UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

OPTIMISATION DE LA CONFECTION D'HORAIRES DE MÉDECINS URGENTISTES: APPLICATION À L'HÔPITAL MAISONNEUVE-ROSEMONT

LÉONARD JACQUEMET

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES

(GÉNIE INDUSTRIEL)

AVRIL 2014

© Léonard Jacquemet, 2014.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

OPTIMISATION DE LA CONFECTION D'HORAIRES DE MÉDECINS URGENTISTES: APPLICATION À L'HÔPITAL MAISONNEUVE-ROSEMONT

présenté par : JACQUEMET Léonard

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. HERTZ Alain, Doct. ès Sc., président

Mme LAHRICHI Nadia, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. PESANT Gilles, Ph.D., membre

DÉDICACE

À Géraldine.

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier Nadia Lahrichi, ma directrice de recherche, à la fois pour sa disponibilité, sa positivité et la confiance qu'elle m'a accordés. Tout au long de mon parcours à Polytechnique Montréal, Nadia m'a donné des opportunités de projet et a su me motiver pour les mener à bien, me permettant d'avoir des expériences appliquées en recherche opérationnelle et en génie industriel dans un cadre académique.

Je tiens à souligner l'incroyable accompagnement technique qui m'a été offert par Mehdi Towhidi. Grâce à toi Mehdi, et ton développement de CyLP, nous avons été capables d'effectuer un transfert sur logiciels libres. Je garderai un très bon souvenir de ta collaboration et du temps passé à affronter les technologies de l'information.

Je voudrais également remercier le Docteur Gagnon pour avoir initié ce projet avec Nadia Lahrichi. Sa capacité à voir que la recherche opérationnelle pouvait contribuer à des améliorations dans son département m'a permis de mettre en pratique très concrètement des mathématiques au service d'un problème de terrain.

RÉSUMÉ

Au département d'urgence de l'hôpital Maisonneuve Rosemont (HMR) à Montréal, les horaires de l'équipe de médecins sont réalisés à la main à l'image de beaucoup d'autres établissements. Pour réaliser un horaire, il faut affecter à la fois les quarts de travail et les postes à occuper (tâches) entre les différents médecins disponibles sur une période donnée (ici quatre semaines). Il s'agit de respecter un grand nombre de contraintes, tout en recherchant la meilleure qualité possible des horaires. La confection d'un horaire est fastidieuse et consomme beaucoup de temps.

Ce projet a pour objectif de développer une solution transférable, capable de produire les horaires des médecins urgentistes de HMR en économisant le temps de planification manuel, tout en assurant une résolution quasi-optimale du problème défini en collaboration avec le chef de service, le Docteur Gagnon.

Nous avons dans ce cadre développé un modèle linéaire mixte (MIP) pour résoudre le problème d'horaire. Nous résolvons à la fois le problème d'affectation de quarts et le problème d'affectation de tâches. Le modèle s'articule autour des variables représentant l'affectation, chaque jour, pour chaque médecin à un poste donné. Les contraintes sont réparties en deux groupes : les contraintes dures comme le respect des disponibilités des médecins; les contraintes relaxées selon deux approches. La première approche de relaxation consiste à fixer une valeur cible et à autoriser une déviation par rapport à cette valeur, par exemple les quarts affectés de manière isolée sont autorisés dans la limite de un par médecin et par mois. La seconde approche consiste à inclure dans la fonction objectif les occurrences de situations bénéfiques ou néfastes (en les maximisant ou les minimisant respectivement). Le modèle tient ainsi compte de l'ensemble des règles opérationnelles du département d'urgences régissant les horaires des médecins.

Le problème d'horaire instancié est résolu grâce aux solveurs CPLEX et COIN Branch and Cut (CBC) (solveur gratuit).

Au fil du développement du modèle, une dizaine d'horaires ont pu être comparés aux réalisations manuelles pour atteindre la forme finale présentée dans ce mémoire, capable de générer des horaires prêt à l'emploi. La solution transférée est basée sur le solveur CBC et les horaires produits satisfont le Docteur Gagnon à la fois en termes de qualité et en temps de réalisation.

ABSTRACT

Physician schedules are manually developed at the emergency room of the Maisonneuve Rosemont hospital (HMR) in Montreal, as in many other hospitals. In this case, the department chief Doctor Gagnon is in charge of the scheduling. To produce a schedule, both shifts and jobs (tasks) have to be assigned to the available physicians of the team on a defined period (e.g. four months). The process of making a schedule is a very tedious and time consuming task. One has to respect a large amount of constraints while looking for the best schedule.

This project's goal is to develop a transferable tool capable of producing the physician schedules of the emergency room of HMR. It has to save time by removing manual scheduling and to guarantee the optimal resolution of the problem for main objectives. The problem and objectives are defined with the collaboration of the chief of the emergency department, Doctor Gagnon.

In this context, a mixed integer programming (MIP) model has been built to solve the scheduling problem. We both solve the shift assignment problem and the task assignment problem. The modeling is built around the main variables standing for the assignment of each physician, each day on each task. Constraints are separated in two groups: some are hard constraints as the respect of physician's availabilities and the others are soften by two different methods. The first one is to give a target value and to authorize a deviation to this value for the criterion. For example, isolated shifts are accepted within the limit of one per physician and per month. The second is to put the criterion in the objective function to maximize or minimize the occurrences of good or bad features. The resulted modeling takes into account all operational rules of the emergency room scheduling.

Instantiated models are solved both by the commercial solver CPLEX and the license's free solver COIN Branch and Cut (CBC).

During the development of the model, more than ten schedules have been compared to manual ones to lead to the final model proposed in this thesis. This resulting modeling is capable to produce ready to use schedules satisfying Doctor Gagnon both in terms of quality and processing time.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE III

REMERCIEMENTS IV

RÉSUMÉ V

ABSTRACT VI

TABLE DES MATIÈRES VII

LISTE DES TABLEAUX X

LISTE DES FIGURES XI

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS XII

LISTE DES ANNEXES XIII

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 : REVUE DE LITTERATURE 3

1.1 Affectation de quarts de travail à des médecins 4

1.2 Affectation de tâches 7

1.3 Implantation de solutions en milieu pratique 8

CHAPITRE 2 : DÉFINITION DU PROBLÈME ET MODÉLISATION 10

2.1 Approche globale 10

2.1.1 Notations 12

2.1.2 Contraintes d'offre et demande 15

2.1.3 Contraintes de charge de travail 16

2.1.4 Contrainte d'équité 16

2.1.5 Contraintes d'ergonomie 18

2.1.6 Fonction objectif 21

2.1.7 Synthèse du problème 22

2.2 Approche en deux phases 22

2.2.1 Processus de décomposition 23

2.2.2 Première phase 25

2.2.3 Seconde phase 27

CHAPITRE 3 : PRISE EN COMPTE DES BESOINS 29

3.1 Variété des instances 29

3.2 Les prises en charge du processus de planification manuelle 30

3.3 Les prises en charge du processus automatisé 31

3.4 Mesure de la qualité d'un horaire 32

3.5 Stratégie en fonction objectif 34

CHAPITRE 4 : EXPÉRIMENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS 36

4.1 Analyse préliminaire de la découpe 36

4.1.1 Comparaison sur CPLEX et CBC de l'approche globale et de l'approche en deux phases 36

4.1.2 Analyse de l'impact de la découpe sur la qualité des horaires 38

4.2 Détermination des poids 41

4.3 Performances de résolution 46

4.4 Comparaison planification manuelle vs MIP 49

4.4.1 Cas de pénurie de main d'œuvre 49

4.4.2 Cas d'excès de main d'œuvre 52

CHAPITRE 5 : TRANSFERT 56

5.1 Technologies employées 56

5.2 Implantation réelle 57

CONCLUSION 59

LISTE DES RÉFÉRENCES 61

ANNEXES 64

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Liste des ensembles 12

Tableau 2.2 : Liste des paramètres 13

Tableau 2.3 : Liste des variables 14

Tableau 2.4 : Contribution des contraintes pour le modèle scindé 23

Tableau 2.5 : Modification des index en phase 1 25

Tableau 2.6: Paramètres ajoutés en phase 1 25

Tableau 2.7: Modification des index en phase 2 27

Tableau 2.8: Paramètres ajoutés en phase 2 28

Tableau 3.1: Liste des critères d'évaluation d'un horaire 33

Tableau 4.1 : Comparaison des performances de résolution entre CPLEX et CBC sous AIMMS 36

Tableau 4.2: Comparaison de résolution une et deux phases sur le mois de novembre 2013 39

Tableau 4.3: Comparaison de résolution une et deux phases sur le mois de décembre 2013 40

Tableau 4.4: Jeux de poids 43

Tableau 4.5: Résultats en fonction des poids sur les mois de novembre et décembre 2013 44

Tableau 4.6: Poids conservés – Ensemble D 46

Tableau 4.7: Performances sous CBC via CyLP sur les mois de septembre à décembre 2013 48

Tableau 4.8: Comparaison planification manuelle et MIP sur le mois de décembre 2013 52

Tableau 4.9: Comparaison planification manuelle et MIP sur le mois de novembre 2013 55

LISTE DES FIGURES

Figure 4-1: Ensembles de poids soumis à de la sous-couverture (décembre 2013).....41

Figure 4-2: Ensembles de poids soumis à de l'excès de main d'œuvre (novembre 2013) 42

Figure 5-1: Description du processus de création d'horaire 56

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

CBC	*COIN Branch and Cut* solveur linéaire
COIN-OR	*Computational Infrastructure for Operations Research*, suite de logiciels libres de recherche opérationnelle
HMR	Hôpital Maisonneuve-Rosemont
MIP	*Mixed integer programming*
UHB	Unité d'hospitalisation brève

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A: PRÉSENTATION D'UN HORAIRE, DÉCEMBRE 2013 RÉALISÉ PAR L'APPROCHE EN DEUX PHASES AVEC CBC…….…...64

INTRODUCTION

Construire un horaire pour des médecins d'urgences demande de répartir la charge de travail nécessaire au maintien d'un service continu : jour et nuit, sept jours par semaine. Pour qu'un horaire soit acceptable pour le personnel, il est primordial de respecter nombres de critères ergonomiques (Carter et Lapierre [1]), comme le respect de périodes repos ou de séquences spécifiques les fins de semaine. Aux urgences de l'hôpital Maisonneuve Rosemont (HMR) à Montréal, l'équipe de vingt-neuf médecins travaille différents nombres de gardes (quarts de travail) par période de quatre semaines. Certains effectuent une demi-douzaine de quarts et d'autres près de vingt. Ainsi les demandes de chaque médecin sont spécifiques, et un bon planning doit pouvoir les prendre en compte tout en étant équitable envers l'ensemble de l'équipe. De la même manière, un horaire doit être satisfaisant pour le service et une couverture doit être assurée, quel que soit le moment, fins de semaine et jours fériés compris. Le cas de HMR a démontré une forte saisonnalité dans la capacité de travail de ses effectifs. Le planificateur et chef de service, le Docteur Gagnon, doit faire face à des pénuries de personnel, à l'image de la période des fêtes, et inversement pendant d'autres à un surplus. Les emplois du temps des médecins dans d'autres établissements, mais aussi leurs obligations personnelles, affectent leur disponibilité. Les choix que le planificateur fait pour surmonter ces difficultés sont à intégrer pour pouvoir répondre au problème tout au long de l'année.

La résolution des problèmes d'horaires est complexe comme souligné par Van den Bergh, et al. [2]. Réaliser ce travail de planification à la main coûte chaque mois plus de deux demi-journées au chef de service. En plus de vouloir minimiser le temps de création du planning, il souhaite pouvoir garantir à son équipe le respect des règles ergonomiques, ainsi que de l'équité dans un contexte très contraint. Le problème chronophage et complexe de construction d'horaires pour les médecins d'urgences est générique et a déjà été abordé (Gendreau, et al. [3]). En revanche, la force d'une solution repose fortement dans l'incorporation des spécificités du département en question. Le cas de HMR comporte un problème d'affectation de tâches en plus du problème d'affectation de quarts. C'est-à-dire qu'il faut établir à quelle période les médecins viennent, la journée, le soir ou bien la nuit, mais également quel poste ils occuperont. L'équité est de ce fait complexifiée. En plus d'équilibrer la répartition des weekends et types de quarts, il faut veiller à distribuer équitablement les affectations durant les quarts, certaines étant préférées aux autres. En comparaison aux autres cas précédemment étudiés dans la littérature, HMR apparaît comme un département d'urgences

ayant une politique de planification très chargée, regroupant les particularités et difficultés d'un grand nombre de problèmes d'horaires.

Le but du projet est de développer un outil de planification pour HMR assurant la production des horaires selon l'ensemble des règles en vigueur dans le département, tout en optimisant la qualité des horaires et le temps nécessaire à leur obtention. L'outil proposé doit être transférable à l'établissement. La solution ne pouvant employer de solveurs commerciaux, nous avons procédé à la comparaison des deux modélisations linéaires mixtes (MIP) et de leurs performances à la fois sous les solveurs COIN Branch and Cut (CBC) et CPLEX. L'approche choisie présentée dans ce mémoire permet de répondre au problème d'horaire via un solveur libre. L'outil permet de recueillir les données nécessaires à la création de l'horaire de quarte semaines inscrit par le planificateur, instancie le modèle résolu avec CBC et finalement génère un planning dans un format propice à la modification et l'édition. L'outil a été développé en collaboration avec le planificateur autour d'exemples d'horaires. Nous avons pu comparer et ajuster le processus de planification au fil des instances pour aboutir à des horaires ayant été utilisés à HMR. Les horaires créés satisfont les besoins du planificateur tant en rapidité d'exécution qu'en qualité des horaires proposés.

Le mémoire est structuré comme suit. Le premier chapitre fait brièvement état de la place des problèmes d'horaire existant dans la littérature en lien avec le problème des urgences de HMR, c'est-à-dire l'affectation de quarts de travail à des médecins, et l'affectation de tâches. Dans le deuxième chapitre, deux modèles sont définis. Le premier modèle est posé en parallèle de l'ensemble des règles de planification, le second est une décomposition en deux parties du problème. Le troisième chapitre fait l'état et compare les prises en charge des besoins respectives de la planification manuelle et de la méthode par MIP. Le quatrième chapitre analyse les résultats des modélisations, en proximité avec les besoins de HMR. Enfin, le dernier chapitre traite du transfert de l'outil et présente les moyens employés pour rendre la solution implantable à HMR, il est suivi de la conclusion.

CHAPITRE 1 REVUE DE LITTERATURE

Attirant l'attention depuis plus de 40 ans, les problèmes d'horaires représentent une branche importante de la recherche opérationnelle. Les applications au milieu hospitalier sont nombreuses et se focalisent sur deux problématiques majeures [3]: la confection d'horaires infirmiers et la création d'horaires de médecins. Pour les premiers, soumis à des conventions collectives, il s'agit d'optimiser les satisfactions personnelles et de minimiser la masse salariale, tandis que pour les seconds, aucun standard d'organisation ne prévaut et seules les satisfactions sont à optimiser, toujours d'après [3], car la résistance au changement pour les médecins, est la préoccupation dominante des administrations hospitalières [1]. Les applications aux départements d'urgences demeurent toutefois le principal centre d'intérêt en ce qui concerne les médecins (Gunawan et Lau [4]). Malgré ces différences les deux problèmes, présentent beaucoup de similarités (Chih-Chung et Tung-Han [5]), consistant à produire des horaires dans un environnement fortement contraint, et sont considérés comme des problèmes d'optimisation complexes.

Malgré de nombreuses applications inspirantes pour les horaires infirmiers ([6] et [7]) et ceux de médecins ([1],[3],[8],[9] et [10]), ces problèmes étant fortement contraints, il n'existe pas de méthode unique capable de tous les résoudre (Glover et McMillan [11]). Chaque cas est unique tant dans les préférences, règles des établissements, et objectifs de planification [10]. Ceci rejoint le propos de Burke, et al. [6] concernant les horaires infirmiers : « un objectif scientifique crucial pour les recherches futures sur les problèmes d'horaires infirmiers sera de répondre précisément aux besoins et exigences du monde réel.». Il en va de même pour le problème des médecins d'urgences, la littérature existante confirme que le problème est présent dans de nombreux établissements avec beaucoup de traits communs, mais la combinaison des particularités et la spécificité de la prise en charge caractérise complètement la qualité de la méthode employée.

Ernst, et al. [12] répertorient différentes méthodes et approches couvrant aussi bien l'évaluation de la demande, que la distribution de jours de repos, la création de séquences de travail ou la répartition de tâches.

Les nombreux travaux concernant les problèmes d'horaire peuvent se regrouper de différentes manières pour les comparer : les variétés des problématiques, des modélisations et des méthodes de résolution par exemple. Van den Bergh, et al. [2] proposent ces classifications permettant de relever les aspects communs et divergences. Par exemple, les contraintes de couvertures sont dures

pour 75% des articles étudiés et pour le reste leurs relaxations sont autorisées et pénalisées en fonction objectif, souvent multicritères. Cette répartition est une forte caractéristique des problèmes d'horaire de personnel d'après les auteurs. De la même manière les effectifs ne sont pas forcements homogènes, des établissements mixent temps complets et temps partiels, la présence de compétences n'est pas systématique non plus. Concernant les méthodes de résolution, la programmation mathématique s'avère plus employée que les métaheuristiques.

En s'attaquant à la planification de personnel de manière générale, sujet plus vaste englobant les problèmes d'horaire, la revue de littérature de Ernst, et al. [12] classe les travaux avec un recul sur les différents objectifs en planification de personnel. Ceci recouvre aussi bien l'analyse de la demande, que la distribution des jours fériés, ou bien la distribution des tâches. Il est souligné que dans le cas d'un processus complexe de planification comprenant affectation de quarts et de tâches, il est judicieux de séparer distribution de quarts et distribution de tâches pour atteindre des résultats satisfaisants en termes de temps de calcul. Dans cette optique, les problématiques d'affectation de tâches une fois les quarts affectés sont catégorisées comme secondaires dans la réalisation d'un planning, dans le sens où les contraintes et les complexités sont plus faibles. Les moyens à mettre en œuvre pour atteindre des solutions satisfaisantes sont ainsi mesurés en comparaison aux affectations de quarts. De même, l'influence de la qualité des solutions en affectation de tâches est moins importante qu'en affectation de quarts.

Nous présentons dans ce chapitre les travaux traitant des problèmes d'horaire en utilisant la décomposition par problèmes d'affectation de quarts, c'est-à-dire la détermination de « qui travaille quand ? », et des problèmes d'affectation de tâches, c'est-à-dire « étant donné qui est présent, qui fait quoi ? ».

1.1 Affectation de quarts de travail à des médecins

Pour l'affectation de quarts de travail à des équipes de médecins, l'étude de Gendreau, et al. [3] basée sur les situations réelles de cinq établissements de la région de Montréal, sépare les contraintes des horaires en quatre groupes : les contraintes d'offre et demande, les contraintes concernant la charge de travail, les contraintes d'équité et les contraintes ergonomiques. L'offre et la demande encadrent à la fois les disponibilités des médecins et les couvertures demandées par l'établissement. La charge de travail englobe les limites de quantité de travail des médecins de

manière globale et également sur différents horizons glissants. La présence de limitations hebdomadaires ou sur des séquences se retrouve dans l'ensemble des cas présentés dans la littérature. A l'image du caractère crucial de la répartition des fins de semaine, les contraintes d'équités équilibrent la répartition des différents types de quarts. Enfin l'ergonomie relève la qualité des plannings en créant des enchainements ou en insérant des préférences.

Chih-Chung et Tung-Han[5] présentent une optimisation par essaims particulaires (*Particle Swarm Optimization*) implanté avec succès dans le département d'urgence d'un hôpital du nord-est de Taiwan. Seules dix règles sont considérées pour établir les horaires, l'établissement présentant une politique de planification très légère en comparaison des autres cas présents dans la littérature. Toutes les contraintes sont relaxées et sont associées à des pénalités prenant comme valeurs 10, 100, 1000 ou 10000. La fonction objectif comptabilise chaque violation de contrainte multipliée par sa pénalité afin d'être minimisée. Deux règles portent le plus haut poids, il s'agit de la satisfaction de la couverture minimum et de l'interdiction d'effectuer plus de cinq journées de repos consécutives. Toutes les contraintes étant relaxées, les solutions sont toujours réalisables. Il est mentionné que les temps de calculs sont satisfaisants pour générer des horaires de qualité (pour une équipe d'une trentaine de médecins sur quatre semaines) dans la mesure où la politique de l'établissement est légère. Cependant, l'ajout de contraintes supplémentaires pénalise fortement les performances de la solution selon les auteurs.

Pour une des unités d'urgence de l'hôpital pour enfant de Cincinnati, Ferrand, et al. [13] construisent des horaires cycliques par programmation linéaire en nombres entiers. Chaque journée est divisée en trois quarts de huit heures, un médecin doit être présent durant chacun d'entre eux. Le problème d'horaire concerne la planification cyclique de cinq médecins appartenant à une unité des urgences de l'établissement, la couverture est ensuite complétée avec l'aide de l'effectif d'un autre secteur de l'hôpital. Les cycles construits affectent un peu plus de quarts que les capacités des médecins le permettent. L'inconvénient de la planification cyclique est la gestion de l'équité concernant les jours fériés et congés saisonniers. Les affectations des quarts en surplus sont utilisées pour satisfaire a posteriori l'équité en supprimant les affectations manuellement de jours fériés, weekends ou autres congés demandés, en fonction de l'ancienneté et des horaires passés. Des médecins externes à l'unité sont alors mobilisés pour obligatoirement combler les affectations manquantes. Les horaires cycliques ont l'inconvénient de standardiser les horaires limitant ainsi la

prise en compte des particularités momentanées. Mais en revanche, ils ont l'avantage, plébiscité par leurs utilisateurs, de donner une longue visibilité dans le planning.

Beaulieu, et al. [9], résolvent par programmation mathématique les horaires de médecins urgentistes d'un hôpital à Montréal. C'est, d'après les auteurs, la première utilisation de cette méthode pour résoudre des horaires de médecins urgentistes. L'ensemble des contraintes est divisé entre contraintes dures devant absolument être respectées, et contraintes flexibles pouvant être violées. La sous-couverture est prise en compte par un médecin fictif qui se voit affecté l'ensemble des quarts n'ayant pu l'être, la contrainte de couverture reste ainsi une contrainte dure. Nous notons que les médecins ont le choix d'avoir leurs quarts de fin de semaine en bloc ou séparés, c'est-à-dire travailler des fins de semaine complètes ou bien travailler une seul fois par fin de semaine, mais sur plus de fins de semaine. L'objectif consiste à distribuer équitablement la charge de travail, les médecins donnant un intervalle admissible pour le nombre de quarts. La programmation mathématique s'avère efficace pour atteindre des premières solutions de bonne qualité sans avoir à atteindre l'optimum.

Trilling [14] génère par programmation par contraintes les horaires des médecins de garde pour un hôpital gériatrique également à Montréal. L'objectif est de générer des horaires respectant l'ensemble des contraintes en répartissant équitablement la charge de travail à travers l'équipe et le temps, tout en maximisant le respect des préférences exprimées. La fonction objectif se résume au nombre de violations d'écarts minimums entre deux séquences de quarts consécutifs, moins le nombre de préférences satisfaites. L'approche par programmation par contraintes établit le problème d'horaire comme problème de satisfaction plus que d'optimisation.

Rousseau, et al. [8] présentent une méthode hybride alliant programmation par contraintes ainsi qu'une combinaison de recherche locale et d'algorithme génétique. La méthode développée est évaluée sur deux cas réels [9], [14]. La méthode hybride utilise la programmation par contraintes pour générer un horaire. Comme les horaires sont de bonne qualité et générés rapidement, ils sont optimisés dans un deuxième temps. À la manière d'un algorithme génétique, différents horaires sont ensuite combinés afin d'en améliorer la qualité.

1.2 Affectation de tâches

Les articles présentés ci-dessus traitent principalement du problème de l'affectation de quarts. Les problèmes d'affectation de tâches partagent beaucoup d'aspects de modélisation avec les problèmes d'affectation de quarts [15]. Les variables de décision ainsi que des contraintes de successions de quarts sont similaires dans les deux problèmes. Toutefois les préoccupations sont différentes. Pour l'affectation de tâches, les caractéristiques des affectations génèrent des contraintes de compétences, le personnel est différencié par son ancienneté ou bien également par ses préférences et spécialisations. En affectation de quarts, des contraintes sur l'enchainement de quarts étaient imposées à cause des horaires des quarts, de manière à donner un temps de repos suffisant entre deux affectations. Pour les tâches, la prise en compte de la difficulté, de la monotonie ou au contraire de la continuité donne les contraintes de séquences propres aux problèmes d'affectation de tâches.

Brazeau [15] utilise un MIP pour affecter des infirmières à différentes salles dans une unité d'endoscopie digestive. L'équipe se compose d'infirmières à temps plein, à temps partiel et en équipe volante. À temps plein une infirmière travaille cinq jours par semaine, sauf en période de congés. Les infirmières à temps partiel et l'équipe volante viennent compléter la couverture. L'objectif est double: minimiser le coût du travail en évitant l'emploi d'infirmières de l'équipe volante, et maximiser l'ergonomie en prenant en compte l'ancienneté et les spécificités des différentes affectations.

Les objectifs en affectation de tâches sont davantage transférés sur l'équité. L'affectation de quarts répond surtout à une question de faisabilité, existe-t-il un horaire assurant une certaine couverture respectant toute la liste de règles ? Une fonction objectif relèvera alors les violations de contraintes et des variables d'équité à propos des nuits et fins de semaine. En affectation de tâches, il s'agit d'un problème de répartition : quelle est la meilleure répartition possible de ces tâches? La faisabilité n'est pas un défi.

Caron, et al. [16] traitent du problème de l'ancienneté. D'une part, le personnel est doté de compétences, et d'autre part une notion de priorité liée à l'ancienneté est instaurée afin que le personnel disposant de plus d'expérience soit exempté d'un type de tâche, ou bien y ait un accès prioritaire.

Gunawan et Lau [4] créent les plannings des médecins d'un département de chirurgie à Singapour. Il s'agit bien ici d'un problème d'affectation de tâches. Le personnel travaille les journées uniquement et pas les fins de semaine, ils sont tous présents continument, la confection de l'horaire distribue les tâches par demi-journée. Les médecins disposent d'une capacité de travail et transmettent leurs préférences pouvant contenir des demi-journées de repos. L'hôpital a également des contraintes de ressources comme le nombre de salles de chirurgie et des règles ergonomiques régulent également les séquences. Certaines tâches sont répertoriées comme exigeantes et ne peuvent être enchainées. L'approche est en deux étapes. Premièrement, la fonction minimise le nombre total de tâches non affectées. Deuxièmement, le nombre de tâches affectées selon les préférences est maximisé tout en assurant que le nombre de tâches soit au moins égal à celui obtenu à la première étape par l'ajout d'une unique contrainte et le changement de fonction objectif. Ainsi, pour la meilleure couverture possible, les préférences sont maximisées.

Notons que dans [9], des quarts de traumatologie au sein des urgences sont considérés comme très exigeants et nécessitent une prise en charge particulière. Deux quarts de traumatologie ne peuvent être consécutifs et la répartition de ces quarts au sein de l'équipe est optimisée. Il s'agit donc ici d'un problème d'affectation de quarts assorti d'un problème d'affectation de tâches sur un seul de ses quarts. Parmi les applications aux médecins urgentistes, il s'agit de la seule contribution approchant la superposition des problèmes d'affectation de quarts et de tâches.

1.3 Implantation de solutions en milieu pratique

Dans les différents articles précédemment cités, beaucoup font appels à la programmation linéaire pour formuler ou au moins débuter leur résolution. Elle offre notamment de courts temps de calcul pour l'atteinte de premières solutions.

La majorité des travaux actuels en programmation linéaire évaluent leurs performances avec le solveur CPLEX considéré comme leader sur le marché. La question d'un transfert, comme dans [15], impose souvent une sobriété économique rendant les solveurs commerciaux inenvisageables pour un hôpital. Brazeau [15], dans le but d'un transfert, a comparé les performances de CPLEX et CBC dans le cas d'un problème d'affectation d'infirmières. Pour des dimensions de 13 000 variables et 9000 contraintes, CPLEX résout en environ deux secondes quand CBC prend 2 minutes 30. Les écarts de performances peuvent ainsi s'avérer critiques sur des problèmes de grande

dimension. La perspective d'un transfert employant un solveur non commercial apparait être clairement envisageable pour des problèmes de taille modérée.

En termes de solveurs, Meindl et Templ [17] présentent et comparent les différents solveurs linéaires libres ou commerciaux du marché. Il en ressort une nette supériorité des solutions commerciales Gurobi, CPLEX et Xpress face aux solveurs libres que ce soit sur les temps de résolution que sur le pourcentage de problèmes résolus dans un éventail de tests exigeants. Face aux problèmes les plus imposants, l'auteur préconise le recours aux solutions commerciales. Il est également souligné que les solveurs libres ont le désavantage de ne pas inclure l'utilisation en parallèle de processeurs, limitant l'exploitation à pleine capacité des ordinateurs actuels. Parmi les solveurs non commerciaux, CBC du projet COIN-OR, affichent des résultats concurrentiels.

Pour permettre aux utilisateurs, plus particulièrement le personnel hospitalier, de transférer leurs données à un modèle, de lancer une résolution et d'en récolter la solution, il faut une interface. L'ergonomie de cette dernière influence fortement les utilisateurs dans leur acceptation du changement de méthode de planification. CyLP est une interface Python développée par Towhidi et Orban [18] pour les solveurs linéaires de Coin-OR : CLP, CBC et CGL. CyLP permet d'altérer les processus de résolution des solveurs en choisissant l'emploi de différentes coupes ou stratégies d'exploration par exemple. L'interface fournit également la possibilité d'instancier ses modèles ou bien de les lire à partir de fichiers de modélisation linéaire standards. Dans le cas du transfert technologique effectué dans [15], le couple CBC, CyLP a été utilisé avec succès afin de fournir une solution appropriée non commerciale à un hôpital.

Le projet présenté dans ce mémoire, s'appuie sur un cas réel. La modélisation proposée empreinte beaucoup d'éléments des articles présentés. La complexité du problème opérationnel étudié fait que le cas combine les particularités de plusieurs modèles le rendant fortement contraint. L'objectif est de transférer sur solveur libre l'outil de résolution à l'établissement. Les résultats présentés ci-dessus laissent penser que, pour une politique de planification lourde, les capacités des technologies libres risquent d'être insuffisantes. C'est pourquoi, nous allons présenter deux modélisations : une complète incluant l'ensemble des règles et objectifs dans un même modèle, et une scindée, procédant en deux étapes afin de diminuer la taille des problèmes à confier au solveur et tenter d'améliorer le temps de calcul.

CHAPITRE 2 DÉFINITION DU PROBLÈME ET MODÉLISATION

Le problème d'horaire des médecins urgentistes à HMR consiste à assurer une couverture sur des quarts de jour, soir et nuit sur un horizon de quatre semaines. La longueur de l'horizon est choisie par le Docteur Gagnon comme un équilibre adéquat pour l'équipe afin d'éviter les révisions tout en donnant la plus grande visibilité possible aux médecins. En effet, une période plus longue est dure à envisager dans le sens où les médecins ne seraient pas en mesure de communiquer des disponibilités fermes. Ce problème d'horaire est la combinaison d'un problème d'affectation de quarts et d'un problème d'affectation de tâches. Durant chaque quart, il existe différents postes qu'il faut également distribuer. Les contraintes sont nombreuses et les objectifs multiples. Dans ce projet, nous travaillons à produire un horaire respectant l'ensemble des contraintes, tout en maximisant la satisfaction des objectifs.

Dans cette section, nous allons présenter l'ensemble des problématiques de la planification par l'exposé de deux modélisations linéaires : la première distribuant à la fois les quarts et les tâches; la seconde résolvant dans un premier temps le problème d'affectation de quarts et ensuite solutionnant le problème d'affectation de tâches en prenant en compte le résultat de la première étape.

2.1 Approche globale

Afin de présenter le modèle mathématique décrivant le problème d'horaire, nous introduisons les ensembles utilisés, les paramètres et les variables pour permettre la compréhension du modèle. Avant cela, présentons les différentes affectations existantes ainsi que leurs fréquences, sur chaque quart dépendamment du jour. Trois quarts (jour, soir et nuit) débutant à différentes heures dépendamment du jour (semaine vs fin de semaine) décomposés sur cinq postes doivent être couverts : ambulance, cabines (de consultation), clinique externe, salle fauteuils, observation et unité d'hospitalisation brève (UHB). De plus un médecin coordinateur (OR) doit être disponible pendant les quarts de jour (où il endosse aussi le poste d'observation).

Du lundi au vendredi:

- 7 postes en quart de jour (8h à 18h): un en ambulance (8A), deux en cabines (8C), un en clinique externe (8EC), un en coordination (8OR), un en salle fauteuils (8SF) et un en UHB (U).
- 5 postes sur le quart de soir (16h à minuit) : un en ambulance (16A), deux *(un seul les vendredis)* en cabines (16C), un en observation (16O) et un en salle fauteuils (16SF).
- 2 postes de nuit : un de minuit à 8h (0) et un de 22h à 4h ou 6h (22) selon l'affluence.

Les samedis et dimanches : pour la journée nous retrouvons quatre postes avec (8A), (8C), (8OR) et (U) ; un poste de cabine de midi à 22h est créé (12C); le quart de soir ambulance est modifié pour s'effectuer de 15h à 1h (15A) ; la nuit (0) est complété par (18O), poste d'observation remplaçant (16O) et (22) entre 18h et 4h.

2.1.1 Notations

Les tableaux 2.1, 2.2 et 2.3 définissent les ensembles, les paramètres et les variables.

Tableau 2.1 : Liste des ensembles

I	$=$	$\{1,2,\dots,N\}$ les médecins (N=29)
I_{OR}	$=$	les médecins aptes pour les quarts de coordination, $I_{OR} \subset I$
J	$=$	$\{0,1,2,\dots,n\}$ les jours du planning (n=28)
J_v	$=$	$\{1,8,15,22\}$ ensemble des éléments de J étant des vendredis
J_s	$=$	$\{2,9,16,23\}$ ensemble des éléments de J étant des samedis
J_d	$=$	$\{3,10,17,24\}$ ensemble des éléments de J étant des dimanches
K	$=$	$\{8A, 8C, 8EC, 8OR, 8SF, U, 12C, 15A, 16A, 16C, 16O, 16SF, 18O, 22,0\}$ les affectations
K_{j1}	$=$	$\{8A, 8C, 8EC, 8OR, 8SF, U\}$ les affectations de jour 1
K_{j2}	$=$	$\{12C\}$ les affectations de jour 2
K_{s1}	$=$	$\{15A, 16A, 16C, 16O, 16SF\}$ les affectations de soir 1
K_{s2}	$=$	$\{18O, 22\}$ les affectations de soir 2
K_n	$=$	$\{0\}$ les affectations de nuit
K_A	$=$	$\{8A, 15A, 16A, 18O\}$ les affectations d'ambulance
K_C	$=$	$\{8C, 12C, 16C\}$ les affectations de type cabine
K_{EC}	$=$	$\{8EC\}$ les affectations en clinique externe
$K_{O,SF,C}$	$=$	$\{16O, 18O, 8SF, 16SF, 8C, 16C\}$ les affectations d'observation, de salle fauteuil et de cabine
K_{OR}	$=$	$\{8OR\}$ les affectations de coordination
K_U	$=$	$\{U\}$ les affectations d'hospitalisation brève

Les paramètres sont reliés aux disponibilités, aux compétences, aux spécificités et aux préférences des médecins.

Tableau 2.2 : Liste des paramètres

$Av_{i,j,k}$	$= \begin{cases} 1 & \text{si le docteur i est disponible le jour j au quart k} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
$Ab_{i,k}$	$= \begin{cases} 1 & \text{si le docteur i est compétent pour le quart k} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
$Demande_{j,k}$	$=$ nombre de médecin requis au quart k le jour j
Nb_i	$=$ nombre de quarts maximum demandés par docteur i
$OutN_i$	$= \begin{cases} 1 & \text{si le docteur i n'est pas médecin de nuit} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
$OutU_i$	$= \begin{cases} 1 & \text{si le docteur i n'effectue pas que des quarts type U} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
$NbPleinTemps$	$= 7$ *usuellement, nombre de quarts à partir duquel un médecin est considéré à plein temps*
$OffPréférences_i$	$= \begin{cases} 1 & \text{si docteur i demande plus de } NbPleinTemps \text{ quarts} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
$Pref_{i,j,k}$	$= \begin{cases} 1 & \text{si docteur i souhaite travailler le quart k le jour j} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$
$MaxConsSH$	$=$ *nombre maximum de quarts consécutifs autorisés*
$MaxConsEve$	$=$ *nombre maximum de quarts de soir consécutifs autorisés*
$MaxConsN$	$=$ *nombre maximum de quarts de nuit consécutifs autorisés*
$MaxEvePerW$	$=$ *nombre maximum de quarts de soir par tranche de 7 jours*
$MaxNights$	$=$ *nombre maximum de nuits autorisées par période*
$MaxDvsE$	$=$ *nombre maximum de soirées de plus que de journées*
$MaxIsoSh$	$=$ *nombre maximum de quarts isolés par médecin*
$MaxEcSh$	$=$ *nombre maximum de quarts de clinique externe par médecin*
$MaxFwoS$	$=$ *nombre maximum de vendredis soirs travaillés sans le samedi qui suit par médecin*

La variable principale correspond aux affectations aux quarts et aux postes. Ensuite d'autres répertorient les allocations de fin de semaine et situations à considérer. Une troisième catégorie de variables permet de gérer l'équité en ce qui a trait au nombre de quarts affectés.

Tableau 2.3 : Liste des variables

$x_{i,j,k}$	$= \begin{cases} 1 \text{ si docteur i est assigné au quart } k \text{ le jour } j \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$
$WE_{i,js}$	$= \begin{cases} 1 \text{ si docteur i travaille la fin de semaine du samedi } js \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$
$FwoS_{i,jv}$	$= \begin{cases} 1 \text{ si docteur i travaille le vendredi } jv \text{ soir sans travailler le samedi qui suit} \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$
$ConsWE_{i,js}$	$= \begin{cases} 1 \text{ si docteur i travaille les fins de semaine } js \text{ et } js+1 \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$
$IsoShift_{i,j}$	$= \begin{cases} 1 \text{ si le docteur i a un quart isolé le jour } j \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$
$MaxRelaxShift$	= *nombre maximum de quarts non attribués à un médecin*
$MaxOR$	= *nombre maximum de quarts de type OR sur le nombre moyen de quarts demandés par médecin*
$MaxAmb$	= *maximum du ratio de quarts de type ambulance sur le nombre moyen de quarts demandés par médecin*
$MinAmb$	= *minimum du ratio de quarts de type ambulance sur le nombre moyen de quarts demandés par médecin*
$MaxU$	= *maximum du ratio de quarts de type U sur le nombre moyen de quarts demandés par médecin*
$MaxOSFC$	= *maximum du ratio de quarts de type O, SF et C sur le nombre moyen de quarts demandés par médecin*
$MinOSFC$	= *minimum du ratio de quarts de type O, SF et C sur le nombre moyen de quarts demandés par médecin*

Les contraintes se répartissent en quatre catégories : l'offre et la demande, la charge de travail, l'équité et l'ergonomie.

2.1.2 Contraintes d'offre et demande

Chaque médecin dispose du paramètre de compétence $Ab_{i,k}$, la majorité des affectations peuvent être réalisées par l'ensemble des médecins, sauf le quart de coordination $k = 8OR$ et celui de l'unité d'hospitalisation brève (UHB) ($k = U$). Ce paramètre permet également de spécifier les particularités de certains médecins. Si certains n'effectuent pas certaines affectations ou inversement se consacrent à une seule, c'est via ce paramètre que l'exception est prise en compte. Chaque mois, par le paramètre $Av_{i,j,k}$, les médecins donnent leurs disponibilités pour chaque quart, ceci est ensuite aggloméré pour devenir une disponibilité sur chaque affectation. Les contraintes (1) à (3) assurent que les compétences et disponibilités sont respectées. Les quarts de coordination durant les fins de semaine ne requièrent pas de compétences spécifiques, l'équipe de médecin étant plus petite à gérer.

$$x_{i,j,k} \leq Av_{i,j,k} * Ab_{i,k}, i \in I, j \in J, k \in K \setminus K_{OR} \quad (1)$$

$$x_{i,j,k} \leq Av_{i,j,k} * Ab_{i,k}, i \in I, j \in J \setminus \{J_s \cup J_d\}, k \in K_{OR} \quad (2)$$

$$x_{i,j,k} \leq Av_{i,j,k}, i \in I, j \in J_s \cup J_d, k \in K_{OR} \quad (3)$$

Pour chaque période, chaque médecin transmet également le nombre maximum de quarts qu'il souhaite travailler. Ce nombre ne sera pas dépassé (4).

$$\sum_{j \in J, k \in K} x_{i,j,k} \leq Nb_i, i \in I \quad (4)$$

Chaque quart doit être couvert par un nombre spécifique de médecins (5). Cette couverture est fixée adéquatement en fonction : des ressources médicales et matérielles disponibles, de la fréquentation ainsi que de la stratégie de service. En revanche, étant donné que le département est très souvent forcé de recourir à la sous-couverture, nous devons autoriser la sous-couverture (5). Dépendamment des périodes et évènements, il est fréquent que le planificateur y ait recours pour finaliser ses horaires. Les différents jeux de données ont prouvé qu'il était effectivement impossible de s'en passer durant certains mois. Le modèle a alors pour but d'autoriser de la sous-couverture lorsque ceci et nécessaire, et de la faire intelligemment via la fonction objectif.

$$\sum_{i \in I, j \in J, k \in K} x_{i,j,k} \leq Demande_{j,k}, j \in J, k \in K \quad (5)$$

Pour prendre en compte les liens entre les différents plannings, les paramètres d'entrée doivent inclure les affectations du dernier jour du planning précédent. Ainsi, $j = 0$ est le dernier jour du

planning précédent. Sont stockées dans $Pref_{i,0,k}$ les affectations du précédent planning. Les contraintes (6) forcent alors les affectations de la journée initiale à coïncider avec l'horaire précédent, permettant alors aux différentes contraintes d'assurer l'hérédité entre les plannings directement avec $x_{i,0,k}$ sans créer d'exceptions.

$$Pref_{i,0,k} = x_{i,0,k}\ , i \in I, k \in K \tag{6}$$

2.1.3 Contraintes de charge de travail

Différentes séquences d'affectations sont régulées. Les contraintes (7) à (10) limitent la longueur des séquences de quarts, de quarts de soir, de nuit pour les médecins se dédiant aux nuits, et le nombre de soir par intervalles de 7 jours. ($MaxConsSH, MaxConsEve, MaxConsN$, $MaxEvePerW$ valent respectivement 7, 4, 5 et 4 usuellement).

$$\sum_{\alpha=0}^{MaxConsSH} \sum_{k\in K} x_{i,j+\alpha,k} \leq MaxConsSH\ , i \in I, j \in J | j \leq n - MaxConsSH \tag{7}$$

$$\sum_{\alpha=0}^{MaxConsEve} \sum_{k\in K_{s1\cup s2}} x_{i,j+\alpha,k} \leq MaxConsEve\ , i \in I, j \in J | j \leq n - MaxConsEve \tag{8}$$

$$\sum_{\alpha=0}^{MaxConsN} \sum_{k\in K_n} x_{i,j+\alpha,k} \leq MaxConsN, i \in I \mid OutN_i = 0, j \in J | j \leq n - MaxConsN \tag{9}$$

$$\sum_{\alpha=0}^{6} \sum_{k\in K_{s1}} x_{i,j+\alpha,k} \leq MaxEvePerW\ , i \in I, j \in J\backslash\{n, \dots, n-5\} \tag{10}$$

Les quarts de coordination étant éprouvants, ils ne s'effectuent jamais consécutivement :

$$\sum_{k\in K_{OR}} (x_{i,j,k} + x_{i,j+1,k}) \leq 1\ , i \in I, j \in J\backslash\{n\} \tag{11}$$

2.1.4 Contrainte d'équité

La gestion des fins de semaine est primordiale dans la gestion de l'équité d'un planning tel que mentionné par Van den Bergh, et al. [2]. Les contraintes (12) et (13) effectuent la mise à jour des variables $WE_{i,j}$. Les quarts compris dans les fins de semaine vont du vendredi soir au dimanche soir. $WE_{i,j}$ étant une variable binaire, le facteur *M* (*M=100* dans le cas présent) est présent pour lui permettre de prendre la valeur 1 adéquatement.

$$\sum_{k\in K\backslash(K_{j1}\cup K_{j2})} x_{i,j-1,k} + \sum_{k\in K} x_{i,j,k} + \sum_{k\in K\backslash K_n} x_{i,j+1,k} \leq M * WE_{i,j}\ , i \in I, j \in J_s \tag{12}$$

$$WE_{i,j} \leq \sum_{k\in K\backslash(K_{j1}\cup K_{j2})} x_{i,j-1,k} + \sum_{k\in K} x_{i,j,k} + \sum_{k\in K\backslash K_n} x_{i,j+1,k}, i \in I, j \in J_s \tag{13}$$

La répartition des fins de semaine est effectuée ainsi. Nul ne peut travailler plus de deux fins de semaine par période de 4 semaines (14), et sauf exception, deux fins de semaine de travail ne peuvent être consécutives (15). Des exceptions sont permises et pénalisées en fonction objectif pour maximiser la couverture. En effet le recours aux fins de semaine consécutives est souvent utilisé par le Docteur Gagnon pour satisfaire au mieux les couvertures. En revanche si la fin de semaine de travail consiste en un vendredi soir seul, alors la pénalisation n'est pas activée.

$$\sum_{j \in J_s} WE_{i,j} \leq 2, i \in I \quad (14)$$

$$WE_{i,j} + WE_{i,j+7} \leq 1 + ConsWE_{i,j} + FwoS_{i,j-1} + FwoS_{i,j+6}, i \in I, j \in J_s \backslash \{n, \dots, n-5\} (15)$$

L'équipe de médecins urgentistes à HMR s'occupe également d'une affectation de clinique externe ($k = 8EC$) (16), avec usuellement $MaxEcSh = 2$. Ce poste étant moins demandé de manière générale, chaque médecin n'en effectuera pas plus de deux par période. Il est à noter que ceci est vrai que le médecin travaille à temps plein ou à temps partiel. La logique de planification des urgences à HMR consiste à répartir le travail de manière à satisfaire en priorité les médecins travaillant à plein temps dans l'établissement, car ce sont eux qui contribuent le plus au fonctionnement du département. Cette situation se retrouve également dans plusieurs autres règles.

$$\sum_{j \in J, k \in K_{EC}} x_{i,j,k} \leq MaxEcSh, i \in I \quad (16)$$

De la même manière que les fins de semaine, les nuits étant travaillées, leur bonne répartition est très importante. Usuellement, il est utilisé $MaxNights = 2$. Ce qui signifie que jusqu'à 2 quarts de nuits et un quart de soir tardif, ou 3 quarts de soir tardifs peuvent être faits par médecin par période (situation actuellement), sauf pour les médecins se dédiant aux nuits (17) :

$$4 * \sum_{j \in K, k \in K_{s2}} x_{i,j,k} + 5 * \sum_{j \in K, k \in K_n} x_{i,j,k} \leq (MaxNights + 1) * 5 - 1, i \in I \mid OutN_i = 1 (17)$$

L'ensemble des quarts à couvrir comporte davantage de quarts de jour que de quarts de soir et les médecins ne préférant évidemment pas les soirs, il est nécessaire que ceci paraisse dans l'horaire de chaque médecin. La contrainte impose ainsi que la somme des soirs soit inférieure à la somme des journées augmentée de un (valeur usuelle de $MaxDvsE$) pour permettre une meilleure couverture. Les expérimentations sur les différents jeux de données ont montré que cette relaxation était nécessaire pour optimiser la couverture, Docteur Gagnon utilisant déjà cette relaxation pour peaufiner ses plannings.

$$\sum_{j\in J,k\in K_{s1}} x_{i,j,k} \leq MaxDvsE + \sum_{j\in J,k\in K_{j1}\cap K_{j2}} x_{i,j,k},\ i \in I \quad (18)$$

Les contraintes (19) à (25) mettent à jour les variables présentes en fonction objectif pour : à la fois répartir la charge de travail lorsque la capacité de travail est présente en excès sur la période (19), minimiser le nombre d'affectations de quarts de coordination par médecin (20) et équilibrer la répartition des types d'affectation.

$$Nb_i - \sum_{j\in J,k\in K} x_{i,j,k} \leq MaxRelaxShift\ ,\ i \in I \quad (19)$$

$$\sum_{j\in J} \sum_{k\in K_{OR}} x_{i,j,k} \leq MaxOR,\ i \in I_{OR} \quad (20)$$

Pour les contraintes (21) à (25), il faut noter l'exclusion dans la mise à jour des ratios des médecins n'effectuant que peu de quarts et également des médecins se consacrant à un certain type de quarts. Les médecins effectuant peu de quarts sont retirés de la mise à jour des variables pour deux raisons. Premièrement, le nombre de quarts qu'ils demandent étant faible, une répartition idéale des affectations est dure à atteindre, les ratios produits sont donc peu représentatifs et interfèrent avec les autres pour une mise à jour satisfaisante des maximums et minimums. Deuxièmement, comme indiqué plus haut, la priorité dans l'établissement d'un planning équitable est placée sur les médecins travaillant à temps plein dans l'établissement. Ainsi l'équilibrage des types d'affectation est fait entre le « cœur » de l'équipe de médecins, le reste de l'équipe complétant les affectations vacantes.

$$\sum_{j\in J,k\in K_A} \frac{x_{i,j,k}}{Nb_i} \leq MaxAmb,\ i \in I|\ OffPréférences_i * OutN_i * OutU_i = 1 \quad (21)$$

$$MinAmb \leq \sum_{j\in J,k\in K_A} \frac{x_{i,j,k}}{Nb_i},\ i \in I|\ OffPréférences_i * OutN_i * OutU_i = 1 \quad (22)$$

$$\sum_{j\in J,k\in K_U} \frac{x_{i,j,k}}{Nb_i} \leq MaxU,\ i \in I|\ OffPréférences_i * OutN_i * OutU_i = 1 \quad (23)$$

$$\sum_{j\in J,k\in K_{O,SF,C}} \frac{x_{i,j,k}}{Nb_i} \leq MaxOSFC,\ i \in I|\ OffPréférences_i * OutN_i * OutU_i = 1 \quad (24)$$

$$MinOSFC \leq \sum_{j\in J,k\in K_{O,SF,C}} \frac{x_{i,j,k}}{Nb_i},\ i \in I|\ OffPréférences_i * OutN_i * OutU_i = 1 \quad (25)$$

2.1.5 Contraintes d'ergonomie

Le respect du cycle circadien est à la base de la création d'un rythme de travail adapté dans la durée (Berger et Hobbs [19]). Les contraintes (26) à (30) imposent ici un repos d'une durée minimum de

16 heures entre deux quarts, avec des exceptions pour la transition entre le vendredi soir et la fin de semaine, où le repos peut être abaissé à 12 heures.

$$\sum_{k\in K} x_{i,j,k} \leq 1 \text{ , } i \in I, j \in J \tag{26}$$

$$\sum_{k\in K\setminus K_{j1}} x_{i,j,k} + \sum_{k\in K_{j1}} x_{i,j+1,k} \leq 1 \text{ , } i \in I, j \in J\setminus\{n\} \tag{27}$$

$$\sum_{k\in K\setminus K_{j1}\cup K_{j2}} x_{i,j,k} + \sum_{k\in K_{j1}} x_{i,j+1,k} \leq 1 \text{ , } i \in I, j \in J\setminus\{n\} \tag{28}$$

$$\sum_{k\in K_{s2}\cup K_n} x_{i,j,k} + \sum_{k\in K_{j1}\cup K_{j2}\cup K_{s1}} x_{i,j+1,k} \leq 1, \; i \in I, j \in J\setminus\{n\} \tag{29}$$

$$\sum_{k\in K_n} x_{i,j,k} + \sum_{k\in K\setminus K_n} x_{i,j+1,k} \leq 1 \text{ , } i \in I, j \in J\setminus\{n\} \tag{30}$$

Les contraintes (31) interdisent l'enchainement entre un quart de jour et puis un quart de nuit, afin de créer une progression vers l'avant des affectations, sans changements trop brutaux.

$$\sum_{k\in K_{j1}\cup K_{j2}} x_{i,j,k} + \sum_{k\in K_n\cup K_{s2}} x_{i,j+1,k} \leq 1 \text{ , } i \in I, j \in J\setminus\{n\} \tag{31}$$

La gestion des fins de semaine est stratégique pour satisfaire l'équipe de médecins (Van den Bergh, et al. [2]). Le souhait de l'équipe de médecins est de sacrifier le moins de fins de semaine possible en devant se rendre à l'hôpital. Ainsi il est préférable que lorsqu'une fin de semaine est travaillée, elle soit pleinement travaillée pour en sacrifier le moins possible. C'est pourquoi les affectations durant les fins de semaine sont particulières. Pour densifier le travail les fins de semaine, les contraintes (32) et (33) imposent de travailler deux fois les fins de semaine. Les nuits du vendredi et du samedi sont consécutives, et les quarts de jour et soir du samedi et du dimanche se font consécutivement.

$$\sum_{k\in K\setminus K_n} x_{i,j,k} = \sum_{k\in K\setminus K_n} x_{i,j+1,k} \text{ , } i \in I, j \in J_s \tag{32}$$

$$\sum_{k\in K_n} x_{i,j-1,k} = \sum_{k\in K_n} x_{i,j,k} \text{ , } i \in I, j \in J_s \tag{33}$$

Également, la séquence pour les soirs tardifs de fin de semaine est imposée. Un médecin effectuera la séquence des quarts 22, $18O$ et $18O$ chaque vendredi, samedi et dimanche avec les contraintes (34) aidées de (32).

$$\sum_{k\in K_{s2}} x_{i,j-1,k} = \sum_{k\in K_{s2}} x_{i,j,k} \text{ , } i \in I, j \in J_s \tag{34}$$

Les choix des affectations se font toujours identiquement en imposant l'enchainement des quarts d'UHB (35) et de cabine (36). Les quarts de coordination et d'ambulance sont alternés grâce aux contraintes (12) et (33).

$$\sum_{k\in K_u} x_{i,j,k} = \sum_{k\in K_u} x_{i,j+1,k} \text{ , } i \in I, j \in J_s \tag{35}$$

$$\sum_{k\in K_C\cap K_{j1}} x_{i,j,k} = \sum_{k\in K_C\cap K_{j1}} x_{i,j+1,k} \text{ , } i \in I, j \in J_s \tag{36}$$

La réalisation d'un quart de nuit modifiant profondément le rythme de vie d'un médecin, elle doit être effectuée selon des séquences particulières. Un quart de nuit peut être effectué seul, seulement s'il est précédé d'un quart de soir tardif :

$$\sum_{k\in K_n} x_{i,j+1,k} \leq \sum_{k\in K_{s2}} x_{i,j,k} + \sum_{k\in K_n} x_{i,j+2,k} \text{ , } i \in I, j \in J\backslash\{n, n-1\} \tag{37}$$

Les médecins à temps plein préfèrent effectuer leurs quarts en séquence plutôt que de manière isolée, ceux ne travaillant que quelques quarts eux souhaitent étaler davantage leurs jours de travail. Ainsi, les contraintes (38) viennent comptabiliser les quarts isolés. Leur nombre par médecin est alors régulé pour les médecins à temps plein, il est usuellement limité à 1 (39).

$$\sum_{k\in K} x_{i,j+1,k} \leq \sum_{k\in K}\left(x_{i,j,k} + x_{i,j+2,k}\right) + IsoShift_{i,j+1} \text{ , } i \in I, j \in J\backslash\{n, n-1\} \tag{38}$$

$$\sum_{j\in J\backslash\{n\}} IsoShift_{i,j} \leq MaxIsoSh \text{ , } i \in I \mid OffPréférences_i = 1 \tag{39}$$

Le quart du vendredi soir comporte quatre affectations tandis que le samedi en comporte que deux, des médecins doivent alors forcément travailler le vendredi soir sans travailler le samedi soir. Les heures de repos imposent alors que des quarts de soir du vendredi ne soient pas suivis d'une affectation le samedi matin. En revanche, un vendredi soir travaillé comptabilise bien une fin de semaine travaillée. Il est alors imposé que cette situation ne se produise qu'au plus une fois par période et par médecin (40) ($MaxFwoS = 1$ usuellement). La variable $FwoS_{i,j}$ est mise à jour par (41) et (42).

$$\sum_{k\in K_{s1}} x_{i,j,k} \leq \sum_{k\in K_{j2\cup s1}} x_{i,j+1,k} + FwoS_{i,j} \text{ , } i \in I, j \in J_v \tag{40}$$

$$\sum_{k\in K_{j2\cup s1}} x_{i,j+1,k} + FwoS_{i,j} \leq 1 \text{ , } i \in I, j \in J_v \tag{41}$$

$$\sum_{j\in J_v} FwoS_{i,j} \leq MaxFwoS \text{ , } i \in I \tag{42}$$

Nous avons spécifié plus haut que si un vendredi soir seul était travaillé, alors travailler la fin de semaine suivante ou précédente ne sera pas pénalisé en tant que fin de semaine consécutive.

Cependant ceci est permis seulement si le second vendredi soir reste libre. Les contraintes (43) et (44) assurent que soit un vendredi soir seul, soit un samedi soir est travaillé dans toute paire de fins de semaine consécutives.

$$FwoS_{i,j} + \sum_{k \in K_{s1}} x_{i,j+8,k} \leq 1 \text{ , } i \in I, j \in J_v \cap J \backslash \{n, \dots, n-7\} \quad (43)$$

$$\sum_{k \in K_{s1}} x_{i,j-6,k} + FwoS_{i,j} \leq 1 \text{ , } i \in I, j \in J_v \cap J \backslash \{5, \dots, 0\} \quad (44)$$

2.1.6 Fonction objectif

La fonction objectif est multicritères pour tenir compte des préférences et des relaxations de contraintes introduites. Les poids σ_α sont introduits dans la fonction, α correspondant à chacun des critères à pénaliser. Les deux premières parties, les plus importantes, permettent aux horaires de satisfaire deux types de situations problématiques : la pénurie de main d'œuvre, et son excès. En effet, durant les mois d'été ou les fêtes de fin d'année, le personnel prend davantage de congés. Le planificateur n'a alors pas le choix d'effectuer des sous-couvertures. Le modèle linéaire proposé permet de gérer cette situation en minimisant la sous-couverture et la guidant en pénalisant indépendamment les différentes affectations. Les sous-couvertures de fin de semaine et de nuit étant par exemple plus critiques, ces affectations doivent ainsi être couvertes en priorité. Minimiser la sous-couverture équivaut à maximiser le nombre d'affectations, ce nombre dernier étant limité par la contrainte (5) afin de ne pas créer de sur-couverture. Par souci de sobriété, aucune variable tampon n'a été introduite pour représenter la sous-couverture, les affectations apparaissent directement en fonction objectif :

$$F_{couverture} = -\sum_{i \in I, j \in J, k \in K} \sigma_{Couv,k} * x_{i,j,k} - \sigma_{CouvWE} * \sum_{i \in I, j \in J_s, k \in K} x_{i,j,k}$$

A l'opposé, lors des mois creux, l'équipe demande à travailler davantage, mais la quantité de travail pouvant être offerte reste constante. Le modèle distribue alors les quarts de manière à ce que le manque d'affectation global soit partagé de la même manière entre chaque médecin. C'est-à-dire que les médecins contribuant fortement en effectuant beaucoup de quarts auront les mêmes déficits que ceux travaillant seulement des mi-temps :

$$F_{NbShift} = \sigma_{NbShift} * MaxRelaxShift$$

La fonction objectif limite ensuite le recours aux fins de semaine consécutives et récompense les affectations ayant été faites sur des quarts spécifiés comme favoris, permettant ainsi d'influencer le planning pour toutes sortes de cas particuliers:

$$F_{consWE} = \sigma_{CWE} * \sum_{i \in I, j \in J_s \cap (J \setminus \{n,\dots,n-6\})} ConsWE_{i,j}$$

$$F_{préférences} = -\sum_{i \in I, j \in J, k \in K} \sigma_{Favoris_j} * x_{i,j,k} * Pref_{i,j,k}$$

La dernière partie de l'objectif est purement destinée à résoudre le problème d'affectation de tâches qui consiste à répartir adéquatement les types d'affectations. Les proportions de type d'affectations sont alors homogénéisées entre l'ensemble des médecins :

$$F_{ratios} = \sigma_{OR} * MaxOR + \sigma_{Amb} * (MaxAmb - MinAmb) + \sigma_U * MaxU + \sigma_{O,SF,C} * (MaxOSFC - MinOSFC)$$

La fonction objectif se résume donc comme la somme des fonctions énoncées ci-dessus :

$$F_{objectif} = F_{couverture} + F_{NbShift} + F_{consWE} + F_{préférences} + F_{ratios}.$$

2.1.7 Synthèse du problème

En résumé le problème s'énonce comme étant :

Minimiser $F_{objectif}$

Sous les contraintes :

(1) à (44)

$x_{i,j,k}, WE_{i,j}, FwoS_{i,jv}, ConsWE_{i,js}$ et $IsoShift_{i,j} \in \{0,1\}$

$MaxRelaxShift \in \mathbb{N}^+$

$MaxOR, MaxAmb, MinAmb, MaxU, MaxOSFC$ et $MinOSFC \in \mathbb{R}^+$

2.2 Approche en deux phases

Dans le but de transférer l'outil de planification, nous avons mentionné que l'utilisation d'un solveur libre impose une sobriété de la dimension du modèle. C'est pourquoi nous présentons ici un modèle décomposé. La première phase de la décomposition du problème correspond à la résolution du problème d'horaire. Il s'agit de choisir seulement qui viendra durant les quarts de

jour, soir et nuit sans décider des affectations qu'ils auront à occuper durant ces quarts, tout en respectant les mêmes exigences que dans le modèle complet. La seconde phase de la résolution, pour aboutir à l'horaire final, va prendre en paramètre le résultat de la première phase. C'est-à-dire que sur chaque quart affecté en première phase, la seconde phase répartit les affectations existantes entre les médecins affectés à ce quart. La seconde phase effectue une répartition des types de quart entre médecins alors que la première phase effectue une répartition des quarts.

2.2.1 Processus de décomposition

Les 44 contraintes déclarées dans le modèle global peuvent se classer en trois catégories : celles qui participent strictement au problème d'affectation de quarts, celles qui participent strictement au problème d'affectation de tâches et celles qui participent aux deux problèmes.

Le tableau 2.4 présente la distribution des contraintes parmi les deux phases de résolution du problème: les contraintes présentes seulement dans la première phase d'affectation de quarts, les contraintes présentes uniquement dans la seconde d'affectation de tâches et les contraintes présentes dans les deux phases. Par exemple, la limitation du nombre de nuit appartient évidemment au problème d'affectation de quarts, la contrainte ne sera donc pas présente dans la phase d'affectation de tâches. Tandis que à l'inverse, la contrainte empêchant la succession de deux quarts de coordination $8OR$ se place dans la catégorie d'affectation de tâche et ne sera pas présente dans la phase d'affectation de quarts. Les contraintes de la troisième catégorie seront elles présentent dans les deux phases.

Tableau 2.4 : Contribution des contraintes pour le modèle scindé

Problèmes	Contraintes
Affectation de quarts	3 à 5, 7 à 10, 12 à 15, 17 à 19, 26 à 34, 37 à 44
Affectation de tâches	11, 16, 20 à 25, 35 et 36
Affectation de quarts et de tâches	1, 2 et 6

Ainsi, il est facile de voir que la majorité des contraintes du modèle complet sont dédiées à la première partie du problème affectant les quarts sans définir les types d'affectation. Cependant les deux problèmes ne sont pas totalement indépendants. Tout d'abord trois contraintes interviennent

dans les deux problèmes : la contrainte assurant disponibilité et compétence (a); la contrainte de couverture (b); et la contrainte d'initialisation du premier jour (c). Ces trois contraintes vont alors réapparaitre dans les deux étapes.

(a) La gestion des disponibilités fait clairement partie du problème d'affectation de quarts. Lorsqu'un quart est attribué en première phase, la seconde phase choisit quel type d'affectation de tâches sera faite sur ce quart exactement. En revanche les compétences agissent dans les deux parties. Les aptitudes des médecins peuvent s'exprimer à la fois sur les types de quarts (incapacité à travailler des nuits par exemple) que sur les types de postes (inaptitude à effectuer les quarts de coordination par exemple).
(b) La couverture dans le modèle global englobe à la fois le nombre de quarts à affecter le matin, le soir ou la nuit, mais aussi combien de médecins sont requis par poste. Dans le modèle en deux phases, la première étape doit encore disposer d'une couverture nécessitant cette fois de savoir uniquement combien de médecins sont requis le matin, soir et nuit, sans se préoccuper des affectations de postes. En deuxième phase, la spécification de la contrainte dans le modèle global reste exacte et est alors employée telle quelle.
(c) L'initialisation du premier jour s'applique aux deux étapes. En première phase, pour pouvoir imposer qui vient le matin, le soir ou la nuit, et en deuxième phase pour savoir quels postes les médecins occuperont.

Pour pouvoir respecter l'ensemble des règles spécifié dans le modèle global, il ne suffit pas de découper le modèle en supprimant des contraintes, il faut également rajouter des contraintes permettant d'assurer la faisabilité de la solution entre la première et la seconde étape. À la première étape, il s'agit de déterminer quels médecins, viennent quels jours et à quels moments de la journée. En deuxième étape, d'après les décisions de la première étape, il faut distribuer les postes. Mais les règles présentes en deuxième étape peuvent créer de l'infaisabilité. Typiquement, pour chaque jour de la semaine, le quart de coordination et le quart d'unité d'hospitalisation brève ne peuvent être effectués que par certains médecins, les compétences sur ces affectations peuvent être critiques. Pour garantir la faisabilité en deuxième partie et puisque ces quarts sont très importants à couvrir, des contraintes doivent être ajoutées afin de garantir qu'à la première étape les médecins aux compétences suffisantes soient affectés, et qu'en seconde étape les contraintes ergonomiques concernant ces affectations puissent être prises en compte. En deuxième phase, c'est avant tout la prise en compte des résultats de la première étape qu'il faut traduire en termes de contraintes. Ces contraintes sont détaillées dans la section 2.2.2.3.

2.2.2 Première phase

La première phase de la décomposition du problème correspond à la résolution du problème d'horaire. Il s'agit de choisir seulement qui viendra durant les quarts de jour, soir et nuit sans décider des postes qu'ils auront à occuper durant ces quarts, tout en respectant les mêmes exigences que dans le modèle complet.

2.2.2.1 Modification des index

La modélisation en deux étapes utilise les mêmes index que le modèle global du tableau 2.1 avec des modifications sur les ensembles suivants :

Tableau 2.5 : Modification des index en phase 1

K	$= \{J1, J2, S1, S2, N\}$ les types de quarts

2.2.2.2 Variables et paramètres

Les paramètres et variables alors mentionnées dans les contraintes sous les mêmes appellations que le modèle direct dans les tableaux 2.2 et 2.3, réfèrent alors exactement aux mêmes définitions que dans le modèle direct en utilisant les modifications apportées aux index.

Il faut également ajouter les paramètres du tableau 2.6:

Tableau 2.6: Paramètres ajoutés en phase 1

$NbOR$	$=$ *nombre de médecins requis en quart de coordination*
NbU_j	$=$ *nombre de médecins requis le jour j en quart UHB*

2.2.2.3 Contraintes

La première partie du modèle en deux étapes emprunte exactement les contraintes suivantes au premier modèle : (4) à (10), (12) à (15), (17) à (19), (26) à (34), (37) à (44).

Il faut modifier et ajouter des contraintes pour compenser celles ôtées de la première étape contribuant à la résolution du problème d'horaire, mais également pour être capable de prendre en charge en deuxième phase le problème d'affectation aux postes.

Les disponibilités et compétences sont vérifiées avec les contraintes suivantes remplaçant les contraintes (1) à (3), où les compétences maintenant ne concernent plus les postes:

$$x_{i,j,k} \leq Av_{i,j,k} * Ab_{i,k} \text{ , } i \in I, j \in J, k \in K \qquad (1^*a)$$

Pour que le problème d'affectation aux postes soit réalisable, il faut s'assurer de la présence chaque jour de semaine d'un médecin ayant la compétence de coordination (45) et d'un médecin pour couvrir le quart UHB (46):

$$\sum_{i \in I_{OR}} x_{i,j,J1} \geq NbOR \text{ , } j \in J \setminus \{J_s \cup J_d\} \qquad (45)$$

$$\sum_{i \in I_U} x_{i,j,J1} \geq NbU_j, j \in J \qquad (46)$$

En revanche il faut veiller à ce que ces deux médecins ne soient pas confondus (47), puisque certains ont la double compétence, afin que les deux affectations puissent être faites:

$$\sum_{i \in I_{OR} \cup I_U} x_{i,j,J1} \geq NbOR + NbU_j \text{ , } j \in J \setminus \{J_s \cup J_d\} \qquad (47)$$

Il faut également s'assurer qu'il y ait les médecins compétents pour que les quarts de coordination puissent être affectés de manière non consécutive. Les contraintes (48) assurent alors que si un médecin est seul compétent et présent pour effectuer un quart de coordination le jour *j* (dans ce cas les contraintes (47) garantissent qu'un autre médecin effectue le quart d'UHB), il n'est pas seul avec cette compétence le lendemain. Il est important de noter que $NbOR = 1$ quel que soit l'instance. Si ce n'était pas le cas, la contrainte devrait s'exprimer différemment, le paramètre $NbOR$ ne peut pas évoluer dans le sens où le poste de coordinateur est voué à être occupé par un unique médecin.

$$(NbOR - \sum_{i' \in I_{OR}} x_{i',j,J1}) + x_{i,j,J1} \leq \sum_{i' \in I_{OR} \setminus \{i\}} x_{i',j+1,J1}, i \in I_{OR} \text{ , } j \in J \setminus \{n\} \cup J_v \cup J_s \cup J_d \qquad (48)$$

Si un unique médecin *i* est compétent pour effectuer le quart de coordination le jour *j*, alors $\left(NbOR - \sum_{i' \in I_{OR}} x_{i',j,J1}\right) = 0$, et les contraintes (48) sont actives et imposent que le lendemain un médecin autre que i soit présent pour effectuer le quart de coordination et respecter ainsi la contrainte (11) en deuxième phase. Si $\sum_{i' \in I_{OR}} x_{i',j,J1} > 1$, alors les contraintes (48) sont inactives. Ainsi, les contraintes (48) n'introduisent pas de coupes inutiles.

2.2.2.4 Fonction objectif et modèle pour la phase 1

La fonction objectif se résume aux termes : $F_{objectif1} = F_{couverture} + F_{NbShift} + F_{consWE}$. Ce sont les composantes participant à la résolution du problème d'horaire.

En résumé le problème s'énonce comme étant :

Minimiser $F_{objectif1}$

Sous les contraintes :

(1*a), (4) à (10), (12) à (15), (17) à (19), (26) à (34), (35) à (48).

$x_{i,j,k}, WE_{i,j}, FwoS_{i,jv}, ConsWE_{i,js}\ et\ IsoShift_{i,j} \in \{0,1\}$

$MaxRelaxShift \in \mathbb{N}^+$

2.2.3 Seconde phase

La seconde partie de la résolution, pour fournir l'horaire final, va prendre en paramètre les résultats de la première phase. C'est-à-dire que sur chaque quart affecté en première phase, la seconde phase répartit les affectations existantes entre les médecins affectés à ce quart. La seconde phase effectue une répartition des quarts entre médecins alors que la première phase effectue une répartition des postes.

2.2.3.1 Modification des index

La deuxième phase reprend exactement les index du modèle global en tableau 2.1 avec l'ajout de l'index suivant :

Tableau 2.7: Modification des index en phase 2

$KS1$	$= \{J1, J2, S1, S2, N\}$ les types de quarts

2.2.3.2 Variables et paramètres

Les variables et paramètres sont exactement les mêmes que ceux du modèle global avec en plus comme paramètre, les résultats de la première phase :

Tableau 2.8: Paramètres ajoutés en phase 2

$XS1_{i,j,k}$	$= \begin{cases} 1 & \text{si docteur i travaille le quart } k \in KS1 \text{ le jour j} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$

2.2.3.3 Contraintes

Le modèle utilise les contraintes du modèle complet suivantes: (4) à (6), (11), (16), (20) à (25), (35) et (36). Il réintroduit le respect des compétences présentes dans les contraintes (1) et (2):

$$x_{i,j,k} \leq Ab_{i,k}, i \in I, j \in J, k \in K \backslash K_{OR} \qquad (1^*b)$$

$$x_{i,j,k} \leq Ab_{i,k}, i \in I, j \in J \backslash \{J_s \cup J_d\}, k \in K_{OR} \qquad (2^*)$$

Les contraintes (49) à (53) forcent la prise en compte des décisions de la première phase et laissent la liberté de l'affectation.

$$\sum_{k \in K_{j1}} x_{i,j,k} = XS1_{i,j,J1}\ ,\ i \in I, j \in J \backslash \{0\} \qquad (49)$$

$$\sum_{k \in K_{j2}} x_{i,j,k} = XS1_{i,j,J2}\ ,\ i \in I, j \in J \backslash \{0\} \qquad (50)$$

$$\sum_{k \in K_{s1}} x_{i,j,k} = XS1_{i,j,S1}\ ,\ i \in I, j \in J \backslash \{0\} \qquad (51)$$

$$\sum_{k \in K_{s2}} x_{i,j,k} = XS1_{i,j,S2}\ ,\ i \in I, j \in J \backslash \{0\} \qquad (52)$$

$$\sum_{k \in K_{n}} x_{i,j,k} = XS1_{i,j,N}\ ,\ i \in I, j \in J \backslash \{0\} \qquad (53)$$

2.2.3.4 Fonction objectif et modèle pour la phase 2

La fonction objectif devient : $F_{objectif2} = F_{préférences} + F_{ratios}$

En résumé le problème s'énonce comme étant :

Minimiser $F_{objectif2}$

Sous les contraintes :

(1*b), (2*), (6), (11), (16), (20) à (25), (35) et (36)

$x_{i,j,k} \in \{0,1\}$

$MaxOR, MaxAmb, MinAmb, MaxU, MaxOSFC\ et\ MinOSFC\ \in\ \mathbb{R}^+$

CHAPITRE 3 PRISE EN COMPTE DES BESOINS

Les modèles présentés plus haut ont été construits sur la base d'une dizaine d'instances du problème à HMR. Chaque nouveau mois de données a ainsi permis de mettre à l'épreuve la modélisation et de soumettre les résultats au Docteur Gagnon. La variété des données a permis de faire ressortir les différentes exceptions du problème d'horaire, pas forcément présentes sur une unique période. Les premiers plannings ont simplement permis d'améliorer le modèle en recueillant les retours du planificateur, jusqu'aux derniers ayant pu directement être utilisés à HMR.

Dans ce chapitre, la particularité des différentes instances est présentée, ceci nous amène à décrire comment le planificateur prend en charge les différents cas et comment le modèle s'adapte pour satisfaire les objectifs malgré la diversité des instances.

3.1 Variété des instances

Comme déjà mentionné la planification à HMR doit prendre en compte deux types de situations délicates souvent antagonistes: la pénurie de main d'œuvre et l'excès.

L'excès de main d'œuvre se manifeste dès que des médecins n'ont pas reçu autant de quarts qu'ils ont demandés. Le cas le plus fréquent apparaît lorsque :

$$\sum_{j \in J, k \in K} Demande_{j,k} < \sum_{i \in I} Nb_i$$

C'est-à-dire que le groupe de médecins a demandé davantage de quarts sur la période que la couverture en requiert, laissant obligatoirement des quarts demandés non affectés. Toutefois, il est possible d'avoir un excès de main d'œuvre ne concernant pas la totalité de l'équipe et ne vérifiant pas l'inégalité ci-dessus. Les contraintes régulant les séquences limitent le nombre de quarts pouvant être affectés sur de courts intervalles. Ainsi dans toute séquence de quarts, un nombre minimum de jours de repos est créé. Les médecins donnant des disponibilités très serrées ne peuvent alors pas concilier satisfaction d'une demande de quarts élevée et respect de règles de planification. Également, l'excès de main d'œuvre peut apparaître via l'interférence des disponibilités du groupe. C'est-à-dire que trop de quarts sont attendus sur un horizon donné, par la restriction des disponibilités sur cette période, trop de médecins demandent à recevoir la densité de

quarts maximale via leurs disponibilités et demandes de quarts. Ainsi leur densité d'affectations personnelles doit être plus basse et les prive de quarts.

La pénurie elle, se manifeste de deux manières différentes. La première consiste en la situation opposée à celle de l'excès, soit que la couverture domine la demande de quarts. Cette situation est traditionnellement rencontrée durant les mois d'été ou la période des fêtes:

$$\sum_{i \in I} Nb_i < \sum_{j \in J, k \in K} Demande_{j,k}$$

L'autre cas de pénurie le plus fréquent peut, quant à lui, concerner de très courtes périodes dans le planning :

$$\exists j \in J | \sum_{i \in I} MAX_{k \in K}(Av_{i,j,k}) < \sum_{k \in K} Demande_{j,k}$$

C'est-à-dire que sur au moins une journée, la couverture nécessite plus de médecins que ceux disponibles. C'est classiquement le cas autour du jour de Noël ou du jour de l'an. Habituellement, 14 quarts sont à distribuer par jour en semaine et 8 le weekend. Par exemple, il est courant de relever des disponibilités oscillant entre 9 et 12 médecins autour de Noël. Il est alors impossible de satisfaire à la fois la couverture et la disponibilité des médecins.

Les différentes configurations peuvent donc se présenter simultanément sur un même horaire: il est possible de trouver les deux types de pénuries sur un même horaire et un excès de main d'œuvre associé à une pénurie ponctuelle.

3.2 Les prises en charge du processus de planification manuelle

La pénurie ponctuelle : une contrainte et un objectif sont ici opposés : le respect des disponibilités et la satisfaction de la couverture. Docteur Gagnon, pour confectionner ses horaires, actionne généralement deux leviers. Premièrement, il décide de sous-couvrir. Pour les situations exceptionnelles comme les jours fériés, il fait le choix de placer une couverture plus légère de type weekend sur les jours de semaine concernés. Deuxièmement, lorsque le cas est très critique il prend exceptionnellement la décision d'affecter des médecins sur les frontières de leurs périodes d'indisponibilité. C'est une décision qu'il prend en considérant personnellement le médecin. C'est-à-dire qu'il l'effectue en connaissance du caractère de l'indisponibilité demandée et des

dispositions du médecin concerné. C'est une décision nécessitant de prendre en compte beaucoup de paramètres non mesurables. En revanche, lorsqu'il décide de sous-couvrir la décision est là bien plus quantitative. Les quarts qu'il sous-couvre sont systématiquement les mêmes : ceux en double. Les quarts de cabine du matin ou de l'après-midi sont les premiers à être supprimés. Inversement, un quart de nuit ne peut absolument pas être supprimé.

La pénurie globale : lorsque l'équipe propose trop peu de quarts en regard de la couverture, le Docteur Gagnon agit également dans deux directions: en considérant personnellement les membres de son équipe, il accorde un quart supplémentaire à certains médecins s'il juge ceci acceptable; autrement il sous-couvre intelligemment de la même manière que précédemment.

L'excès de main d'œuvre : le problème rencontré ici concerne alors l'équité, contrairement au cas précédent en rapport à la qualité du planning. Si des médecins ne peuvent pas travailler autant qu'ils le souhaitent, le manque de quarts sera alors distribué en supprimant les quarts d'abord aux médecins travaillant le moins en termes de quarts demandés.

3.3 Les prises en charge du processus automatisé

L'objectif donné au modèle est de reproduire la stratégie du planificateur humain. Cependant, nous venons de voir que certaines décisions font appel au caractère humain de la planification. Le rôle du modèle est alors de ne pas prendre ces décisions, mais de laisser l'opportunité au planificateur de le faire a posteriori. Pour les autres, le modèle colle au processus de décision.

La pénurie ponctuelle : le modèle prend en charge la sous-couverture. Il ne s'autorise pas en revanche de revoir la disponibilité des médecins, la décision étant trop complexe. Le planificateur peut, après affichage du résultat, échanger des sous-couvertures pour des libérations de disponibilités. Via l'amélioration de la fonction objectif pour chaque quart attribué, le modèle pénalise indépendamment chaque type de sous-couverture afin de couvrir le maximum de quarts possibles les jours où les médecins manquent.

La pénurie globale : ici encore, l'amélioration de la fonction objectif pour chaque quart attribué va pouvoir sous-couvrir en choisissant quel quart, mais également quel jour (pour ne pas sous-couvrir en fin de semaine). À nouveau, augmenter la capacité de travail des différents médecins est une décision trop subtile à prendre. Le planificateur peut après coup décider de rajouter des quarts à son équipe s'il juge les sous-couvertures trop gênantes.

L'excès de main d'œuvre : les choix du médecin sont ici parfaitement reproduits. La fonction objectif maximise le nombre d'affectations effectuées incitant alors à donner des quarts tant que la couverture le permet. Pour les quarts non distribués souhaitant être travaillés, le terme $MaxRelaxShift$ recueille le plus gros déficit en quarts par médecin indépendamment du volume demandé et minimise ce terme, en favorisant les médecins à temps plein de la même manière que le planificateur, puisque leur déficit en affectation n'est pas proportionnel au nombre d'affectations demandées.

Le modèle prend donc en compte les pénuries et excès de main d'œuvre pour l'ensemble des choix quantitatifs usuellement faits par le planificateur. Les augmentations de la capacité de travail occasionnellement faites par le planificateur sont du ressort d'hypothèses non modélisables sur les plannings individuels des médecins. Elles ne sont donc pas prises en charge mais les horaires produits ne vont pas à l'encontre des modifications allant dans cette direction : le maximum est fait pour utiliser le levier de la sous-couverture, le levier de la reconsidération des paramètres de disponibilité des médecins est activable après coup.

3.4 Mesure de la qualité d'un horaire

Afin d'être capable d'évaluer les résultats de la méthode de planification proposée et de les comparer objectivement à ceux faits à la main, une liste de critères d'évaluation est dressée. Elle se découpe en plusieurs parties correspondant aux différents objectifs : la gestion de la sous-couverture, la répartition de l'excès de main d'œuvre, la présence de quarts isolés, la présence de fins de semaine consécutives, la répartition des quarts de soir, la satisfaction des préférences et l'homogénéisation des ratios de types de quarts.

Le tableau 3.1 liste les différents critères d'évaluation d'un horaire.

La sous-couverture est évaluée avant tout par son nombre, le but étant qu'il n'y en ait le moins possible. Toutefois, la manière dont elle est distribuée est importante. C'est pourquoi il est important de mesurer le nombre de sous-couvertures les plus handicapantes, comme l'accumulation de plusieurs sous-couvertures sur une même journée (1.5.) ou celles de fin de semaine (1.3.).

Dans le cas inverse où il y a un **surplus de capacité de travail**, les critères (2.1.) et (2.2.) comptabilisent combien de médecins se partagent le manque de quarts et quel est le plus gros déficit en quart par médecin.

Tableau 3.1: Liste des critères d'évaluation d'un horaire

1. Critères de sous-couverture
1.1. Sous-couverture totale
1.2. Quarts distribués
1.3. Sous-couvertures de fin de semaine
1.4. Répartition des sous-couvertures Jour/Soir
1.5. Sous-couvertures majeures
2. Répartition de l'excès de main d'œuvre
2.1. Nombre de médecins ayant des quarts demandés non travaillés
2.2. Déficits majeurs de quarts par médecin
3. Critères d'isolation des quarts
3.1. Nombre de quarts isolés pour les médecins à temps plein
3.2. Nombre de nuits isolées
3.3. Nombre maximum de quarts isolés par médecin à temps plein
3.4. Nombre de médecins à temps plein avec plus de deux quarts isolés
4. Fins de semaine consécutives
4.1. Nombre de fins de semaine consécutives
5. Ratio quarts de soir / quarts de jour
5.1. Plus grande différence soirs – jours pour les médecins à temps plein
6. Préférences
6.1. Nombre de préférences respectées
7. Répartition des types d'affectation (minimum/moyenne/maximum)
7.1. ratio UHB/nombre de quarts souhaités
7.3. ratio ambulance/nombre de quarts souhaités
7.3. ratio OR/nombre de quarts souhaités
7.4. ratio observation, salle fauteuil et cabine/nombre de quarts souhaités

Dans l'absolu, les **quarts de travail isolés** ne sont pas appréciés par les médecins. Cependant, les nombres de quarts demandés par les médecins varient entre 6 et 18 quarts par période de quatre semaines usuellement. Pour les quelques médecins ne travaillant que très peu de quarts à HMR, il est par contre préférable que la charge de travail soit diffuse sur tout le mois. Les modèles décrits plus haut ne limitent ainsi le nombre de quarts isolés que pour les médecins effectuant suffisamment de quarts, ceux pour qui cette limitation est bénéfique.

Les recours aux **fins de semaines consécutives** sont comptabilisés en (4.1.). Parce qu'il y a plus de quarts de jour à distribuer que de quarts de soir, il est important que **l'équilibre entre quarts de jour et quarts de soir** reste présent chez chaque médecin. Les modèles développés contraignent cette répartition pour garantir de bons horaires. Le critère (5.1.) est alors utilisé pour mesurer l'écart

entre ce que les modèles parviennent à réaliser en comparaison des horaires manuels utilisant ce critère comme levier pour atteindre les autres objectifs.

La satisfaction des **préférences** communiquées en entrée est prise en compte par (6.1.) et enfin **les distributions des types de quarts** sont relevées dans (7.).

La liste des critères peut être enrichie lorsqu'il s'agit d'évaluer des horaires manuels. Les horaires produits par la méthode proposée sont contraints, tandis que les horaires manuels parfois présentent des entorses à des règles dans le but de parvenir à des plannings satisfaisants. La mesure de ces violations ne peut alors être présentée dans une liste standard des critères d'évaluation. Dans l'analyse des résultats au chapitre 4 nous ne manquerons pas cependant de relever les particularités que peuvent présenter les horaires manuels.

3.5 Stratégie en fonction objectif

Dans le chapitre 3, nous avons pu voir que les objectifs du problème d'horaire à HMR sont multiples. En fonction de l'instance, les optimisations sont différentes. Les échanges avec le Docteur Gagnon ont permis de prioriser les situations associées aux composantes de la fonction objectif. Toutefois, cet ordre étant défini il faut ajuster les poids afin que les deux modèles s'associant pour créer l'horaire réagissent conformément aux attentes.

Dans le but de satisfaire au maximum les différents objectifs, le choix des poids est délicat. Notre collaboration avec le directeur de l'urgence a débuté en janvier 2013 et nous avons eu l'occasion depuis d'expérimenter et comparer plusieurs horaires, permettant de relever l'importance opérationnelle des différentes optimisations. Comme mentionné plus haut, la fonction objectif est établie de manière à faire face à différentes situations. Ainsi certains termes n'agissent que lorsque les données les sollicitent. Cinq critères différents sont dans la fonction objectif, par ordre d'importance :

- la minimisation de la sous-couverture
- l'homogénéisation de la répartition des quarts
- La satisfaction des préférences
- la minimisation du recours aux fins de semaine consécutives
- l'équilibrage de la répartition des types de quarts

En effet c'est bien la couverture qui est la plus importante. Elle représente la satisfaction du département et la qualité du service rendu aux patients. Les objectifs restants sont alors secondaires

dans le sens où l'horaire est déjà fortement contraint et que les solutions obtenues sont toujours réalisables. Cependant, les quatre derniers critères créent une équité au sein de l'équipe. Cette équité est essentielle au bien-être du personnel afin que HMR assure une stabilité de ses équipes, contribuant à la qualité des services.

Pour être capable de fournir une analyse pertinente il est essentiel que les différents ensembles de poids proposés soient exposés aux deux situations opposées qui sont la pénurie de main d'œuvre et son excès. Dans le chapitre suivant, différents jeux de poids vont ainsi être mis à l'épreuve sur les deux situations opposées dans le but d'ajuster les poids relatifs entre les différents objectifs.

CHAPITRE 4 EXPÉRIMENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

Les premières modélisations, ont été créées sous l'environnement de modélisation AIMMS offrant l'accès à plusieurs solveurs et différents modes de résolution. L'affinage du modèle a alors été entièrement fait en utilisant CPLEX v12.4. Dans l'objectif d'un transfert à HMR et confortés par la littérature, notre choix s'est porté sur le solveur libre CBC. L'objectif de la première section de ce chapitre est de rendre compte de la nécessité de la découpe, mais également de vérifier qu'elle n'impacte pas la qualité des horaires produits, en comparant les résultats des deux méthodes sur deux instances différentes. La suite du chapitre a pour but de mesurer la qualité des réponses fournies par la résolution par MIP du problème des urgences de HMR. En premier lieu, la variété des instances et objectifs nécessitant la conciliation de plusieurs objectifs, une sélection des poids est faite. Ensuite nous présenterons les performances de résolutions du modèle final en deux étapes. Puis enfin, sur deux instances du problème, nous comparerons les plannings produits par le Docteur Gagnon à ceux fournis par CBC et mesurerons leur qualité.

4.1 Analyse préliminaire de la découpe

L'objectif de la section 4.1 est dans un premier temps d'exposer le changement de performances dû au transfert sur solveur libre et la nécessité de la méthode de résolution en deux phases, puis dans un second temps d'évaluer l'impact sur la qualité des solutions du passage à la méthode en deux phases.

4.1.1 Comparaison sur CPLEX et CBC de l'approche globale et de l'approche en deux phases

Le tableau 4.1 donne les ordres de grandeur des caractéristiques de résolution. La comparaison a été faite entre l'approche globale et les deux phases de l'approche scindée par moyenne sur cinq instances (mai, juin, juillet, novembre et décembre 2013) sous AIMMS avec CPLEX v12.4 et CBC v2.7 comme solveurs. Les modèles utilisés au moment de l'évaluation de l'alternative d'un modèle à deux phases, sont moins aboutis que ceux présentés dans le chapitre 2. L'avancement du projet nous a amenés à inclure de plus en plus de détails et spécificités pour aboutir à la version finale que dans les versions mises à l'épreuve dans cette sous-section.

Tableau 4.1 : Comparaison des performances de résolution entre CPLEX et CBC sous AIMMS

Modèle :	***Complet***		***Partie 1***		***Partie 2***	
Solveur :	***CPLEX***	***CBC***	***CPLEX***	***CBC***	***CPLEX***	***CBC***
Dimension du problème : - Contraintes - Variables	~ 27500 ~ 14100		~ 14100 ~ 5700		~ 18750 ~ 12600	
1ière solution : - Temps - GAP	23 s. 5,4 %	N/A	11 s. 19,5 %	57 s. 19,8 %	1 s. 0.05 %	1 s. 0,32%
1ière solution acceptable : - Temps - GAP	83 s. 0.3 %	N/A	15 s. 1 %	120 s. 3 %	1 s. 0.05 %	1 s. 0.3 %
CPU / GAP final	116 s. optimal	N/A	19 s. optimal	690 s. optimal	19 s. optimal	22 s. 0.01%

Dans un premier temps, les résultats obtenus avec CPLEX satisfaisaient les attentes du projet, à savoir, résoudre l'horaire mathématiquement en quelques minutes après insertion des données. En moins de cinq minutes CPLEX a pu sur les différentes instances, atteindre l'optimum avec la modélisation globale sur *Intel Core i5-450M 2,40 GHz*. En prévision d'un transfert, le modèle a alors été soumis toujours via AIMMS à CBC, solveur libre privilégié pour le transfert grâce au transfert technologique réussi par Brazeau [15] à l'aide de CyLP et ses performances parmi les solveurs libres (Meindl and Templ [17]). La complexité du problème a été insurmontable pour CBC avec la modélisation globale. Premièrement le fonctionnement de AIMMS avec CBC est bien plus laborieux, ne serait-ce que pour le prétraitement. Au final, sur le modèle complet, dans des temps inférieurs à une heure CBC n'atteint pas de solution quelle qu'en soit la qualité. L'alternative de proposer une solution non libre de droit à HMR n'était pas envisageable en considérant les coûts des licences permettant l'accès à des performances suffisantes.

Ce constat justifie la décomposition du problème en deux parties. Sous AIMMS il a alors été possible de faire la découpe en utilisant en bonne partie la modélisation complète pour pouvoir effectuer des premiers tests et savoir si l'effort de transfert sous CBC serait rentable.

Avec la découpe, la première partie comporte beaucoup moins de variables, les affectations sont seulement faites sur les périodes de la journée et non plus sur les postes, par jour et par personne, cinq affections sont possibles contre quinze auparavant. Ainsi, CBC parvient à résoudre le problème et CPLEX devient également très performant. La deuxième partie elle, est facilement solvable à l'optimum par CPLEX et pas systématiquement par CBC. Sur certains cas, l'optimum peut être trouvé, mais en majorité il ne l'est pas en deuxième partie. En effet, de manière très concrète, la deuxième partie consiste à trouver la meilleure combinaison de postes attribuables compte tenu des choix de la première partie. Le nombre de variables est de nouveau très important, mais l'obtention d'une solution est en revanche très facile même pour CBC. L'obtention de l'optimal en deuxième partie est bien moins important qu'en première partie. Un écart inférieur à 1% est tout à fait satisfaisant. A l'œil nu, il est impossible même pour le planificateur de faire la différence entre la solution optimale et une comportant un écart faible.

En conclusion, le passage à une méthode en deux phases a laissé penser que CBC était tout à fait capable de résoudre notre problème dans l'échelle de temps souhaitée déjà sous AIMMS, ce qui a permis d'envisager un transfert technologique. CBC via AIMMS ne fonctionne pas aussi bien qu'il peut le faire sans l'emploi d'un environnement graphique de modélisation lourd. Towhidi et Orban [18] ont créé CyLP, un outil facilitant la création de modèles et leurs résolutions sous CBC via Python. L'implantation du modèle par CyLP laissait donc entrevoir encore de meilleurs résultats.

4.1.2 Analyse de l'impact de la découpe sur la qualité des horaires

Dans cette sous partie, nous comparons sur les instances de novembre et décembre 2013 les réponses du modèle global à la modélisation en deux phases. Le but est d'analyser l'impact potentiel de la découpe sur les solutions.

Pour chaque instance, le modèle global et le modèle en deux phases sont utilisés via AIMMS avec comme solveur CPLEX v12.4 avec comme processeur un *Intel Core i5-450M 2,40 GHz*. Les tableaux 4.2 et 4.3 présentent respectivement les comparaisons des deux modélisations sur les instances de novembre et décembre 2013. Les deux instances ont été choisies pour leur caractérisation des deux situations complexes auquel le planificateur doit faire face, c'est à dire la pénurie et l'excès de main d'œuvre.

Tableau 4.2: Comparaison de résolution une et deux phases sur le mois de novembre 2013

Critères / Horaire produit :	Une phase	Deux phases
1. Critères de sous-couverture		
1.1. Sous-couverture totale	2 en jour 0 forcées	2 en jour 0 forcées
2. Répartition de l'excès de main d'œuvre		
2.1. Nombre de médecins ayant des quarts demandés non travaillés	14	**15**
2.2. Déficits majeurs de quarts par médecin	3	**2**
3. Critères d'isolation des quarts		
3.1. Nombre de quarts isolés pour les médecins à temps plein	6	**5**
3.2. Nombre maximum de quarts isolés par médecin à temps plein	1	1
4. Fins de semaine consécutives		
4.1. Nombre de fins de semaine consécutives	0	**1**
5. Ratio quarts de soir / quarts de jour		
5.1. Plus grande différence soirs – jours pour les médecins à temps plein	5	**4**
6. Préférences		
6.1. Nombre de préférences respectées	18 sur 18	18 sur 18
7. Répartition des types d'affectation (minimum/moyenne/maximum)		
7.1. ratio UHB/nombre de quarts souhaités	0 / 0,187 / 0,543	0 / 0,171 / 0,503
7.3. ratio ambulance/nombre de quarts souhaités	0 / 0,163 / 0,256	0 / 0,148 / 0,198
7.3. ratio OR/nombre de quarts souhaités	0 / 0,101 / 0,245	0 / 0,098 / 0,183
7.4. ratio observation, salle fauteuil et cabine/nombre de quarts souhaités	0,082 / 0,585 / 0,804	0,146 / 0,563 / 0,784

Le mois de novembre correspond au cas d'excès de main d'œuvre. Sur l'objectif principal qui est l'homogénéisation de la distribution des quarts, le modèle à deux phases donne une solution légèrement plus satisfaisante avec un déficit sur les quarts demandés partagé entre 15 médecins et avec un déficit maximum de 2. La modélisation en une phase elle, distribue le déficit sur 14 médecins avec un maximum plus élevé à 3 quarts.

Pour les critères ergonomiques, la modélisation à deux phases compte l'attribution d'un weekend consécutif contre zéro pour la modélisation à une phase. À ce stade du développement du modèle, la gestion de la distribution quarts de jour versus quarts de soir était gérée comme optimisation en fonction objectif. Le maximum de la différence entre nombre de quarts de soir et nombre de quarts de jour par médecin était minimisé en fonction objectif. Ainsi, le modèle à deux phases donne une différence maximum de 5 contre une différence maximum de 4 pour le modèle à une phase.

Tableau 4.3: Comparaison de résolution une et deux phases sur le mois de décembre 2013

Critères / Horaire produit :	Une phase	Deux phases
1. Critères de sous-couverture		
1.1. Sous-couverture totale	34	34
1.2. Quarts distribués	321	321
1.3. Sous-couvertures de fin de semaine	0	0
1.4. Répartition des sous-couvertures Jour/Soir	13 / 20	**15 / 19**
1.5. Sous-couvertures majeures	deux de 6	**Trois de 4 et un de 5**
1.6. Sous-couverture de nuit	1	0
1.7. Répartition globale de la sous-couverture	Concentrée sur la semaine critique	Concentrée sur la semaine critique
2. Répartition de l'excès de main d'œuvre		
2.1. Nombre de médecins ayant des quarts demandés non travaillés	0	0
2.2. Déficits majeurs de quarts par médecin	0	0
3. Critères d'isolation des quarts		
3.1. Nombre de quarts isolés pour les médecins à temps plein	**3**	4
3.2. Nombre maximum de quarts isolés par médecin à temps plein	**1**	1
4. Fins de semaine consécutives		
4.1. Nombre de fins de semaine consécutives	0	0
5. Ratio quarts de soir / quarts de jour		
5.1. Plus grande différence soirs – jours pour les médecins à temps plein	4	4
6. Préférences		
6.1. Nombre de préférences respectées	13 sur 13	13 sur 13
7. Répartition des types d'affectation (minimum/moyenne/maximum)		
7.1. ratio UHB/nombre de quarts souhaités	0 / 0,02 / 0,081	0 / 0,03 / 0,079
7.3. ratio ambulance/nombre de quarts souhaités	0 / 0,187/ 0,525	0 / 0,162 / 0,463
7.3. ratio OR/nombre de quarts souhaités	0 / 0,119 / 0,242	0 / 0,156 / 0,218
7.4. ratio observation, salle fauteuil et cabine/nombre de quarts souhaités	0,175 / 0,539 / 0,825	0,297 / 0,608 / 0,912

Pour le mois de décembre, les réponses des deux modélisations sont extrêmement proches. La modélisation à deux phases améliore la gestion de la sous-couverture par rapport à la modélisation à une phase en ne sous-couvrant aucune nuit et donnant une sous-couverture journalière maximum de 5 quarts à une seule reprise.

Les deux comparaisons ci-dessus permettent de voir que la modélisation en deux phases n'affecte pas la qualité des solutions par rapport à la modélisation globale, il n'y a pas de pertes véritablement mesurables liées à la découpe du problème.

Pour la suite, l'ensemble des résultats qui vont être présentés jusqu'à la fin du mémoire sont issus de la méthode en deux phases, résolus par CBC v2.8 via l'utilisation de l'interface CyLP avec comme processeur un *Intel Core i5-450M 2,40 GHz.*

4.2 Détermination des poids

Description des jeux de poids :

Des ensembles de poids sont construits et soumis à une situation de sous-couverture (données de décembre 2013) et à une situation d'excès de main d'œuvre (données de novembre 2013), afin d'évaluer les actions des différentes composantes de la fonction objectif. La figure 4-1 présente les liens entre les différents ensembles exposés à de la sous-couverture et la figure 4-2 traite ceux soumis à l'excès de main d'œuvre.

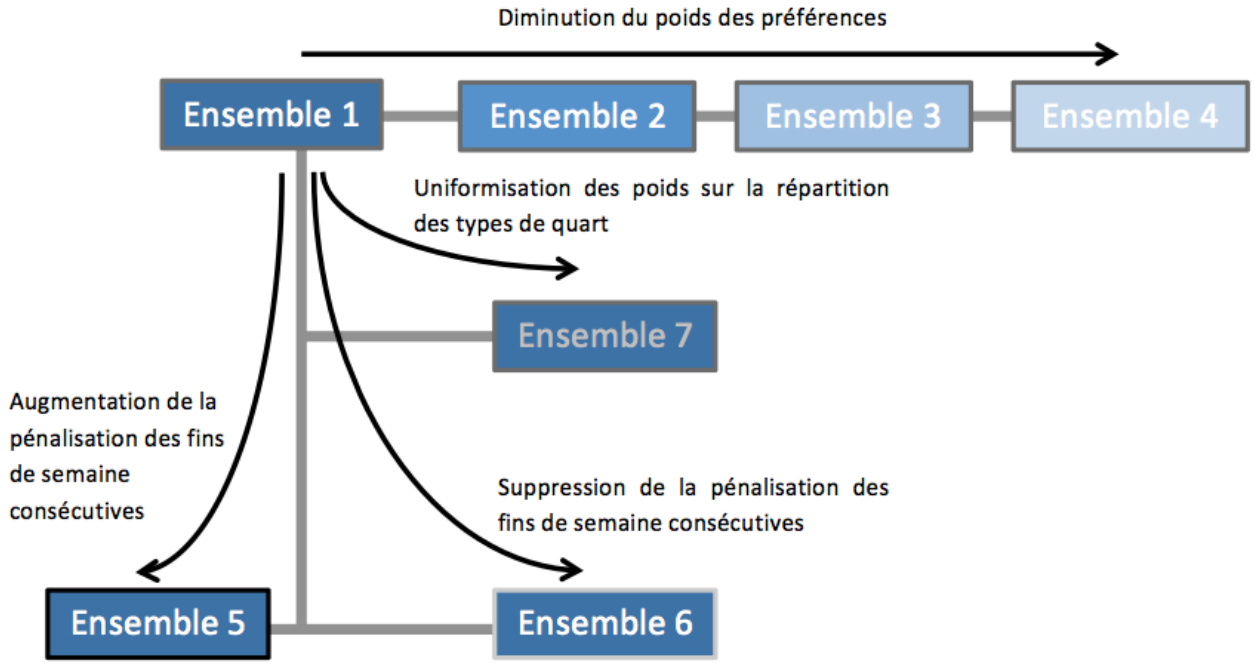

Figure 4-1: Ensembles de poids soumis à de la sous-couverture (décembre 2013)

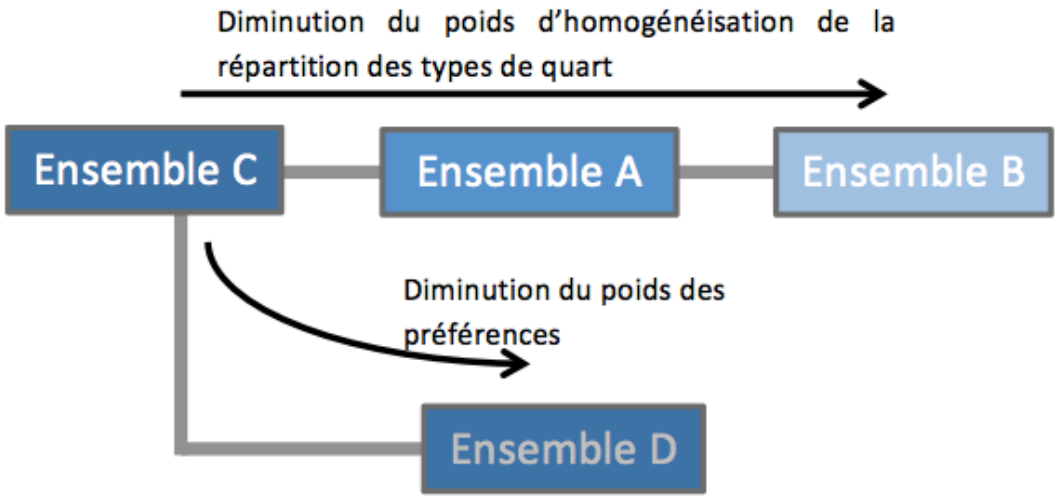

Figure 4-2: Ensembles de poids soumis à de l'excès de main d'œuvre (novembre 2013)

Le point fixe des différentes paramétrisations présentées dans le tableau 4.4 est la pénalisation de la sous-couverture. Dans la première étape, ces poids restent fixes avec des valeurs relatives empêchant la sous-couverture surtout la nuit et les fins de semaine. En phase 2, le respect des préférences est très élevé comparativement au reste des poids. En effet, c'est à la phase 1 réellement que la décision de satisfaire une préférence est majoritairement prise; en phase 2, seule la préférence en affectation est discutée et la choisir est alors important pour respecter le souhait, et n'a pas de raison d'interférer de manière significative avec l'équilibrage des types d'affectation. C'est pourquoi, en phase 2 le poids est élevé car il est considéré qu'il n'y a plus vraiment de raison de se priver de la satisfaction de cette préférence.

Tableau 4.4: Jeux de poids

Coefficients étape 1	***1***	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***	***7***	***A***	***B***	***C***	***D***
$\sigma_{Couv,k}, k \in K_{j1}$, couverture des quarts de jour	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
$\sigma_{Couv,k}, k \in K_{j2}$, couverture des quarts de jour de type 2	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
$\sigma_{Couv,k}, k \in K_{s1}$, couverture des quarts de soir	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
$\sigma_{Couv,k}, k \in K_{s2}$, couverture des quarts de soir tardifs	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
$\sigma_{Couv,k}, k \in K_{n}$, couverture des quarts de nuit	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
σ_{CouvWE}, couverture des quarts de fin de semaine	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
$\sigma_{NbShift}$, distribution homogène des quarts	10	10	10	10	10	10	10	10	0	50	50
σ_{CWE}, pénalisation des fins de semaine consécutives	1	1	1	1	20	0	1	1	1	1	1
$\sigma_{Favoris_j}, j \in J_s$, satisfaction des préférences de fin de semaine	90	18	4	0	18	18	18	18	18	18	4
$\sigma_{Favoris_j}, j \in J \setminus J_s$, satisfaction des préférences en semaine	40	8	2	0	8	8	8	8	8	8	2
Coefficients étape 2	***1***	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***	***7***	***A***	***B***	***C***	***D***
$\sigma_{Favoris}$, satisfaction des préférences	50	50	50	0	50	50	50	50	50	50	50
σ_{OR}, homogénéisation de la répartition des affectations	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2
σ_{Amb}, homogénéisation de la répartition des affectations	4	4	4	4	4	4	1	4	4	4	4
$\sigma_{O,SF,C}$, homogénéisation de la répartition des affectations	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
σ_{U}, homogénéisation de la répartition des affectations	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Onze instances sont donc résolues pour déterminer les poids en fonction objectif. Les ensembles de poids 1 à 7 sont instanciés avec les données du mois de décembre 2013, les ensembles A à D avec les données du mois de novembre 2013. Afin de comparer les résultats sur les horaires en fonction des ensembles de poids de manière synthétique et objective, les critères ne présentant pas d'intérêts, soit par ce qu'ils ne sont utiles que lorsqu'ils s'adressent à des plannings manuels, soit

parce qu'aucune variation suivant les ensembles de poids était significative, ont été ôtés de la comparaison.

Tableau 4.5: Résultats en fonction des poids sur les mois de novembre et décembre 2013

Critères / Jeux de poids	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**A**	**B**	**C**	**D**
1. Critères de sous-couverture											
1.1. Sous-couverture totale	27	27	27	27	27	27	27	0	0	0	0
1.2. Quarts distribués	328	328	328	328	328	328	328	355	355	355	355
1.3. Sous-couvertures de fin de semaine	0	0	0	0	**2**	0	0	0	0	0	0
2. Répartition de l'excès de main d'œuvre											
2.2. Déficits majeurs de quarts par médecin	0	0	0	0	0	0	0	2	**3**	1	1
3. Critères d'isolation des quarts											
3.1. Nombre de quarts isolés pour les médecins à temps plein	**12**	10	9	**12**	**12**	**12**	10	**14**	13	12	13
4. Fins de semaine consécutives											
4.1. Nombre de fins de semaine consécutives	1	1	1	0	0	**5**	1	**2**	1	1	**2**
6. Préférences											
6.1. Pourcentage de préférences respectées	100%	100%	100%	**15%**	100%	100%	100%	96%	92%	92%	92%
7. Répartition des types d'affectation (minimum/moyenne/maximum)											
7.1. ratio UHB/nombre de quarts souhaités	0 0,003 0,083	0 0,003 0,083	0 0,003 0,083	**0** **0,044** **0,182**	0 0,003 0,083	0 0,003 0,083	0 0,003 0,083	0 0,044 0,462	0 0,041 0,385	0 0,044 0,462	0 0,041 0,385
7.3. ratio ambulance/nombre de quarts souhaités	0 0,142 0,273	0 0,131 0,222	0 0,142 0,222	0 0,119 0,2	0 0,137 0,182	0 0,129 0,2	0 0,134 0,222	0 0,141 0,2	0 0,136 0,2	0 0,131 0,2	0 0,143 0,2
7.3. ratio OR/nombre de quarts souhaités	0 0,063 0,143	0 0,055 0,143	0 0,068 0,167	0 0,059 0,143	0 0,044 0,1	0 0,055 0,143	0 0,052 0,143	0 0,052 0,118	0 0,051 0,143	0 0,061 0,143	0 0,064 0,143
7.4. ratio observation, salle fauteuil et cabine/nombre de quarts souhaités	0 0,515 0,818	0 0,518 0,778	0 0,491 0,818	0 0,518 0,889	0 0,519 0,8	0 0,517 0,8	0 0,515 0,8	0 0,485 0,714	0 0,493 0,75	0 0,483 0,786	0 0,474 0,714

Influences sur les solutions :

Minimisation de la sous-couverture : Dans les diverses propositions, une seule a détérioré la sous-couverture. En pénalisant très fortement les fins de semaine consécutives, dans le cas de pénurie, un weekend a dû être sous-couvert, dégradant ainsi la solution. En revanche, lorsque la quantité de travail offerte est insuffisante, l'importance donnée à la bonne distribution des quarts se vérifie: la pleine capacité de travail des médecins est exploitée en cas de pénurie, et en cas d'excès tous les quarts sont biens distribués. C'est l'objectif majeur dans l'optimisation du planning, distribuer les quarts malgré la multitude de contraintes. Sa place est donc normalement prépondérante.

Homogénéisation de la répartition des quarts : en cas d'excès de main d'œuvre, le souhait du Docteur Gagnon est que le manque de quarts par rapport aux demandes personnelles soit réparti sur l'ensemble du groupe. Les cas A, B et C montrent qu'avec un poids suffisant, le nombre maximum de quart manquant par médecin peut descendre jusqu'à 1 dans le cas présent au lieu de 2 avec un poids plus faible. Le transfert s'est effectué sur la satisfaction des préférences. Il est important de noter que ce critère a une forte influence dans le sens où dès que la valeur augmente d'une unité, chaque médecin peut voir son nombre de quarts manquants maximum augmenter d'une unité. Atteindre un maximum de 1 signifie avoir atteint une très bonne répartition du manque de travail. Le nombre de quarts sacrifié par médecin ne pouvant être qu'un nombre entier, si un médecin doit aider le groupe en sacrifiant une partie de ses quarts, alors il en donnera un maximum de 1, ce qui est aussi le sacrifice minimum pouvant être demandé.

Minimisation du recours aux fins de semaine consécutives : sans l'optimisation des préférences, il est possible de ne pas attribuer de fins de semaines consécutives. De même, avec un poids élevé, c'est au détriment d'une sous-couverture de weekend que cela est possible. Cette règle ergonomique forte doit donc bien être relaxée pour que l'objectif principal soit rempli.

Equilibrage de la répartition des types de quarts : les différents objectifs de cette composante sont totalement complémentaires, c'est en optimisant l'ensemble de ces critères que chacun pourra être le meilleur. De la même manière, il est possible de vérifier que l'équilibrage semble indépendant du reste des objectifs. Ainsi il est difficile de mesurer des variations à la fois causées par les changements des autres poids et des poids entre types de quarts. L'optimisation n'est pas gênée par les autres objectifs. Dès le début du développement du modèle, l'optimisation réalisée sur l'équilibrage des affectations a été très satisfaisante du point de vue du planificateur. La distribution des types d'affectation est bien la partie simple à résoudre du problème.

Satisfaction des préférences : il est possible de constater que la satisfaction des préférences peut en grande partie être effectuée sans compromettre fortement les autres objectifs. Les poids mêmes les plus faibles suffisent à obtenir une satisfaction de quasiment 100% des préférences.

Bilan et choix final :

À l'issue des différents essais et échanges avec le planificateur, les poids conservés sont présentés dans le 4.6, ils correspondent aux poids de l'ensemble D. La qualité des solutions n'est pas très

sensible aux petites variations des poids. Les plannings les plus courants ne présentant pas de pénurie ont l'avantage de permettre une optimisation simultanée de tous les critères, dans ces cas les poids ont une faible influence. Dans les cas de pénurie de main d'œuvre, l'optimisation d'objectifs secondaires peut être faite au détriment de la couverture, c'est pour se protéger de ces situations que le paramétrage est ainsi établi.

Tableau 4.6: Poids conservés – Ensemble D

Coefficients étape 1	
$\sigma_{NbShift}$, distribution homogène des quarts	50
$\sigma_{Couv,k}, k \in K_n$, couverture des quarts de nuit	20
$\sigma_{Couv,k}, k \in K_{s2}$, couverture des quarts de soir tardifs	18
$\sigma_{Couv,k}, k \in K_{s1}$, couverture des quarts de soir	15
$\sigma_{Couv,k}, k \in K_{j1}$, couverture des quarts de jour	12
$\sigma_{Couv,k}, k \in K_{j2}$, couverture des quarts de jour de type 2	12
σ_{CouvWE}, couverture des quarts de fin de semaine	4
$\sigma_{Favoris_j}, j \in J_s$, satisfaction des préférences de fin de semaine	4
$\sigma_{Favoris_j}, j \in J \setminus J_s$, satisfaction des préférences en semaine	2
σ_{CWE}, pénalisation des fins de semaine consécutives	1
Coefficients étape 2	
$\sigma_{Favoris}$, satisfaction des préférences	50
σ_{Amb}, homogénéisation de la répartition des types d'affectation	4
σ_{OR}, homogénéisation de la répartition des types d'affectation	2
$\sigma_{O,SF,C}$, homogénéisation de la répartition des types d'affectation	1
σ_U, homogénéisation de la répartition des types d'affectation	1

4.3 Performances de résolution

Le tableau 4.7 présente les performances de résolution de quatre instances différentes (septembre, octobre, novembre et décembre de l'année 2013). Sur les quatre périodes, le nombre de variables déclarées est resté le même, puisque la taille de l'équipe et la longueur de la période considérée sont restées inchangées. Le nombre de contraintes lui varie avec notamment le nombre de préférences ou bien les caractéristiques des médecins spécialisés.

La résolution en deux étapes permet pour la première partie de diviser par deux le nombre de variables et quasiment par trois celui de contraintes par rapport à la modélisation globale. La deuxième partie elle, retrouve un nombre de variables élevé, mais en réalité, le problème est très

contraint, la phase de prétraitement du problème opéré par CBC divise le nombre de variables par plus de dix.

Les résultats présentés ci-dessous ont été produits en paramétrant les critères d'arrêt de la manière suivante : aucun critère d'arrêt concernant les GAPs et des temps maximums de résolution respectivement de 1500 et 1000 secondes pour les étapes une et deux. Configuré ainsi, l'outil dispose du temps nécessaire à l'obtention de l'optimum, excepté en deuxième étape où dépendamment des instances, la recherche peut être très longue.

Ainsi, dans cette configuration, les temps totaux de production d'un horaire oscillent entre 12 et 26 minutes. Avec un seuil de tolérance sur les GAPs, la même qualité de solution pour le planificateur peut être atteinte sans dépasser les 15 minutes. Dans la durée de production, il faut noter la forte présence du temps de création du modèle. Avant de résoudre chaque problème linéaire, CBC a besoin de lire les données et de déclarer ses contraintes et variables en conséquence. La partie lecture des données ne présente pas de difficultés. En revanche, la génération des modèles par CyLP dans l'ensemble des cas atteint près de 9 minutes. La syntaxe fournie par CyLP donne accès à différentes manières de créer des groupes de contraintes. Cependant, certaines contraintes et structures d'ensembles empêchent d'optimiser les temps d'accès mémoire.

La première étape, la plus difficile à résoudre, a beaucoup à gagner à atteindre l'optimum, c'est ici qu'est déterminée la quasi-totalité de la qualité du planning. En quelques minutes, CBC y parvient sur les quatre instances. La seconde étape elle, se résout instantanément, mais en revanche, la preuve d'optimalité prend plus de temps. Les GAPs atteints au bout de quelques secondes sont cependant largement satisfaisants. L'amélioration de millièmes sur les ratios en objectif est totalement invisible pour n'importe quel lecteur du planning. La configuration classique de CBC arrête alors la résolution au bout de quelques secondes lorsqu'un GAP de l'ordre de 0,01% est atteint.

Tableau 4.7: Performances sous CBC via CyLP sur les mois de septembre à décembre 2013

Première étape *Modèle formel*	**Septembre**	**Octobre**	**Novembre**	**Décembre**
Nombre de variables	5424	5424	5424	5424
Nombre de contraintes	10863	10799	10841	10781
Nombre d'éléments non nuls	105396	104440	105204	104244
Modèle pré résolu				
Nombre de variables	2445	2455	2412	2198
Nombre de contraintes	5028	4891	4952	4454
Nombre d'éléments non nuls	47092	46614	46864	39744
Première solution: temps (sec.)	49	79	113	35
Première solution: GAP (%)	0,0002	Optimale	Optimale	Optimale
Solution finale: temps (sec.)	132	79	135	35
Solution finale: GAP (%)	Optimale	Optimale	Optimale	Optimale
Temps total de calcul (sec.)	132	79	135	35
Deuxième étape *Modèle formel*	**Septembre**	**Octobre**	**Novembre**	**Décembre**
Nombre de variables	12621	12621	12621	12621
Nombre de contraintes	18078	18088	18086	18080
Nombre d'éléments non nuls	49439	49988	49642	49565
Modèle pré résolu				
Nombre de variables	1122	766	1135	990
Nombre de contraintes	664	518	660	613
Nombre d'éléments non nuls	3570	2510	3595	984
Première solution: temps (ec.)	1,7	2,4	3,5	1,5
Première solution: GAP (%)	0,0088	0,0048	0,0044	0,0006
Solution finale: temps (sec.)	9,3	39	8,8	431
Solution finale: GAP (%)	0,001	Optimale	0,0043	Optimale
Temps total de calcul (sec.)	1000	58	1000	431
Temps de calcul (sec.)	1132	137	1135	466
Temps d'acquisition (sec.)	536	539	554	535
Temps total de résolution (sec.)	1668	676	1689	1001

Au final, la production d’un planning de qualité nécessite moins de 15 minutes de temps de calcul. Lorsque le Docteur Gagnon résout manuellement un horaire, il y consacre plus de douze heures de

travail. Ces douze heures de travail ne créent pas de valeur ajoutée pour le département d'urgence de HMR. Il est à noter que les dimensions des instances du problème de HMR (produit du nombre de médecins, nombre de journées et nombre d'affectations journalières) sont plus grandes ou comparables à l'ensemble des cas similaires traités dans la littérature. La méthode développée dans ce mémoire permet une résolution en 1 heure en comprenant 45 minutes de traitement des données en entrée et en sortie. En plus de proposer des plannings de qualité au moins aussi bons que les manuels, le plus gros avantage de la méthode est le gain de temps réalisé, ce qui est la première préoccupation du Docteur Gagnon.

4.4 Comparaison planification manuelle vs MIP

Dans cette partie nous allons analyser en détail les résultats obtenus par la méthode en deux étapes transférée au Docteur Gagnon sur deux instances. Les deux instances résolues à la fois par le solveur CBC et par le planificateur correspondent aux deux situations opposées que sont la pénurie de main d'œuvre et son excès. Ces instances correspondent au mois de novembre 2013 (pour l'excès de main d'œuvre) et au mois de décembre (pour la pénurie). À titre d'illustration, l'horaire du mois de décembre résolu par CBC est affiché en annexe A.

4.4.1 Cas de pénurie de main d'œuvre

Le planning incluant à la fois Noël et le jour de l'an, est le meilleur exemple de pénurie de main d'œuvre au cours de l'année, les disponibilités y sont très serrées.

Le tableau 4.8 rassemble les différents indicateurs permettant de comparer la version confectionnée manuellement à celle obtenue par la résolution du modèle par CBC selon les critères définis précédemment.

Gestion de la sous-couverture : pour ce mois de décembre, l'ensemble de la capacité de travail a été utilisée. La résolution par CBC a totalement utilisé les nombres d'affectations données par le Docteur Gagnon à chaque membre de son équipe comme paramètres. Plus de trente sous-couvertures ont été utilisées dans les deux plannings (critère 1.1), la capacité de travail étant insuffisante. Usuellement les vendredis disposent d'un quart de soir en moins par rapport au reste de la semaine, le planificateur a fait le choix de les couvrir (sur-couverture) pleinement lorsque cela était possible (1.8), il en résulte une sous-couverture plus haute de deux quarts par rapport au

planning généré par CBC. La sous-couverture totale a en revanche été placée différemment (1.6). Le Docteur Gagnon l'a concentrée sur les deux semaines critiques, et a épargné le reste du mois. Le modèle a été contraint également de sous-couvrir intensément la semaine de Noël, mais pour le reste, la sous-couverture a été homogénéisée. De ce fait les sous-couvertures importantes de plus de 4 quarts apparaissent six fois pour le planning manuel contre quatre dans le planning fait par CBC (1.5). Le modèle ne contient pas d'optimisation concernant cet aspect de la sous-couverture, cette répartition a donc été choisie car elle facilitait le reste des optimisations. Le modèle pénalise plus fortement les sous-couvertures de soir que celles de jours, car elles affectent plus fortement la qualité du service. Dans cette optique le planificateur a placé plus de sous-couvertures de jour que de soir. Le modèle est paramétré pour en faire autant mais la répartition en résultant montre que ceci n'a pu être complètement effectué au détriment d'autres critères (1.4). Pour atteindre ce niveau de couverture, le Docteur Gagnon a dû enfreindre plusieurs règles que le modèle a réussi à respecter. Premièrement, il s'est lui-même attribué deux quarts le même jour un vendredi (1.7). Il effectue ainsi une journée sans interruption de 8h du matin à minuit. Le planificateur accepte exceptionnellement des horaires qu'il ne pourrait imposer à son équipe. Le modèle n'affecte évidemment pas ce type de quarts et a réussi à créer un horaire satisfaisant malgré tout. Le planificateur a dû affecter aussi des médecins durant leurs indisponibilités, cette situation s'est produit cinq fois (1.11). Les indisponibilités choisies sont alors aux extrémités des périodes d'indisponibilité.

Au final, les sous-couvertures sont assez similaires, le modèle est parvenu aux mêmes performances que le planificateur mais sans enfreindre de règles, qui sont tout de même ici importantes.

Ergonomie : c'est d'un point de vue ergonomique que le modèle se positionne sensiblement devant la planification manuelle en cas de pénurie de main d'œuvre. En effet, pour les médecins à temps plein, il est préférable de ne pas travailler de quarts isolés. Pour maintenir la couverture, le planificateur manuel a dû attribuer 36 quarts isolés à ses médecins à temps plein, dix médecins en ont plus de 2 et un en a jusqu'à 5 (3.1), (3.3) et (3.4). Manuellement il est difficile de faire concilier l'ensemble des règles. Les résultats issus de CBC arrivent à atteindre la même couverture en respectant ces règles malgré tout. Seuls 6 quarts isolés ont été distribués à des médecins à temps plein et aucun n'en a reçu plus d'un. Le modèle proscrit l'affectation de nuits isolées, alors que sur ce mois difficile à gérer, le Docteur Gagnon a dû y avoir recours (3.2). Il est considéré que deux

weekends de travail sont consécutifs si ils contiennent tout deux des quarts les samedis, les vendredis soirs seuls comptés comme weekend sont exclus de la comptabilisation. CBC a pu éviter d'en attribuer, alors que le planificateur a dû en utiliser un (4.1).

L'équilibrage entre quarts de jours et quarts de soirs est à considérer lors de la planification. Le modèle restreint le nombre de soirs à être au plus supérieur de un au nombre de quarts de jour pour les médecins à temps plein. En planification manuelle, un médecin a dû recevoir 8 quarts de soir contre 5 quarts de jour (5.1).

Préférences : les préférences entrées par le planificateur pour cette période sont les quarts d'UHB ainsi que des fins de semaine, ce qui constitue le contenu le plus fréquent des requêtes de préférences. Le processus de planification manuelle débute par l'affectation de ces préférences. Le Docteur Gagnon les respecte ainsi toutes. Dans le cas de la solution obtenue par CBC, l'ensemble des préférences demandées a pu être respecté aussi sans compromettre les autres objectifs (6.1).

Équilibrage des types d'affectation : en ce qui concerne la répartition des types d'affectation, l'homogénéisation est similaire à la répartition du Docteur Gagnon. Notons que sont comptabilisées ici les statistiques seulement pour les médecins ne présentant pas de profil particulier. C'est-à-dire qu'un médecin n'effectuant que des quarts UHB par exemple n'est comptabilisé dans aucune de ces catégories, de la même manière que les médecins à temps partiel pour lesquels optimiser ces critères n'est pas une priorité pour le service. Pour l'UHB, le Docteur Gagnon a l'habitude de distribuer ces affectations par blocs. Ces blocs sont ainsi insérés comme préférences.

Tableau 4.8: Comparaison planification manuelle et MIP sur le mois de décembre 2013

Critères / Horaire produit :	Manuellement	Par MIP
1. Critères de sous-couverture		
1.1. Sous-couverture totale	36	**34**
1.2. Quarts distribués	320	320
1.3. Sous-couvertures de fin de semaine	1	**0**
1.4. Répartition des sous-couvertures Jour/Soir	**23/13**	19/15
1.5. Sous-couvertures majeures	5 trois journées et 4 trois journées	**5 une journée et 4 trois journées**
1.6. Répartition globale des sous-couvertures	Concentrées sur deux semaines seules	**Une semaine concentrée et le reste homogénéisé**
1.7. Utilisation de deux quarts par jour	Le vendredi de Noël, le planificateur effectue un soir à la suite d'un jour	**0 car contraint**
1.8. Sur couverture	2 sur deux vendredi soir (choix)	**0 car contraint**
1.9. Erreurs d'affectation	2 redondances	**0**
1.10. Dépassements du nombre de quarts demandé	Non par construction	Non, capacité pleinement utilisée
1.11. Respect des disponibilités	5 quarts affectés en indisponibilité	**Oui**
2. Répartition de l'excès de main d'œuvre		
2.1. Nombre de médecins ayant des quarts demandés non travaillés	0 sur la période	0 sur la période
2.2. Déficits majeurs de quarts par médecin	0 sur la période	0 sur la période
3. Critères d'isolation des quarts		
3.1. Nombre de quarts isolés pour les médecins à temps plein	36	**6**
3.2. Nombre de nuits isolées	1	**0**
3.3. Nombre maximum de quarts isolés par médecin à temps plein	5 une fois, 4 une fois, 3 deux fois	**Maximum de 1**
3.4. Nombre de médecins à temps plein avec plus de deux quarts isolés	10	**0**
4. Fins de semaine consécutives		
4.1. Nombre de fins de semaine consécutives	1	**0**
5. Ratio quarts de soir / quarts de jour		
5.1. Plus grande différence soirs – jours pour les médecins à temps plein	Un cas avec 8 soirs pour 5 jours	**Maximum de 1**
6. Préférences		
6.1. Nombre de préférences respectées	13 énoncées et respectées par construction	13 sur 13
7. Répartition des types d'affectation (minimum/moyenne/maximum)		
7.1. ratio UHB/nombre de quarts souhaités	0 / 0,01 / 0,083	0 / 0,003 / 0,083
7.3. ratio ambulance/nombre de quarts souhaités	0 / 0,193 / 0,545	0 / 0,159 / 0,363
7.3. ratio OR/nombre de quarts souhaités	0 / 0,118 / 0,272	0 / 0,106 / 0,214
7.4. ratio observation, salle fauteuil et cabine/nombre de quarts souhaités	0,181 / 0,549 / 0,785	0,363 / 0,568 / 0,928

4.4.2 Cas d'excès de main d'œuvre

Le cas d'excès de main d'œuvre est courant. Il apparait lorsque, les médecins mettent à disposition plus de quarts que la couverture le requiert sur l'ensemble du mois. La difficulté est alors de répartir le manque de quarts adéquatement. Le cas traité est ici celui d'un mois de novembre. Le tableau 4.9 compare les résultats entre l'horaire produit manuellement par le planificateur et celui produit par CBC.

Gestion de la distribution des quarts : pour ce mois-ci la sous-couverture est donc quasi inexistante (1.1). La sous-couverture imposée par le mois précédent sur le premier jour se retrouve

automatiquement dans les deux horaires. En revanche le Docteur Gagnon a dû sous-couvrir quatre quarts supplémentaires. Pour atteindre cette couverture, le planificateur a dû dépasser 8 fois le nombre de quarts demandé par ses coéquipiers et affecter deux quarts sur des indisponibilités (1.8) et (1.9). Nous noterons que lors du troisième vendredi, le planning manuel dispose d'une sur-couverture sur le quart *22*. Il s'agit surement d'une erreur. La création automatisée dispose de l'avantage que la rigueur imposée par l'algorithme garantit qu'aucune étourderie ne peut être présente. Ces petites erreurs peuvent être sans importance, mais peuvent aussi créer des contraintes lorsqu'elles sont effectuées manuellement au début de la construction du planning et donc affecter la qualité de la solution.

Durant ce mois, l'horaire doit prendre en compte que le nombre total de quarts demandé par l'équipe est supérieur au nombre de quart requis par la couverture. Il en résulte que certains médecins auront forcément des quarts non affectés (1.2). Avec ces sous-couvertures, le planning du Docteur Gagnon a un écart encore plus grand à gérer. Pour les deux horaires, 13 médecins n'ont pas eu autant de quarts que demandés. Le planning automatique distribue mieux le déficit entre les différents membres de l'équipe en minimisant à 3 le plus grand déficit individuel contre 7 pour le planning manuel (2.2).

La qualité des données influence fortement la qualité de l'optimisation. Le Docteur Gagnon connait très bien la distribution habituelle des charges de travail. Cependant lorsque d'importants congés sont demandés, la répartition est à revoir. En prenant une semaine de congé, certains médecins souhaitent compenser leur absence en travaillant plus intensément et conservent leur nombre de quarts tandis que d'autres s'attendent à une diminution de ce nombre proportionnellement à la baisse de leur disponibilité. Le danger pour la qualité de l'optimisation se trouve lorsqu'avec la demande de congés élevée, le nombre de quarts demandé ne peut être atteint. Un médecin disponible 15 journées pourra en faire un maximum de 14 avec les limitations sur les séquences. Le modèle minimise dans la fonction objectif le déficit maximum tout en maximisant le nombre d'affectations. Ainsi un nombre de quarts trop élevé impose un déficit en quart important et incompressible sur un médecin. Et de ce fait, le modèle ne pénalisera pas les affectations créant des déficits inférieurs ou égaux au plus grand d'entre eux s'il est trop élevé. Dans les données du mois de novembre, un médecin demandait 18 quarts pour seulement 17 disponibilités. Un maximum de 15 quarts lui a été attribué. Avec un ajustement à 15 au lieu de 18, le modèle a répondu en ayant un maximum de 2 quarts non attribués par médecin améliorant ainsi le planning du second

médecin ayant un déficit de 3. Le modèle fournit donc une très bonne réponse en termes de répartition des quarts.

Ergonomie et préférences: le planning généré automatiquement présente ici encore un fort avantage sur la distribution de quarts isolés, en n'en distribuant que 14 contre 33 et de manière plus homogène (3.1), sans attribuer également de nuits isolées (par contrainte). Sur ce planning, c'est le planning réalisé par CBC qui a attribué des weekends consécutifs à 1 médecin. Ceci a été fait car cela a permis un gain non négligeable sur les autres critères en regard des poids appliqués. Pour les préférences, toutes ont été respectées. Les préférences données sont conciliables avec les autres objectifs.

Les deux comparaisons montrent que la planification automatisée dépasse la planification manuelle en termes de qualité. De plus la méthode de résolution par programmation linéaire est une optimisation exacte. En effectuant manuellement ses plannings, le Docteur Gagnon avait parfois l'impression que les sous-couvertures qu'il affectait étaient le nombre minimal pour que l'urgence puisse fonctionner. Ici, l'outil a montré qu'une meilleure couverture était possible lors du premier cas. De plus, comme nous avons utilisé une méthode exacte et que la solution obtenue est optimale, nous garantissons que la solution est la meilleure possible avec les poids utilisés.

Tableau 4.9: Comparaison planification manuelle et MIP sur le mois de novembre 2013

Critères / Horaire produit :	Manuellement	Par MIP
1. Critères de sous-couverture		
1.1. Sous-couverture totale	6 dont 2 non affecté au J-0	**2 non affectés au J-0**
1.2. Quarts distribués	Sur 372 dispos, 349	**352**
1.3. Sous-couvertures de fin de semaine	0	0
1.4. Répartition des sous-couvertures Jour/Soir	2 jours et 2 soirs plus 1 jour et 1 soir (forcés)	**1 jour et 1 soir (forcés)**
1.5. Sous-couvertures majeures	2 au jour 1 et 2 au jour 0 forcés	**2 au jour 0 forcés**
1.6. Utilisation de deux quarts par jour	Non	**Non car contrainte**
1.7. Sur couverture	1, sûrement erreur sur un 22	**0**
1.8. Dépassements du nombre de quarts demandé	8 fois, avec une fois de 2 quarts	**0 car contraint**
1.9. Respect des disponibilités	2 fois non	**0 car contrainte**
2. Répartition de l'excès de main d'œuvre		
2.1. Nombre de médecins ayant des quarts demandés non travaillés	13	13
2.2. Déficits majeurs de quarts par médecin	un de 7 quarts, deux de 4, deux de 3 et trois de deux	**deux de 3 quarts et deux de 2**
3. Critères d'isolation des quarts		
3.1. Nombre de quarts isolés pour les médecins à temps plein	33	**14**
3.2. Nombre de nuits isolées	2	**0**
3.3. Nombre maximum de quarts isolés par médecin à temps plein	6	**1**
3.4. Nombre de médecins à temps plein avec plus de deux quarts isolés	7	**0**
4. Fins de semaine consécutives		
4.1. Nombre de fins de semaine consécutives	**0**	1
5. Ratio quarts de soir / quarts de jour		
5.1. Plus grande différence soirs – jours pour les médecins à temps plein	Un cas de 6 soirs pour 4 jours et deux dépassements de un soir	**Au plus un soir de plus pour deux personnes seulement**
6. Préférences		
6.1. Nombre de préférences respectées	18 énoncées et respectées par construction	18 respectées sur 18
7. Répartition des types d'affectation (minimum/moyenne/maximum)		
7.1. ratio UHB/nombre de quarts souhaités	0 / 0,177 / 0,583	0 / 0,161 / 0,461
7.3. ratio ambulance/nombre de quarts souhaités	0 / 0,17 / 0,272	0 / 0,151 / 0,2
7.3. ratio OR/nombre de quarts souhaités	0 / 0,113 / 0,285	0 / 0,096 / 0,153
7.4. ratio observation, salle fauteuil et cabine/nombre de quarts souhaités	0,083 / 0,575 / 0,818	0,25 / 0,6 / 0,777

CHAPITRE 5 TRANSFERT

Dans ce chapitre, l'état est fait sur les technologies utilisées et les moyens mis à disposition à HMR pour résoudre l'horaire.

5.1 Technologies employées

Pour réaliser la solution complètement libre de droit, CyLP interface Python pour les solveurs du projet COIN-OR, a permis la génération du modèle et la paramétrisation du solveur. Le processus de production d'un horaire est représenté par la figure 5-1.

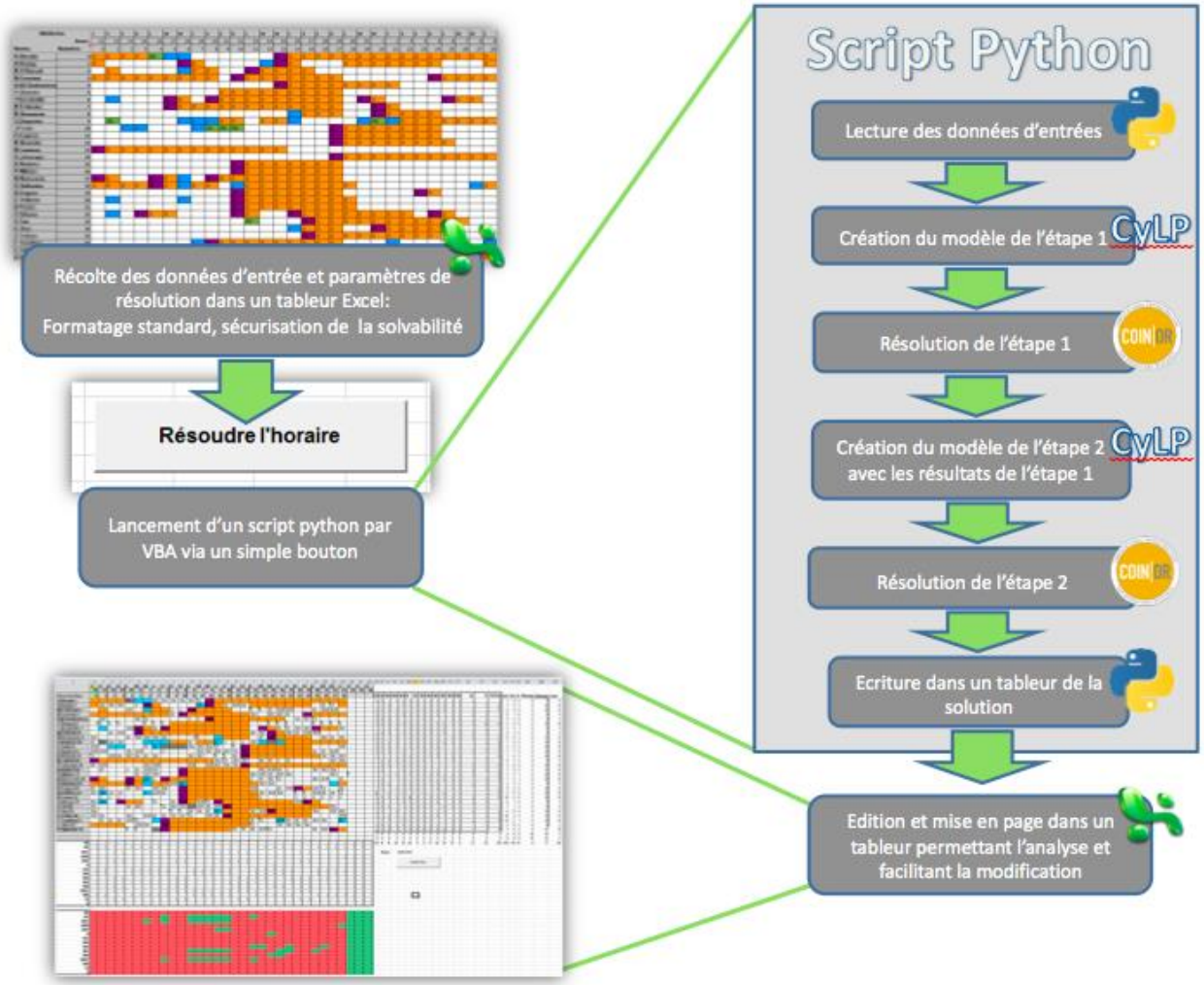

Figure 5-1: Description du processus de création d'horaire

Le processus est également détaillé ci-dessous :

- Un fichier Excel recueille et formate les données d'entrée. De cette manière, le formatage automatique protège l'intégrité des données et le bon déroulement de la résolution tout en procurant un environnement accueillant, lisible et efficace au planificateur. L'ensemble des paramètres de résolution y est également stocké.
- Depuis le fichier de données Excel, un bouton permet le lancement de la résolution en exécutant un script Python. Le script Python vient alors lire le fichier de données pour générer le premier modèle sous CyLP et lancer CBC. A la fin de la résolution de la première phase, le second modèle est généré par CyLP à partir des données déjà lues, ainsi que du résultat de la première phase, il est ensuite résolu par CBC.
- A la fin de la résolution complète, le script Python génère un second fichier Excel contenant les résultats de la résolution en affichant les résultats de chaque étape ainsi que les critères d'arrêt ayant provoqué la fin des résolutions.
- Le planificateur dispose alors de tableurs de présentation permettant la modification guidée des solutions, le résultat brut de la résolution n'a plus qu'à être copié pour finaliser sa présentation.

5.2 Implantation réelle

La solution transférée à HMR est fortement paramétrable. La création d'une instance s'ajuste à la taille de l'équipe de médecin, leurs disponibilités, leurs compétences, leurs spécialisations momentanées, leurs préférences et leur capacité de travail, mais également aux besoins du département d'urgences en définissant ses besoins quotidiens en personnel. L'hérédité entre les différents horaires est assurée en incorporant le dernier jour et la dernière fin de semaine du planning précédents. La variété des instances existantes peut ainsi être retranscrite et leur prise en compte a été pleinement considérée. Les paramètres de résolution sont aussi modifiables.

Lors de l'analyse des résultats, nous avons vu que sous CBC, les solutions optimales n'étaient pas systématiquement atteintes. L'atteinte de l'optimalité n'est pas essentielle à la production d'un bon horaire. Nous avons vu qu'en première étape, l'optimalité était facile à atteindre, et en deuxième, là où il est plus difficile d'arriver à une solution optimale, les GAPs sont toujours négligeables. De manière générale, une solution optimale est indiscernable d'une solution approchante de bonne qualité, même pour le planificateur. Pour contrôler le temps de résolution, l'outil propose alors de fixer des critères d'arrêt pour les deux phases en temps et en GAP relatif. Le paramétrage par défaut accorde respectivement à la première et seconde phase 1000 et 200 secondes de temps de résolution hors temps de création du modèle et de lecture des données, puis 0,5% et 0,3% de GAP relatif. Les

deux critères d'arrêts sont actifs simultanément. Ces paramètres fournissent de bon temps de réponse tout en satisfaisant les attentes en qualité des horaires.

Le tableur de données formatées permet la modification du nombre de médecins ainsi que de la durée de la période. Les règles établies forment des limites à la prise en compte de changements, mais les paramètres déjà en place offrent beaucoup d'adaptabilité. La liste des quarts assortis de leurs postes est fixe par exemple. Pour introduire un nouveau type de quart ou poste par exemple, le planificateur dispose cependant des couvertures. Grâce à la variété des quarts déjà existants, pour créer un nouveau poste, augmenter la couverture du poste le plus ressemblant permet une prise en compte simple et suffisamment efficace. Par ce type de modification la majeure partie des changements éventuels à moyen terme peuvent être pris en charge. De la flexibilité est donc accordée, mais d'importants changements pourraient bouleverser la dimension du problème, comme la taille de l'équipe de médecins ou l'élargissement de l'horizon.

CONCLUSION

Le projet présenté traite le double problème d'affectation de quarts et de tâches des médecins urgentistes à HMR. Jusqu'à présent l'unique solution pour le planificateur était la gestion manuelle des horaires, forçant la considération simultanée d'objectifs d'équité impliquant la répartition de nuits et fins de semaine, de satisfaction des besoins du personnel et du département, à travers une politique d'horaires complexe et chargée. La prise en compte de l'ensemble de ces aspects constitue à la fois le cahier des charges et les critères d'acception de la solution.

Développé autour d'une dizaine d'instances, la solution propose un temps de production de l'horaire mensuel d'une autre échelle. La planification manuelle nécessite chaque mois plus de douze heures de travail, tandis que la méthode proposée demande moins de 15 minutes de temps de calcul (1 heure avec l'entrée des données). Et c'est bien ce temps de production trop long qui est à l'origine du problème. Également, la résolution par programmation linéaire mixte s'est démontrée sur l'ensemble des critères de qualité d'un horaire toujours de qualité supérieure aux horaires résultant de la planification manuelle. Le modèle permet d'atteindre les mêmes objectifs que la planification manuelle sans avoir à transiger sur les règles. De plus, le processus d'optimisation étant exacte et les résolutions quasi-optimales en termes de couverture, le Docteur Gagnon est maintenant certain d'offrir le meilleur horaire (en fonction des poids) existant à son service, alors qu'il était auparavant impossible de garantir toute optimalité à travers la difficulté du processus de planification.

La conciliation des objectifs, notamment sur les situations extrêmes de pénurie de main d'œuvre et d'excès, a été assurée grâce à un établissement des poids reflétant les besoins opérationnels. La solution proposée n'utilise que des logiciels libres. Pour être capable de se priver de solveurs commerciaux, nous avons dû adapter notre approche en décomposant le processus de planification. Les performances de CBC et CPLEX ont ainsi pu être comparées sur le cas réel de HMR et prouver que malgré la grande dimension du problème, la résolution par solveur libre est possible et efficace.

Bien que la solution soit flexible et que plusieurs paramètres soient faciles à ajuster, beaucoup d'éléments du modèle demeurent non paramétrables pour l'utilisateur. Les nombreuses contraintes constituant le modèle par exemple sont inaccessibles à l'utilisateur. Ainsi, la solution offerte est valable pour la politique de planification actuelle. Un bouleversement de la gestion des fins de

semaine par exemple ne pourrait être pris en charge directement par l'utilisateur directement par exemple. C'est à ce prix que la robustesse du programme est assurée.

Le problème d'affectation de quarts à des médecins d'urgences concerne beaucoup d'établissements à l'image de HMR. Nous avons cependant souligné, que malgré la généricité du problème, la qualité de la solution réside dans l'intégration des spécificités du département. Le double problème d'affectation de quarts et de tâches des urgences de HMR lui confère une politique de planification chargée recouvrant les particularités de beaucoup d'établissements. La méthode constituant à développer un modèle linéaire optimisant le respect d'une couverture, la satisfaction des préférences et l'ergonomie est bien entendu reproductible et pourrait présenter les mêmes avantages que dans le cas de HMR. De plus, la grande variété des contraintes à HMR laisse imaginer que dans le cas de politiques de planification moins lourdes les modèles développés et les technologies employées pourraient être directement adaptés en relaxant simplement les contraintes non applicables. Le transfert à un autre établissement est bien possible et bénéficierait d'une économie de temps de développement, pour l'implantation de la même méthode de planification.

Une suite possible à ce projet serait d'intégrer le réajustement de planning. En effet, les aléas fréquents amènent régulièrement le Docteur Gagnon à faire des modifications en cours de période. Ces modifications ne sont pas prises en charge par le modèle dans son état actuel. Cependant, il serait possible de les incorporer. Une solution consisterait à partir de l'horaire existant, de relancer le modèle en définissant les intervalles de temps et les médecins à ne pas réaffecter pour pouvoir ainsi changer des disponibilités et demander une nouvelle proposition de planning.

La réussite de l'intégration d'une telle solution requiert davantage d'investissement qu'il a été possible au cours de ce projet. En effet, la gestion de la production d'un horaire par MIP et les moyens techniques sollicités pour arriver à cette fin sont accessibles pour tout étudiant en recherche opérationnelle. Cependant l'atteinte du niveau de compétence nécessaire pour la majorité du personnel hospitalier requiert un fort investissement en formation et suivi. Les disponibilités et calendriers des deux parties de ce projet ont permis le transfert d'une solution fonctionnelle utilisant des technologies et un processus définis en proche collaboration. La méthode requise pour produire un horaire satisfait la partie utilisateur avec un interfaçage simple dans son environnement informatique de travail. Et malgré l'adhésion à la méthode proposée, pour accéder à l'autonomie complète, l'accompagnement aurait dû se faire sur davantage de productions d'horaires.

LISTE DES RÉFÉRENCES

[1] M. W. Carter and S. D. Lapierre, "Scheduling Emergency Room Physicians," *Health Care Management Science,* vol. 4, pp. 347-60, Dec 2001 2001.

[2] J. Van den Bergh, J. Belien, P. De Bruecker, E. Demeulemeester, and L. De Boeck, "Personnel scheduling: A literature review," *European Journal of Operational Research,* vol. 226, pp. 367-385, May 2013.

[3] M. Gendreau, J. Ferland, B. Gendron, N. Hail, B. Jaumard, S. Lapierre, G. Pesant, and P. Soriano, "Physician scheduling in emergency rooms," presented at the Proceedings of the 6th international conference on Practice and theory of automated timetabling VI, Brno, Czech Republic, 2007.

[4] A. Gunawan and H. C. Lau, "Master physician scheduling problem," *Journal of the Operational Research Society,* vol. 64, pp. 410-425, 2013.

[5] L. Chih-Chung and L. Tung-Han, "A Particle Swarm Optimization approach for physician scheduling in a hospital emergency department," in *Natural Computation (ICNC), 2011 Seventh International Conference on*, 2011, pp. 1929-1933.

[6] E. K. Burke, P. De Causmaecker, B. Greet Vanden, and L. Hendrik Van, "The State of the Art of Nurse Rostering," *Journal of Scheduling,* vol. 7, pp. 441-499, Nov 2004 2004.

[7] E. K. Burke, P. D. Causmaecker, S. Petrovic, and G. V. Berghe, "A multi criteria meta-heuristic approach to nurse rostering," presented at the Proceedings of the Evolutionary Computation on 2002. CEC '02. Proceedings of the 2002 Congress - Volume 02, 2002.

[8] L.-M. Rousseau, M. Gendreau, and G. Pesant, "A General Approach to the Physician Rostering Problems," *Annals of Operations Research,* vol. 115, pp. 193-205, 2002.

[9] H. Beaulieu, J. A. Ferland, B. Gendron, and P. Michelon, "A mathematical programming approach for scheduling physicians in the emergency room," *Health Care Management Science,* vol. 3, pp. 193-200, 2000 2000.

[10] J. Puente, A. Gómez, I. Fernández, and P. Priore, "Medical doctor rostering problem in a hospital emergency department by means of genetic algorithms," *Computers & Industrial Engineering,* vol. 56, p. 1232, May 2009 2009.

[11] F. Glover and C. McMillan, "The general employee scheduling problem: an integration of MS and AI," *Comput. Oper. Res.,* vol. 13, pp. 563-573, 1986.

[12] A. T. Ernst, H. Jiang, M. Krishnamoorthy, and D. Sier, "Staff scheduling and rostering: A review of applications, methods and models," *European Journal of Operational Research,* vol. 153, pp. 3-27, 2004.

[13] Y. Ferrand, M. Magazine, U. S. Rao, and T. F. Glass, "Building Cyclic Schedules for Emergency Department Physicians," *Interfaces,* vol. 41, pp. 521-533, 2011.

[14] G. Trilling, *Génération automatique d'horaires de médecins de garde pour l'hôpital Côte-des-Neiges de Montréal*: Centre de recherche sur les transports (C.R.T.) = Centre for Research on Transportation, 1998.

[15] M. Brazeau, "Affectation des infirmières aux salles de l'unité d'endoscopie digestive du Centre Hopsitalier Universitaire de Sherbrooke," Maîtrise ès sciences appliquées, Département de Mathématiques et de Génie Industriel, Ecole Polytechnique de Montréal, Montréal, 2013.

[16] G. Caron, P. Hansen, and B. Jaumard, "The assignment problem with seniority and job priority constraints," *Operations Research*, vol. 47, pp. 449-453, May/Jun

May/Jun 1999 1999.

[17] B. Meindl and M. Templ, "Analysis of commercial and free and open source solvers for linear optimization problems," TU WIEN, Vienne, Autriche2012.

[18] M. Towhidi and D. Orban, "Customizing the Solution Process of COIN-OR's Linear Solvers with Python," GERAD, Montréal, Québec, Canada, Cahier du GERAD2012.

[19] A. M. Berger and B. B. Hobbs, "Impact of shift work on the health and safety of nurses and patients," *Clinical journal of oncology nursing*, vol. 10, pp. 465-471, 2006.

ANNEXE A – PRÉSENTATION D'UN HORAIRE, DÉCEMBRE 2013

RÉALISÉ PAR L'APPROCHE EN DEUX PHASES AVEC CBC

Médecins / Jours	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J
	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Docteur 1					22			16O		8A	8OR	8A	22	0															
Docteur 2		8SF			16C	16C						8EC	8OR	16A		16A	12C	12C									8OR	22	
Docteur 3					16SF	22						8SF					U	U	22		U	8EC	U					16C	22
Docteur 4										8OR	8A								16C		22	22							
Docteur 5										8C	8C	U	U	U									22	18O	18O			8EC	
Docteur 6	0	0	0	0	0			0	0												0	0	0			0	0	0	0
Docteur 7								8C	8SF										8A	16C		8OR	8C			8SF			16C
Docteur 8					8EC	8EC													16C	16SF	16SF		16A	12C	12C	16SF			
Docteur 9	16O				8SF	16C		16C	16SF	12C	12C	16C		8A	8SF					8C	8EC							16O	16SF
Docteur 10	8C	16C			U		U	8C	8C			8OR			U	U			0	0									
Docteur 11	16SF		8A	8OR			8A					8C	16C	22		8A	8OR	8A											8SF
Docteur 12	8OR	8C				U	16A					16A	16O	16O	22		0	0								8C	8EC	8SF	16C
Docteur 13	22		8C	8C	8A	8OR	8EC	8A	8A			8C	16SF		0	0	8A	8OR									16C	16C	16O
Docteur 14	U														16O	22	18O	18O		8SF	8A	U	8A			16C	16C	16SF	
Docteur 15	8A	8EC			8OR	8C	16C					16O	16A		8C	8OR	15A	15A											
Docteur 16						8C	16C		8OR	U	U								8EC	8A	8SF	8SF	16O			16C	16A		
Docteur 17						0	0			15A	15A								8C	8EC	8C	16O				8C	8SF		
Docteur 18								8EC	8C										U	8OR	16C	16SF		15A	15A		8C	8OR	
Docteur 19																					16O	16C		8OR	8A				
Docteur 20	8C	16SF			8C	16SF	22												8C	8C	8OR	8C	8SF			8A	16O		16A
Docteur 21	16C		12C	12C	16C	16O		U	8EC											16A	16C	16A		0	0	8OR	8C	8A	8OR
Docteur 22		U	U	U																U				U	U	U	U	U	U
Docteur 23	8EC	8OR					16O	22					8A	16C	16A									8A	8OR				
Docteur 24	16C				8C			16A	22	18O	18O		8C	8OR	16C	16O													8A
Docteur 25	16A					8A	8C	16C		0	0	22		8EC	8A				16O	16C	16A							8C	8C
Docteur 26	8SF	8C	8OR	8A			8OR	16SF	16C			0	0	8C	8OR	8C										8EC	8A		
Docteur 27		8A	15A	15A			8SF	8SF											8OR	22		8C	8OR	8C	8C	22	22		8C
Docteur 28					16A	16A		8OR	U										16A	16O		16C				16A			
Docteur 29		22	18O	18O													8C	8C	8SF		8C	8A	8EC				16SF	16A	

Indisponible — Disponible la journée seulement — Indisponible la nuit — Disponible complètement