secteur fixée à 5 minutes pour des visites d'un même secteur. La charge de travail maximale est fixée à 800 minutes. Chaque infirmier commence sa tournée depuis un dépôt de départ et se termine par un dépôt d'arrivée qui est localisé au sommet 0 de l'instance d'origine.

Pour chaque journée de chaque district possible d'un territoire, l'algorithme présenté dans la section 5.5.4 est exécuté avec une limite de 400 itérations pour minimiser le nombre d'infirmiers nécessaires pour couvrir toute la demande de la journée. Le nombre d'itération

a été déterminé par des tests préliminaires où peu d'améliorations sont constatées après quelques centaines d'itérations.

5.6.3 Résultats

Nous présentons dans cette section la liste des expérimentations réalisées sur les deux modèles MIP-5.1 et MIP-5.2. Chaque modèle est résolu par le solveur Cplex. Les résultats des deux modèles sont présentés dans les tableaux de 5.2 à 5.4, pour chacun des types d'instance du tableau 5.1. Les valeurs de α et β prennent les valeurs 0, 60, 70 et 80 en pourcentages. Lorsque $\beta = 0$ cela correspond au MIP-5.1. Toutes les instances pour MIP-5.1 et MIP-5.2 sont résolues à l'optimum en moins d'une seconde.

Le nombre de districts sélectionnés dans la solution optimale, le nombre de ressources requises et le pourcentage de secteurs couverts (possiblement supérieur à 100% à cause de la contrainte de partitionnement convertie en couverture dans l'inégalité (5.7)) correspondent aux deux notations suivantes :

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \left| \sum_{d \in D} \sum_{z \in Z_d \setminus \{0\}} x_{zd} \right| \\ \mathbf{Z} &= \left| \sum_{d \in D} \sum_{z \in Z_d} z \cdot x_{zd} \right| \\ \mathbf{S} &= \frac{\left| \sum_{s \in S} \sum_{d \in D} \sum_{z \in Z_d} A_{sd} x_{zd} \right|}{|S|} * 100 \end{aligned}$$

D'une manière générale les résultats obtenus pour les instances de type « C » et « RC » sont similaires. Cela se comprend par le fait que les groupes de secteurs proches (*clusters*) définis dans les instances « RC » sont d'un ordre de grandeur inférieur ou égal à celui des districts. Le fait que ces groupes de secteurs soient éloignés les uns des autres n'a pas d'impact sur la charge de travail des personnels puisque chaque personne ne va travailler que dans un seul groupe de secteur.

Par les valeurs de $\mathbf{S}$ proches de 100% on déduit que le relâchement de la contrainte d'intersection vide entre les districts de la solution obtenue n'autorise que peu de recouvrement entre les district et donc la surestimation du nombre de ressources nécessaires pour couvrir le territoire si on avait une partition est négligeable dans notre analyse. Il en va de même pour l'hypothèse d'indépendance des demandes entre districts d'une solution réalisable qui est quasiment vérifiée.

Plus que les valeurs présentées dans les tableaux, nous nous intéressons aux tendances que suivent les nombres de districts et de ressources impliquées en fonction des paramètres de couverture α et β .

Il apparaît clairement que pour satisfaire un même niveau de service globalement ($\alpha = 0$) que localement ($\beta = 0$), le nombre de ressources à prendre en compte est plus important.

TABLE 5.2 – *Variations de α et β pour les instances de type R*

paramètres		R-12			R-15			R- ∞		
β	α	D	Z	S	D	Z	S	D	Z	S
0	60	33	203	119	27	177	123	23	160	120
0	70	31	207	119	27	189	123	26	170	137
0	80	35	226	116	29	208	105	28	199	106
60	0	32	405	125	23	321	106	19	258	103
70	0	32	429	125	23	336	106	17	270	105
80	0	33	459	110	23	353	108	17	283	106
60	60	32	405	125	23	321	106	19	258	103
70	60	32	429	125	23	336	106	17	270	105
80	60	33	459	110	23	353	108	17	283	106
60	70	32	405	125	23	321	106	19	258	103
70	70	32	429	125	23	336	106	17	270	105
80	70	33	459	110	23	353	108	17	283	106
60	80	32	405	125	23	321	106	19	258	103
70	80	32	429	125	23	336	106	17	270	105
80	80	33	459	110	23	353	108	17	283	106

TABLE 5.3 – *Variations de α et β pour les instances de type C*

paramètres		C-12			C-15			C- ∞		
β	α	D	Z	S	D	Z	S	D	Z	S
0	60	37	244	105	30	227	100	19	215	101
0	70	37	244	105	30	228	101	27	219	101
0	80	41	252	105	33	237	102	24	227	101
60	0	37	290	104	31	269	101	17	247	100
70	0	37	296	105	31	276	101	17	252	100
80	0	38	302	105	31	283	103	16	257	100
60	60	37	290	104	31	269	101	17	247	100
70	60	37	296	105	31	276	101	17	252	100
80	60	38	302	105	31	283	103	16	257	100
60	70	37	290	104	31	269	101	17	247	100
70	70	37	296	105	31	276	101	17	252	100
80	70	38	302	105	31	283	103	16	257	100
60	80	37	290	104	31	269	101	17	247	100
70	80	37	296	104	31	276	101	17	252	100
80	80	38	302	105	31	283	103	16	257	100

TABLE 5.4 – *Variations de α et β pour les instances de type RC*

paramètres		RC-12			RC-15			RC- ∞		
β	α	D	Z	S	D	Z	S	D	Z	S
0	60	37	244	102	30	227	102	19	215	102
0	70	37	244	102	30	228	102	27	219	102
0	80	41	252	102	33	237	103	24	227	103
60	0	37	290	103	31	269	101	17	247	102
70	0	37	296	102	31	276	102	17	252	101
80	0	38	302	102	31	283	102	16	257	101
60	60	37	290	103	31	269	101	17	247	102
70	60	37	296	102	31	276	102	17	252	101
80	60	38	302	102	31	283	102	16	257	101
60	70	37	290	103	31	269	101	17	247	102
70	70	37	296	102	31	276	102	17	252	101
80	70	38	302	102	31	283	102	16	257	101
60	80	37	290	103	31	269	101	17	247	102
70	80	37	296	102	31	276	102	17	252	101
80	80	38	302	102	31	283	102	16	257	101

On constate une augmentation moyenne d'environ 18%, 78% et 19% pour les instances de type « R », « C » et « RC », respectivement.

Nous observons aussi que pour un niveau de service global β , le niveau de service α est assez élevé dans chaque district même si aucune contrainte n'est imposée sur celui-ci ; les solutions obtenues avec $\alpha = 0$ et $\alpha = 80$ sont similaires pour un même niveau β .

5.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes focalisés sur une problématique pouvant intéresser les établissements d'HAD, à savoir le problème de sectorisation. Nous avons étudié dans ce problème deux types de variantes permettant d'étudier la couverture de la demande sur un district localement ou sur l'ensemble du territoire. Ensuite, nous avons proposé deux modélisations basées sur la Programmation Linéaire en Nombres Entiers (PLNE) résolues par Cplex. Une méthode de recherche tabou est utilisée pour pouvoir calculer le nombre de ressources minimales couvrant un certain pourcentage de la demande qui est utilisé comme un paramètre des deux PLNE proposés pour décider de la sectorisation.

L'approche développée dans ce chapitre fournit une méthode permettant d'optimiser la sectorisation d'un territoire avec un critère de niveau de service exprimé comme une

probabilité de couvrir toute la demande sans faire appel à des ressources externes ou en échangeant des ressources entre districts. L'intérêt principal de notre approche est la relative facilité de résolution grâce à une décomposition entre un sous-problème d'optimisation sur une journée et un district et un PLNE couplant tous les sous-problèmes. De plus, nous pensons que le critère de qualité de service utilisé est facilement compréhensible par les utilisateurs. L'approche proposée permet donc d'évaluer l'impact de la sectorisation et de la granularité des districts sur notre indicateur de performance.

Une extension possible de ce travail est d'intégrer l'échange possible de ressources entre districts. Suivant l'hypothèse d'indépendance des lois de distributions des demandes par secteur, il s'agit de tenir compte des probabilités d'être en excès de ressources sur certains districts pour couvrir les districts en déficit de ressources.

Conclusion générale et perspectives

Apparue il y a un peu plus de cinquante ans en France, l'Hospitalisation À Domicile (HAD) s'est peu à peu structurée et affirmée dans le paysage sanitaire. Ce mode de prise en charge est apparu comme moyen de réduction des dépenses du domaine de la santé tout en satisfaisant le bien-être des patients à leur domicile. Il permet à un malade atteint de pathologies graves, aiguës ou chroniques de bénéficier chez lui (à son domicile) de soins médicaux et paramédicaux complexes et coordonnés que seuls des établissements de santé peuvent lui prodiguer. Le nombre de structures d'hospitalisation à domicile a beaucoup progressé depuis une dizaine d'années en passant de 76 structures en 2000 à 309 en 2014. Plusieurs travaux d'investigations [[Bachouch 2010](#)] et [[Jebalia 2008](#)] se sont intéressés à ce type d'organisation des services en HAD.

Synthèse des contributions Les pistes explorées dans cette thèse permettent d'aller plus loin dans la planification en intégrant notamment, la prévision de la demande sur les prochains jours et des critères de pénibilité. Ainsi nous avons pu apporter quelques réponses aux questions posées au début de la thèse.

Le premier point est que l'intégration de la dimension tournées dans le calcul de la charge de travail des personnels est important. Car une mauvaise affectation des patients aux journées, puis aux infirmiers et finalement une mauvaise séquence de visite saturent le système avec peu de demandes comparé à une planification optimisée.

Les résultats du chapitre 3 montrent que conserver une marge de sécurité en prévision des demandes à venir permet de mieux équilibrer la charge de travail sur un horizon de plusieurs jours.

Dans le chapitre 4, nous avons étudié l'intégration de plusieurs critères de pénibilité sur le travail des personnels. Les critères ont été modélisés par des indicateurs de seuils non-linéaires sous une forme simpliste O/1. La conclusion principale de nos résultats obtenus sur des instances réelles montrent que ces critères de pénibilité peuvent être intégrés en conservant un niveau de performance économique proche de l'optimum.

Dans le chapitre 5, nous avons proposé un nouvel indicateur de performance de la sectorisation en terme de capacité à couvrir une région avec un ensemble dédié de ressources. Nous avons également proposé une approche permettant d'évaluer et d'optimiser ce critère.

À travers cet indicateur, nos expérimentations tendent à montrer qu'une bonne performance globale est liée à une bonne performance locale à chaque district. Ainsi, la sectorisation qui d'une part permet de faciliter la gestion du système et d'améliorer l'expérience des personnes, semble d'autre part conserver un niveau de couverture satisfaisant avec peu de recours à des ressources extérieures si cette sectorisation est optimisée en amont.

Perspectives Durant l'exécution des travaux de la thèse nous nous sommes confrontés à l'écueil de la disponibilité de données réelles sur des instances de taille importante. Pour chacun des trois problèmes traités, nous avons donc utilisé les données en notre possession à cet instant ou nous avons généré nos propres données. Il en résulte un manque de consistance dans les évaluations de ces problèmes et donc de lien possible entre eux. Un schéma d'évaluation globalisé sur des jeux de données complets intégrant les différents aspects étudiés (incertitude, pénibilité, sectorisation) permettrait une meilleure exploitation des outils développés dans cette thèse.

De plus les approches de planification proposées dans cette thèse devraient être confrontées à la réalité du terrain. De telles expérimentations nécessitent des relations plus étroites que celles que nous avons réussi à avoir avec les HAD. De telles relations de collaborations auraient permis un retour d'expérience uniquement si les expérimentations avaient pu débuter dès le début de la thèse, ce qui était incompatible avec la démarche de réflexion autour de la modélisation et puis le développement des méthodes de planification adaptées. De plus, pour être réellement implémentée plusieurs contraintes pratiques (pauses, continuité des soins, compétences, ...) doivent être intégrées dans nos modèles. Ces dernières avaient été écartées pour se focaliser sur les nouveaux concepts que nous souhaitions étudier et sous l'hypothèse de leur faible impact sur les indicateurs observés. Ce travail de validation sur le terrain est donc maintenant posé comme une suite à donner à cette thèse.

Bibliographie

- [Akjiratikarl *et al.* 2007] Chananee Akjiratikarl, Pisal Yenradee et Paul R Drake. *PSO-based algorithm for home care worker scheduling in the UK*. Computers & Industrial Engineering, vol. 53, no. 4, pages 559–583, 2007. (Cité en pages 45 et 48.)
- [Allaoua *et al.* 2013] Hanane Allaoua, Sylvie Borne, Lucas Létocart et Roberto Wolfler Calvo. *A matheuristic approach for solving a home health care problem*. Electronic Notes in Discrete Mathematics, vol. 41, pages 471–478, 2013. (Cité en page 48.)
- [Archetti & Speranza 2014] Claudia Archetti et M Grazia Speranza. *A survey on matheuristics for routing problems*. EURO Journal on Computational Optimization, vol. 2, no. 4, pages 223–246, 2014. (Cité en page 62.)
- [Argentero *et al.* 2008] Piergiorgio Argentero, Bianca Dell’Olive, Maria Santa Ferretti, Working Group on Burnout *et al.* *Staff burnout and patient satisfaction with the quality of dialysis care*. American Journal of Kidney Diseases, vol. 51, no. 1, pages 80–92, 2008. (Cité en page 71.)
- [Bachouch 2010] Rym Ben Bachouch. *Pilotage opérationnel des structures d’hospitalisation à domicile*. PhD thesis, INSA de Lyon, 2010. (Cité en page 115.)
- [Baldacci *et al.* 2011] Roberto Baldacci, Enrico Bartolini, Aristide Mingozzi et Andrea Valletta. *An exact algorithm for the period routing problem*. Operations research, vol. 59, no. 1, pages 228–241, 2011. (Cité en page 44.)
- [Bard *et al.* 2013] Jonathan F Bard, Yufen Shao et Huan Wang. *Weekly scheduling models for traveling therapists*. Socio-Economic Planning Sciences, vol. 47, no. 3, pages 191–204, 2013. (Cité en pages 44 et 48.)
- [Begur *et al.* 1997] Sachidanand V Begur, David M Miller et Jerry R Weaver. *An integrated spatial DSS for scheduling and routing home-health-care nurses*. Interfaces, vol. 27, no. 4, pages 35–48, 1997. (Cité en pages 43 et 48.)
- [Ben Bachouch *et al.* 2008] Rym Ben Bachouch, Alain Guinet et Sonia Hajri-Gabouj. *Planification de la tournée des infirmiers dans une structure de soins à domicile*. In Gestion et Ingénierie des Systèmes Hospitaliers (GISEH08), EPFL (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne), Switzerland, 4-6 September, 8 pages, 2008. (Cité en pages 43 et 48.)

- [Benzarti *et al.* 2010] E Benzarti, E Sahin et Y Dallery. *Modelling approaches for the home health care districting problem*. In 8th International Conference of Modeling and Simulation-MOSIM, pages 10–12, 2010. (Cité en page 102.)
- [Benzarti *et al.* 2013] Emna Benzarti, Evren Sahin et Yves Dallery. *Operations management applied to home care services : Analysis of the districting problem*. Decision Support Systems, vol. 55, no. 2, pages 587–598, 2013. (Cité en page 102.)
- [Bergey *et al.* 2003a] Paul K Bergey, Cliff T Ragsdale et Mangesh Hoskote. *A decision support system for the electrical power districting problem*. Decision Support Systems, vol. 36, no. 1, pages 1–17, 2003. (Cité en page 101.)
- [Bergey *et al.* 2003b] Paul K Bergey, Cliff T Ragsdale et Mangesh Hoskote. *A simulated annealing genetic algorithm for the electrical power districting problem*. Annals of Operations Research, vol. 121, no. 1-4, pages 33–55, 2003. (Cité en pages 101 et 102.)
- [Bertels & Fahle 2006] Stefan Bertels et Torsten Fahle. *A hybrid setup for a hybrid scenario : combining heuristics for the home health care problem*. Computers & Operations Research, vol. 33, no. 10, pages 2866–2890, Octobre 2006. (Cité en pages 44, 48 et 57.)
- [Blais *et al.* 2003] Marko Blais, Sophie D Lapierre et Gilbert Laporte. *Solving a home-care districting problem in an urban setting*. Journal of the Operational Research Society, vol. 54, no. 11, pages 1141–1147, 2003. (Cité en pages 45 et 48.)
- [Boldy & Howell 1980] Duncan Boldy et Neil Howell. *The Geographical Allocation of Community Care Resources A Case Study*. Journal of the Operational Research Society, pages 123–129, 1980. (Cité en pages 46 et 48.)
- [Borsani *et al.* 2006] Valeria Borsani, Andrea Matta, Giacomo Beschi et Francesco Sommaruga. *A Home Care Scheduling Model For Human Resources*. In International Conference on Service Systems and Service Management, volume 1, pages 449–454. IEEE, 2006. (Cité en pages 43 et 48.)
- [Bozkaya *et al.* 2003] Burcin Bozkaya, Erhan Erkut et Gilbert Laporte. *A tabu search heuristic and adaptive memory procedure for political districting*. European Journal of Operational Research, vol. 144, no. 1, pages 12–26, 2003. (Cité en pages 45, 48, 97, 98 et 101.)
- [Bräysy *et al.* 2009] Olli Bräysy, Pentti Nakari, Wout Dullaert et Pekka Neittaanmäki. *An optimization approach for communal home meal delivery service : A case study*. Journal of Computational and Applied Mathematics, vol. 232, no. 1, pages 46–53, 2009. (Cité en page 48.)
- [Camacho-Collados *et al.* 2015] M Camacho-Collados, F Liberatore et JM Angulo. *A multi-criteria police districting problem for the efficient and effective design of patrol*

- sector*. European Journal of Operational Research, vol. 246, no. 2, pages 674–684, 2015. (Cité en page 101.)
- [Campbell & Wilson 2014] Ann Melissa Campbell et Jill Hardin Wilson. *Forty years of periodic vehicle routing*. Networks, vol. 63, no. 1, pages 2–15, 2014. (Cité en page 44.)
- [Cappanera & Scutellà 2013] Paola Cappanera et Maria Grazia Scutellà. *Home Care optimization : impact of pattern generation policies on scheduling and routing decisions*. Electronic Notes in Discrete Mathematics, vol. 41, pages 53–60, 2013. (Cité en pages 42 et 48.)
- [Cheng & Rich 1998] Eddie Cheng et Jennifer Lynn Rich. *A home health care routing and scheduling problem*. URL <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary>, 1998. (Cité en pages 42, 48 et 57.)
- [Chevalier et al. 2015] Louise Bernardette Jeanne Chevalier, Odile Marquestaut, Bertrand Lukacs et Matthieu de Stampa. *Impacts sur les pratiques professionnelles d'un protocole de soins mis en place entre l'hospitalisation avec hébergement et l'hospitalisation à domicile*. Santé Publique, vol. 27, no. 2, pages 205–211, 2015. (Cité en pages 17 et 48.)
- [Chvátal 1973] Vašek Chvátal. *Edmonds polytopes and a hierarchy of combinatorial problems*. Discrete mathematics, vol. 4, no. 4, pages 305–337, 1973. (Cité en page 37.)
- [Coppi et al. 2013] Alberto Coppi, Paolo Detti et Jessica Raffaelli. *A planning and routing model for patient transportation in health care*. Electronic Notes in Discrete Mathematics, vol. 41, pages 125–132, 2013. (Cité en pages 37 et 42.)
- [Cordeau et al. 1997] Jean-François Cordeau, Michel Gendreau et Gilbert Laporte. *A tabu search heuristic for periodic and multi-depot vehicle routing problems*. Networks, vol. 30, no. 2, pages 105–119, Septembre 1997. (Cité en pages 41, 58 et 60.)
- [D'Amico et al. 2002] Steven J D'Amico, Shouou-Jiun Wang, Rajan Batta et Christopher M Rump. *A simulated annealing approach to police district design*. Computers & Operations Research, vol. 29, no. 6, pages 667–684, 2002. (Cité en pages 97 et 100.)
- [Dantzig & Wolfe 1960] George B. Dantzig et Philip Wolfe. *Decomposition Principle for Linear Programs*. Operations Research, vol. 8, no. 1, pages 101–111, Février 1960. (Cité en page 37.)
- [De Angelis 1998] Vanda De Angelis. *Planning home assistance for AIDS patients in the city of Rome, Italy*. Interfaces, vol. 28, no. 3, pages 75–83, 1998. (Cité en pages 45, 48 et 57.)
- [Desaulniers et al. 2005] Guy Desaulniers, Jacques Solomon et Solomon Marius M. Column generation. Springer, 2005. (Cité en page 37.)

- [Doerner & Schmid 2010] Karl F. Doerner et Verena Schmid. *Survey : Matheuristics for Rich Vehicle Routing Problems*. In Maria J. Blesa, Christian Blum, Günther Raidl, Andrea Roli et Michael Sampels,   diteurs, Hybrid Metaheuristics, num  ro 6373 de Lecture Notes in Computer Science, pages 206–221. Springer Berlin Heidelberg, 2010. (Cité en page 62.)
- [Easingwood 1973] Chris Easingwood. *A heuristic approach to selecting sales regions and territories*. Operational Research Quarterly, pages 527–534, 1973. (Cité en pages 99 et 102.)
- [Escribà-Ag   ir et al. 2006] V Escribà-Ag   ir, D Martín-Baena et S Pérez-Hoyos. *Psychosocial work environment and burnout among emergency medical and nursing staff*. In: international archives of occupational and environmental health, vol. 80, no. 2, pages 127–133, 2006. (Cité en page 72.)
- [Ettore & Andrea 2010] Lanzarone Ettore et Matta Andrea. *Analysis of a Patient-Nurse Assignment Policy in Home Care Services*. In Proceedings of conference GISEH, Clermont-Ferrand, France, 2010. (Cité en pages 43 et 48.)
- [Eveborn et al. 2006] Patrik Eveborn, Patrik Flisberg et Mikael R  nnqvist. *Laps Care-an operational system for staff planning of home care*. European Journal of Operational Research, vol. 171, no. 3, pages 962–976, 2006. (Cité en pages 42, 43 et 48.)
- [Exley & Allen 2007] Catherine Exley et Davina Allen. *A critical examination of home care : End of life care as an illustrative case*. Social science & medicine, vol. 65, no. 11, pages 2317–2327, 2007. (Cité en pages 18 et 48.)
- [Ferland & Gu  nette 1990] Jacques A Ferland et Gilles Gu  nette. *Decision support system for the school districting problem*. Operations Research, vol. 38, no. 1, pages 15–21, 1990. (Cité en page 100.)
- [Freudenberger 1974] Herbert J Freudenberger. *Staff burnout*. Journal of social issues, vol. 30, no. 1, pages 159–165, 1974. (Cité en page 71.)
- [Gabow 1976] Harold N. Gabow. *An Efficient Implementation of Edmonds’ Algorithm for Maximum Matching on Graphs*. J. ACM, vol. 23, no. 2, pages 221–234, Avril 1976. (Cité en page 60.)
- [Garaix et al. 2010] Thierry Garaix, Christian Artigues, Dominique Feillet et Didier Josselin. *Vehicle routing problems with alternative paths : an application to on-demand transportation*. European Journal of Operational Research, vol. 204, no. 1, pages 62–75, 2010. 20 pages. (Cité en page 75.)
- [Garfinkel & Nemhauser 1970] Robert S Garfinkel et George L Nemhauser. *Optimal political districting by implicit enumeration techniques*. Management Science, vol. 16, no. 8, pages B–495, 1970. (Cité en pages 97 et 98.)

- [Glover & Laguna 1997] Fred Glover et Manuel Laguna. *Tabu search, 1997*. Kluwer Academic Publishers, 1997. (Cité en page 40.)
- [Gulczynski *et al.* 2011] Damon Gulczynski, Bruce Golden et Edward Wasil. *The period vehicle routing problem : New heuristics and real-world variants*. Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review, vol. 47, no. 5, pages 648–668, 2011. (Cité en page 44.)
- [Gutiérrez-Gutiérrez & Vidal 2015] Elena Valentina Gutiérrez-Gutiérrez et Carlos Julio Vidal. *A Home Health Care Districting Problem in a Rapid-Growing City*. Ingeniería y Universidad, vol. 19, no. 1, pages 7–33, 2015. (Cité en page 102.)
- [Halbesleben *et al.* 2008] Jonathon RB Halbesleben, Bonnie J Wakefield, Douglas S Wakefield et Lynn B Cooper. *Nurse burnout and patient safety outcomes nurse safety perception versus reporting behavior*. Western Journal of Nursing Research, vol. 30, no. 5, pages 560–577, 2008. (Cité en page 71.)
- [Hemmelmayr *et al.* 2009] Vera C Hemmelmayr, Karl F Doerner et Richard F Hartl. *A variable neighborhood search heuristic for periodic routing problems*. European Journal of Operational Research, vol. 195, no. 3, pages 791–802, 2009. (Cité en page 44.)
- [Hertz & Lahrichi 2006] Alain Hertz et Nadia Lahrichi. Client assignment algorithms for home care services. Groupe d’études et de recherche en analyse des décisions, 2006. (Cité en pages 46 et 48.)
- [Hess & Samuels 1971] Sidney W Hess et Stuart A Samuels. *Experiences with a sales districting model : criteria and implementation*. Management Science, vol. 18, no. 4-part-ii, pages P–41, 1971. (Cité en pages 97, 98 et 100.)
- [Hess *et al.* 1965] Sidney Wayne Hess, JB Weaver, HJ Siegfeldt, JN Whelan et PA Zitlau. *Nonpartisan political redistricting by computer*. Operations Research, vol. 13, no. 6, pages 998–1006, 1965. (Cité en page 97.)
- [Hojati 1996] Mehran Hojati. *Optimal political districting*. Computers & Operations Research, vol. 23, no. 12, pages 1147–1161, 1996. (Cité en page 98.)
- [Issaoui *et al.* 2015] Brahim Issaoui, Issam Zidi, Eric Marcon et Khaled Ghedira. *New multi-objective approach for the home care service problem based on scheduling algorithms and variable neighborhood descent*. Electronic Notes in Discrete Mathematics, vol. 47, pages 181–188, 2015. (Cité en pages 43 et 48.)
- [Jacobs *et al.* 2007] Jeremy M Jacobs, Aaron Cohen, Ora Rozengarten, Ludmila Meiller, Daniel Azoulay, Robert Hammerman-Rozenberg et Jochanan Stessman. *Closure of a home hospital program : Impact on hospitalization rates*. Archives of gerontology and geriatrics, vol. 45, no. 2, pages 179–189, 2007. (Cité en pages 47 et 48.)

- [Jebalia 2008] Salma Chahed Jebalia. *Modélisation et analyse de l'organisation et du fonctionnement des structures d'hospitalisation à domicile*. PhD thesis, l'École Centrale des Arts et Manufactures, Centrale Paris, jan 2008. (Cité en pages 10, 15 et 115.)
- [Kowalski *et al.* 2010] Christoph Kowalski, Oliver Ommen, Elke Driller, Nicole Ernstmann, Markus A Wirtz, Thorsten Köhler et Holger Pfaff. *Burnout in nurses—the relationship between social capital in hospitals and emotional exhaustion*. Journal of Clinical nursing, vol. 19, no. 11-12, pages 1654–1663, 2010. (Cité en page 72.)
- [Lahrichi *et al.* 2006] Nadia Lahrichi, SD Lapierre, Alain Hertz, A Talib et L Bouvier. *Analysis of a territorial approach to the delivery of nursing home care services based on historical data*. Journal of medical systems, vol. 30, no. 4, pages 283–291, 2006. (Cité en pages 45, 48 et 102.)
- [Langballe *et al.* 2011] Ellen Melbye Langballe, Siw Tone Innstrand, Olaf Gjerløw Aasland et Erik Falkum. *The predictive value of individual factors, work-related factors, and work-home interaction on burnout in female and male physicians : a longitudinal study*. Stress and Health, vol. 27, no. 1, pages 73–87, 2011. (Cité en page 72.)
- [Lanzarone & Matta 2014] Ettore Lanzarone et Andrea Matta. *Robust nurse-to-patient assignment in home care services to minimize overtimes under continuity of care*. Operations Research for Health Care, vol. 3, no. 2, pages 48–58, 2014. (Cité en pages 44 et 48.)
- [Lanzarone *et al.* 2010] Ettore Lanzarone, Andrea Matta et Gianlorenzo Scaccabarozzi. *A patient stochastic model to support human resource planning in home care*. Production Planning and Control, vol. 21, no. 1, pages 3–25, 2010. (Cité en page 42.)
- [Lasalvia *et al.* 2009] Antonio Lasalvia, Chiara Bonetto, Mariaelena Bertani, Sarah Bissoli, Doriana Cristofalo, Giovanna Marrella, Enrico Ceccato, Carla Cremonese, Moreno De Rossi, Lorenza Lazzarotto *et al.* *Influence of perceived organisational factors on job burnout : survey of community mental health staff*. The British Journal of Psychiatry, vol. 195, no. 6, pages 537–544, 2009. (Cité en page 72.)
- [Lasserre 2010] Haude Lasserre. *Les besoins des proches de patients en soins palliatifs à domicile : enquête auprès de quinze personnes après le décès d'un proche pris en charge par l'Hospitalisation A Domicile de Dax (Landes)*. PhD thesis, Université Grenoble Alpes - UFR Médecine, Juillet 2010. (Cité en pages 18 et 48.)
- [Lataste 1997] M Lataste. *Le projet d'hospitalisation a domicile : application a l'Aquitaine*. Bulletin-Société de Pharmacie de Bordeaux, vol. 136, pages 99–140, 1997. (Cité en page 12.)
- [Leiter *et al.* 1998] Michael P Leiter, Phyllis Harvie et Cindy Frizzell. *The correspondence of patient satisfaction and nurse burnout*. Social science & medicine, vol. 47, no. 10, pages 1611–1617, 1998. (Cité en page 71.)

- [Lim *et al.* 2010] Joanne Lim, Fiona Bogossian et Kathryn Ahern. *Stress and coping in Australian nurses : a systematic review*. International nursing review, vol. 57, no. 1, pages 22–31, 2010. (Cité en page 71.)
- [Lindsay *et al.* 2008] Robyn Lindsay, Lisa Hanson, Melanie Taylor et Helen McBurney. *Workplace stressors experienced by physiotherapists working in regional public hospitals*. Australian Journal of Rural Health, vol. 16, no. 4, pages 194–200, 2008. (Cité en page 71.)
- [Liu *et al.* 2013] Ran Liu, Xiaolan Xie, Vincent Augusto et Carlos Rodriguez. *Heuristic algorithms for a vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup and time windows in home health care*. European Journal of Operational Research, vol. 230, no. 3, pages 475–486, 2013. (Cité en pages 44 et 48.)
- [Liu *et al.* 2014] Ran Liu, Xiaolan Xie et Thierry Garaix. *Hybridization of tabu search with feasible and infeasible local searches for periodic home health care logistics*. Omega, vol. 47, pages 17–32, 2014. (Cité en pages 41 et 107.)
- [Lodish 1975] Leonard M Lodish. *Sales territory alignment to maximize profit*. Journal of Marketing Research, pages 30–36, 1975. (Cité en page 102.)
- [Mankowska *et al.* 2014] Dorota Slawa Mankowska, Frank Meisel et Christian Bierwirth. *The home health care routing and scheduling problem with interdependent services*. Health Care Management Science, vol. 17, no. 1, pages 15–30, 2014. (Cité en page 80.)
- [Maslach & Leiter 2008] Christina Maslach et Michael P Leiter. *Early predictors of job burnout and engagement*. Journal of applied psychology, vol. 93, no. 3, page 498, 2008. (Cité en page 71.)
- [Maslach 1993] Christina Maslach. *Burnout : A multidimensional perspective*. In W. B. Schaufeli, C. Maslach et T. Marek, éditeurs, Professional burnout : Recent developments in theory and research, Series in applied psychology : Social issues and questions., pages 19–32. Taylor & Francis, 1993. (Cité en pages 47 et 48.)
- [McVicar 2003] Andrew McVicar. *Workplace stress in nursing : a literature review*. Journal of advanced nursing, vol. 44, no. 6, pages 633–642, 2003. (Cité en pages 71 et 72.)
- [Mehrotra *et al.* 1998] Anuj Mehrotra, Ellis L Johnson et George L Nemhauser. *An optimization based heuristic for political districting*. Management Science, vol. 44, no. 8, pages 1100–1114, 1998. (Cité en page 100.)
- [Mehrotra 1992] Anuj Mehrotra. *Constrained Graph Partitioning : Decomposition, Polyhedral Structure and Algorithms*. PhD thesis, Atlanta, GA, USA, 1992. UMI Order No. GAX93-15899. (Cité en pages 97, 98 et 102.)

- [Mesghouni *et al.* 2015] Khaled Mesghouni, Daouia AIANE et Adnen EL AMRAOUI. *A New Optimization Approach for a Home Health Care Problem*. In 6th IESM Conference, October 2015, Seville, Spain, 2015. (Cité en pages 44 et 48.)
- [Mourgaya & Vanderbeck 2007] M Mourgaya et François Vanderbeck. *Column generation based heuristic for tactical planning in multi-period vehicle routing*. European Journal of Operational Research, vol. 183, no. 3, pages 1028–1041, 2007. (Cité en pages 37 et 44.)
- [Muyldermans *et al.* 2002] Luc Muyldermans, Dirk Cattrysse, Dirk Van Oudheusden et Tsippy Lotan. *Districting for salt spreading operations*. European Journal of Operational Research, vol. 139, no. 3, pages 521–532, 2002. (Cité en page 102.)
- [Nguyen & Montemanni 2013] Thi Viet Ly Nguyen et Roberto Montemanni. *Scheduling and Routing in Home Health Care Service*. In Society 40 th Anniversary Workshop–FORS40, page 52, 2013. (Cité en pages 44 et 48.)
- [Nickel *et al.* 2012] Stefan Nickel, Michael Schröder et Jörg Steeg. *Mid-term and short-term planning support for home health care services*. European Journal of Operational Research, vol. 219, no. 3, pages 574–587, 2012. (Cité en pages 42 et 48.)
- [Papadimitriou & Steiglitz 1998] Christos Papadimitriou et Kenneth Steiglitz. *Combinatorial optimization : algorithms and complexity*. Courier Corporation, 1998. (Cité en pages 33 et 34.)
- [Peter 2015] Pype Peter. *Impact de l'intervention des soins palliatifs à domicile*. minerva, vol. 14, no. 4, pages 40–41, 2015. (Cité en pages 17 et 48.)
- [Reid *et al.* 2010] Robert J Reid, Katie Coleman, Eric A Johnson, Paul A Fishman, Clarissa Hsu, Michael P Soman, Claire E Trescott, Michael Erikson et Eric B Larson. *The group health medical home at year two : cost savings, higher patient satisfaction, and less burnout for providers*. Health affairs, vol. 29, no. 5, pages 835–843, 2010. (Cité en pages 47 et 48.)
- [Ribeirou 1994] C Ribeirou. *Applications of combinatorial optimization*. Annals of Operations Research, vol. 50, 1994. (Cité en page 33.)
- [Ricca & Simeone 2008] Federica Ricca et Bruno Simeone. *Local search algorithms for political districting*. European Journal of Operational Research, vol. 189, no. 3, pages 1409–1426, 2008. (Cité en page 98.)
- [Ríos-Mercado & Fernández 2009] Roger Z Ríos-Mercado et Elena Fernández. *A reactive GRASP for a commercial territory design problem with multiple balancing requirements*. Computers & Operations Research, vol. 36, no. 3, pages 755–776, 2009. (Cité en page 99.)

- [Rogers *et al.* 2004] Ann E Rogers, Wei-Ting Hwang, Linda D Scott, Linda H Aiken et David F Dinges. *The working hours of hospital staff nurses and patient safety*. Health affairs, vol. 23, no. 4, pages 202–212, 2004. (Cité en page 71.)
- [Ronen 1983] David Ronen. *Sales territory alignment for sparse accounts*. Omega, vol. 11, no. 5, pages 501–505, 1983. (Cité en page 99.)
- [Rugulies *et al.* 2007] Reiner Rugulies, Karl B Christensen, Marianne Borritz, Ebbe Villadsen, Ute Bültmann et Tage S Kristensen. *The contribution of the psychosocial work environment to sickness absence in human service workers : Results of a 3-year follow-up study*. Work & Stress, vol. 21, no. 4, pages 293–311, 2007. (Cité en page 71.)
- [Salminen *et al.* 2003] Simo Salminen, Mika Kivimäki, Marko Elovainio et Jussi Vahtera. *Stress factors predicting injuries of hospital personnel*. American journal of industrial medicine, vol. 44, no. 1, pages 32–36, 2003. (Cité en page 71.)
- [Schoepfle & Church 1989] O Benjamin Schoepfle et Richard L Church. *A fast, network-based, hybrid heuristic for the assignment of students to schools*. Journal of the Operational Research Society, vol. 40, no. 11, pages 1029–1040, 1989. (Cité en page 99.)
- [Sentilhes-Monkam-Daverat 2004] Angélique Sentilhes-Monkam-Daverat. *La prise en charge des patients en fin de vie par trois services d’hospitalisation à domicile*. Mémoire de l’Ecole Nationale de Santé Publique, 2004. (Cité en pages 47 et 48.)
- [Sentilhes-Monkam 2006] Angélique Sentilhes-Monkam. *L’hospitalisation à domicile et la prise en charge de la fin de vie : le point de vue des patients et de leurs proches*. Santé publique, vol. 18, no. 3, pages 443–457, 2006. (Cité en pages 46 et 48.)
- [Steeg & Schröder 2008] Jörg Steeg et Michael Schröder. *A hybrid approach to solve the periodic home health care problem*. In Operations Research Proceedings 2007, pages 297–302. Springer, 2008. (Cité en pages 42 et 48.)
- [Stuart *et al.* 2008] Elaine Haycock Stuart, Alison Jarvis et Katie Daniel. *A ward without walls ? District nurses perceptions of their workload management priorities and job satisfaction*. Journal of clinical nursing, vol. 17, no. 22, pages 3012–3020, 2008. (Cité en page 72.)
- [Triki *et al.* 2014] Nizar Triki, Thierry Garaix et Xiaolan Xie. *A two-phase approach for periodic home health care planning*. In IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE), pages 518–523, Twente, Netherlands, 2014. (Cité en page 67.)
- [Vahey *et al.* 2004] Doris C Vahey, Linda H Aiken, Douglas M Sloane, Sean P Clarke et Delfino Vargas. *Nurse burnout and patient satisfaction*. Medical care, vol. 42, no. 2 Suppl, page II57, 2004. (Cité en page 71.)

- [Vidal *et al.* 2012] Thibaut Vidal, Teodor Gabriel Crainic, Michel Gendreau, Nadia Lahrichi et Walter Rei. *A hybrid genetic algorithm for multidepot and periodic vehicle routing problems*. Operations Research, vol. 60, no. 3, pages 611–624, 2012. (Cité en page 44.)
- [Wen *et al.* 2010] Min Wen, Jean-François Cordeau, Gilbert Laporte et Jesper Larsen. *The dynamic multi-period vehicle routing problem*. Computers & Operations Research, vol. 37, no. 9, pages 1615–1623, 2010. (Cité en page 44.)
- [Williams *et al.* 2001] Eric S Williams, Thomas R Konrad, William E Scheckler, Donald E Pathman, Mark Linzer, Julia E McMurray, Martha Gerrity et Mark Schwartz. *Understanding physicians’ intentions to withdraw from practice : the role of job satisfaction, job stress, mental and physical health*. Health care management review, vol. 26, no. 1, pages 7–19, 2001. (Cité en page 71.)
- [Wu *et al.* 2008] Siying Wu, Wei Zhu, Huangyuan Li, Zhiming Wang et Mianzhen Wang. *Relationship between job burnout and occupational stress among doctors in China*. Stress and Health, vol. 24, no. 2, pages 143–149, 2008. (Cité en page 72.)
- [Yalçındağ *et al.* 2016] Semih Yalçındağ, Andrea Matta, Evren Şahin et J. George 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, vol. 28, no. 1, pages 304–335, 2016. (Cité en page 80.)
- [Zerbib 1990] E. Zerbib. Les alternatives à l’hospitalisation : intérêts et perspectives pour le pharmacien. Olivier impr, 1990. (Cité en pages 9 et 12.)
- [Zoltners & Sinha 1983] Andris A Zoltners et Prabhakant Sinha. *Sales territory alignment : A review and model*. Management Science, vol. 29, no. 11, pages 1237–1256, 1983. (Cité en pages 97 et 100.)

Titre : Planification des soins à domicile

Résumé : Dans ce travail de recherche, l'intérêt est porté sur les établissements d'hospitalisation à domicile (HAD) avec l'objectif de développer une approche systématique et globale d'optimisation des soins à domicile dans le but de réduire les dépenses du domaine de la santé tout en satisfaisant une bonne qualité de service. Ce travail de recherche a pour objectif de proposer des modèles mathématiques, étudier les propriétés de ces modèles et développer des méthodes d'optimisation. La prise en compte des principales sources d'incertitudes dans la planification des soins à domicile est un objectif majeur de cette thèse. Dans ce travail, nous nous intéressons à trois problématiques distinctes issues du domaine d'HAD. La première concerne la planification multipériode des tournées des infirmiers en hospitalisation à domicile dont l'objectif consiste étudier le problème de la planification des soins à domicile sur plusieurs périodes en tenant compte de l'aspect de l'incertitude pour chaque période. Un plan hebdomadaire optimisé est donc établi afin de faciliter l'insertion des nouvelles demandes qui arrivent au cours de la semaine. Dans une deuxième problématique, nous étudions le problème de la planification des soins à domicile en tenant en compte de l'aspect de la pénibilité. Nous considérons ce concept comme résultant d'une situation de travail difficile et contraignante, pouvant causer un désintérêt, une situation de stress, voire une dégradation de l'état de santé du travailleur. La dernière problématique porte sur le problème de sectorisation qui impacte au niveau tactique la qualité de soin et de condition de travail pouvant être proposée.

Mots clés : Hospitalisation à domicile, planification d'emploi du temps, tournées de véhicules, génie industriel, recherche opérationnelle.

Title : Home Care Planning

Abstract : The focus of this research is home health care activities planning. We aim to develop a global systematic approach in order to reduce costs of health care while satisfying a good quality of service. We propose mathematical models and we develop optimization methods. The major objective of this thesis is the consideration of the main sources of uncertainty in home health care planning. We are interested in three issues. The first is related to the multi-period home health care planning. An optimized weekly plan is established with a distribution of dle times that allows to insert new demands. We also study drudgery in the activities planning. We consider drudgery as constraining work, which can cause lack of interest or stress. The last topic concerns the districting problem as a key issue in an optimized home health care system organisation.

Keywords : Home Health Care, time tabling, vehicle routing, industrial engineering, operations research.