UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

LA CONFECTION DES HORAIRES DE TRAVAIL DES MÉDECINS D'URGENCE RÉSOLUE À L'AIDE DE LA RECHERCHE AVEC TABOUS

IVO ERASMO BUZÓN CANTERA
DÉPARTEMENT DE MATHÉMATHIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE INDUSTRIEL)
MARS 2001

© Ivo Erasmo Buzón Cantera, 2001.

National Library of Canada
Bibliothèque nationale du Canada

Acquisitions and Bibliographic Services
Acquisitions et services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-60888-3

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

LA CONFECTION DES HORAIRES DE TRAVAIL DES MÉDECINS D'URGENCE RÉSOLUE À L'AIDE DE LA RECHERCHE AVEC TABOUS

présenté par: BUZÓN CANTERA Ivo Erasmo

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

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

M. SOUMIS François, Ph.D., président

Mme. LAPIERRE Sophie, Ph.D., membre et directrice de recherche

M. SORIANO Patrick, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu ma professeure et directrice de recherche Sophie Lapierre pour son support scientifique et la patience dont elle a fait preuve lors de la rédaction du présent mémoire.

J'adresse aussi mes sincères remerciements aux professeurs Patrick Soriano et Michel Gendreau pour leurs remarques et conseils judicieux.

Je tiens aussi à remercier les docteurs Alphonse Montminy de l'Hôpital Charles-Lemoyne et Bernard Unger de l'Hôpital Général Juif de Montréal pour leur collaboration dans cette recherche.

Finalement, j'exprime ma profonde gratitude à mon ami Angel Ruiz pour son grand support moral, ainsi qu'à Jean-François Routhier et Marko Blais pour leur aide concernant la rédaction de ce mémoire.

RÉSUMÉ

La confection de bons horaires est un problème très difficile en général. Lorsque le travail est posté, c'est-à-dire qu'il y a des quarts de nuit ou une rotation de travail sur les quarts de jour, soir et nuit. L'horaire a une grande influence sur le niveau de stress et de la fatigue ainsi que sur la qualité des relations sociales et familiales. Nos travaux portent sur le développement d'algorithmes et de règles de confection d'horaires de travail pour les médecins d'urgences, satisfaisant les plus récents critères ergonomiques. Nous avons tout d'abord amélioré un algorithme de recherche avec tabous pour la confection d'un horaire cyclique pour les médecins de l'urgence de l'Hôpital Charles-Lemoyne (HCL) afin de le rendre plus robuste et plus performant. Puis, nous avons développé une métaheuristique plus sophistiquée pour faire la confection d'horaires individualisés satisfaisant les exigences des médecins de l'Hôpital Général Juif de Montréal (HGJ). Les horaires générés par nos algorithmes sont de très bonne qualité, satisfaisant grandement les médecins de nos hôpitaux partenaires. Les travaux de ce mémoire comblent donc un besoin très important du point de vue théorique et pratique.

De par la nature des services offerts, le travail en salle d'urgence est un travail requérant un haut niveau de vigilance. Puisque les urgences sont ouvertes 24 heures par jour, 7 jours par semaine, le travail posté augmente d'autant plus le stress et la fatigue associés au travail en urgence. Les horaires respectant les règles ergonomiques peuvent donc améliorer les conditions de travail en urgence en essayant de bien balancer les besoins physiologiques, sociaux et familiaux du travail posté. Ainsi,

un bon horaire respecte un nombre maximum de jours consécutifs de travail suivi d'un nombre adéquat de jours de congés pour éviter l'épuisement, des rotations des quarts de travail vers l'avant (jour-soir-nuit) plutôt que vers l'arrière (nuit-soir-jour), pour respecter le cycle circadien, et répartit adéquatement les quarts de travail plus exigeants. De plus, afin de faciliter les contacts sociaux et familiaux, il faut éviter de briser les fins de semaines de congé (ne pas travailler ni le samedi ni le dimanche d'une même fin de semaine), éviter les fins de semaines de travail consécutives et limiter les longues séquences de travail impliquant des quarts de travail en soirée. À notre connaissance, peu de travaux sur la confection d'horaires de travail posté ont été effectués avec cette perspective ergonomique. Ce mémoire de maîtrise comble donc un grand besoin pour les travailleurs postés.

Nos travaux sur les horaires ont débuté par la confection d'horaires cycliques pour les médecins de l'urgence de l'HCL. Leur horaire était un horaire cyclique relativement simple à confectionner, respectant la plupart des règles ergonomiques sauf celles reliées aux fins de semaines. La difficulté de confectionner un horaire de meilleure qualité sans augmenter le temps de confection était tout un défi. Nous avons confectionné un horaire où les fins de semaines sont complètes et non consécutives, tout en possédant les autres qualités ergonomiques des horaires précédents. L'algorithme amélioré que nous présentons est basé sur les principes de la recherche avec tabous. Il est structuré de la façon suivante : (1) un tabou de pré-construction qui construit un horaire initial, (2) une recherche tabou avec deux niveaux de voisinage et (3) une phase de diversification par changement des poids qui élargit le domaine exploré. Il est très flexible et robuste, permettant de l'utiliser facilement sur d'autres problèmes de confection d'horaires cycliques rencontrés dans d'autres urgences. L'HCL a implanté nos horaires cycliques en juin 1998 et, avec son implantation sur ACCESS 97, les horaires sont plus faciles à générer qu'avec l'ancienne méthode.

Parce que les horaires cycliques ne tiennent pas compte des préférences individuelles, nous avons travaillé sur un problème plus général de confection des horaires

tel celui qui se présente à l'HGJ. Nous avons ainsi développé une métaheuristique pour confectionner des horaires en tenant compte de la charge de travail spécifique de chaque médecin et de leurs préférences personnelles. Cet algorithme utilise le même type d'approche que celui développé pour les horaires cycliques de l'HCL, mais il est plus complexe à cause de l'augmentation de la taille du problème. Il faut environ 3 heures de temps d'ordinateur sur une station Sun Ultra 10 pour générer un bon horaire, au lieu des 40 à 80 heures nécessaires avec la méthode semi-automatique actuellement utilisée à l'HGJ. Notre algorithme donne de bons horaires sur le jeu de données que l'HGJ nous a fourni, soit les données de la confection d'un horaire de 3 mois pour 22 médecins. Cependant, d'autres travaux de recherche devront être effectués pour rendre cet algorithme plus flexible et robuste.

ABSTRACT

Generating good schedules is a very difficult problem. Shift schedule has a big influence on the level of stress and fatigue, as well as on the quality of social relationships and family. Our work aims at developing algorithms and confection rules for emergency room physicians, that satisfy the most recent ergonomic criteria. We first enhanced an existing tabu search algorithm to make cyclic schedules for the emergency room physicians at Charles-Lemoyne Hospital (CLH). We then developed a more complex meta-heuristic to build acyclic schedules for Montreal's Jewish General Hospital (JGH). The schedules produced by our algorithms are of very good quality satisfying the physicians in both partner hospitals. Hence, this work fills an important need from both theorical and pratical view points.

Emergency room work requires a high level of vigilance. Because emergency rooms are open 24 hours a day, 7 days a week, the shift work increases the stress and tiredness associated with work in emergency rooms. Schedules complying with ergonomic criteria can improve working conditions, because ergonomic criteria try to balance physiological, social and family needs for shift work. A good schedule respects a maximum number of consecutive days of work followed by an adequate number of days off to avoid exhaustion. In a good schedule, forward rotations of the shifts (day-evening-night) are preferred to backwards (night-evening-day), in order to respect the circadian cycle, and the more demanding shifts are well distributed. Moreover, to facilitate social and family contacts, one generally wants that weekends off not be broken (i.e. try not to work only one day, either Saturday or Sunday), that consecu-

tive weekends of work be avoided and that the number of consecutive evening shifts be limited. To our knowledge, few work has been carried out up to now on shift work schedules incorporating ergonomic criteria. This master's thesis aims at contributing to fill the need for research on this topic.

Our work on schedules began with the generation of cyclic schedules for emergency room physicians of CLH. Their handmade schedule was a very simple cyclic schedule that was rather easy to make and which respected most of the ergonomic criteria except those connected to weekends. The difficulty in making a schedule of better quality without increasing the time of generation was a big challenge. We did manage to produce a schedule where all the working weekends are complete and nonconsecutive, while maintaining the other ergonomic qualities. This enhanced Tabu search algorithm is structured as follows : (1) a Tabu search which builds an initial schedule, (2) Tabu search with two levels of neighbourhoods and (3) a diversification phase based on weight changes which widens the search. This algorithm is very flexible and robust, allowing it to be easily adapted to other cyclic scheduling problems found in other hospitals. CLH uses our cyclic schedules since June 1998 and, with its establishment on ACCESS 97, the schedules are easier to generate than with the old method.

Because cyclic schedules do not take into account individual preferences, we decided to work on a more general shift scheduling problem such as the one found at the JGH. We developed a meta-heuristic that make schedules while taking into account the workload of each physician and his personal preferences. This algorithm uses the same approach as the one developed for the cyclic schedules, but is more complex due to the huge increase in the size of the data and the number of variables of the problem. It takes approximately 3 hours of computer time on a Sun Ultra 10 workstation to generate a good schedule, far less than the 40 to 80 hours required by the semi-automated method presently used at the JGH. Our algorithm produces good schedules with the data provided by the JGH, which covers a schedule of 3 months

for 22 physicians. However, further research is needed to improve the flexibility and robustness of the algorithm.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS iv

RÉSUMÉ v

ABSTRACT viii

TABLE DES MATIÈRES xi

LISTE DES FIGURES xiv

1 INTRODUCTION 1

1.1 Le travail en salle d'urgence 2

1.2 Les horaires ergonomiques pour les médecins 2

1.3 Types d'horaires de travail 5

1.3.1 Horaires cycliques 6

1.3.2 Horaires individualisés 7

1.4 Organisation du mémoire 8

2 PROBLÈMES DE CONFECTION D'HORAIRES 11

2.1 Travaux sur la confection d'horaires 11

2.1.1 Travaux sur la confection d'horaires cycliques 13

2.1.2 Travaux sur la confection d'horaires individualisés 16

2.2 La recherche avec tabous 18

2.2.1 Principes de la recherche avec tabous 19
2.2.2 La diversification dans la RT 20
2.3 Définition du problème de confection d'horaire 22
2.3.1 Variables de décision 23
2.3.2 Formulation mathématique 24

3 HORAIRES CYCLIQUES ERGONOMIQUES 29
3.1 Hôpital Charles-Lemoyne 30
3.1.1 La demande en médecins 31
3.1.2 Les règles de l'horaire 32
3.1.3 Méthode utilisé à l'HCL 33
3.2 Application de la recherche avec tabous 36
3.2.1 La structure de données 37
3.2.2 La fonction objectif 38
3.2.3 Algorithme de Labbé 40
3.2.3.1 Recherche locale : Voisinage-1 41
3.2.3.2 Diversification : Voisinage-2 44
3.2.3.3 Diversification : Voisinage-3 47
3.2.4 Analyse de l'algorithme de Labbé 48
3.3 Nouvelle approche 51
3.3.1 Expérimentations 52
3.3.1.1 Amélioration de la fonction objectif 53
3.3.1.2 Problème décortiqué 54
3.3.1.3 Phase initiale de l'algorithme 57
3.3.2 Nouvelle approche 62
3.3.2.1 Construction de l'horaire initial 64
3.3.2.2 Exploration locale : Voisinage-1 65
3.3.2.3 Diversification niveau 1 : Voisinage-2 65
3.3.2.4 Diversification niveau 1 : Voisinage-4 66

3.3.2.5 Diversification niveau 1 : Voisinage-5 68
3.3.2.6 La diversification par changement de poids 70
3.3.2.7 Résolutions multiples 71
3.3.3 Relation entre les poids et l'horaire final 71
3.3.4 Résultats 73
3.4 Mise en oeuvre 82

4 HORAIRES INDIVIDUALISÉS 85
4.1 L'Hôpital Général Juif de Montréal 86
4.1.1 L'horaire à l'HGJ 86
4.1.2 Les règles de confection des horaires à l'HGJ 88
4.1.3 Méthode utilisée à l'HGJ 89
4.2 Application de la recherche avec tabous 94
4.2.1 Transformation 95
4.2.1.1 Transformation de la structure 95
4.2.1.2 Fonction objectif 98
4.2.1.3 Problème décortiqué 103
4.2.1.4 Collaboration avec l'HGJ 105
4.2.2 Algorithme Tabou pour les horaires individualisés 108
4.2.2.1 Construction de l'horaire initial 109
4.2.2.2 Exploration locale niveau 1 : Voisinage-1 109
4.2.2.3 Exploration locale niveau 1 : Voisinage-7 110
4.2.2.4 Exploration locale niveau 2 : Voisinage-2 113
4.2.2.5 Exploration locale niveau 2 : Voisinage-8 113
4.2.3 Exploration du domaine 116
4.3 Résultats 116

CONCLUSION 122

BIBLIOGRAPHIE 124

LISTE DES FIGURES

1.1 Exemple d'horaire cyclique 6
1.2 Exemple d'horaire individualisé 7

3.1 Horaire de base 33
3.2 Affectation des médecins à l'horaire de base 34
3.3 Horaire détaillé, 21 premiers jours de l'horaire de 37 jours. 34
3.4 Horaire de base pour les médecins à temps partiel 34
3.5 Matrice de l'horaire initial utilisé par l'algorithme de Labbé [25] . . . 38
3.6 Exemples des solutions voisines générées avec le Voisinage-1 43
3.7 Exemples des solutions voisines générées avec le Voisinage-2, bloc3 . . 45
3.8 Exemples des solutions voisines générées avec le Voisinage-2, bloc2 . . 46
3.9 Meilleur horaire confectionné avec le premier algorithme pour l'HCL . 49
3.10 Horaire avec seulement les quarts de nuits 58
3.11 Cycle ergonomique des quarts à l'Hôpital Charles Lemoyne 62
3.12 Exemple des solutions voisines générées avec le Voisinage-4 67
3.13 Exemple des solutions voisines générées avec le Voisinage-5 69
3.14 Évolution de la qualité de l'horaire en fonction des itérations 74
3.15 Évolution de la qualité de l'horaire courante après l'itération 30 . . . 75
3.16 Meilleur horaire confectionné avec la nouvelle approche pour l'HCL . 76
3.17 Horaire cyclique pour l'HCL avec 13 médecins 78
3.18 Horaire cyclique pour l'HCL avec 16 médecins 79

3.19 Horaire cyclique pour l'HCL avec 17 médecins 80
3.20 Horaire cyclique pour l'HGJ 81
3.21 L'interface pour affecter les médecins au lignes de l'horaire cyclique . 83
3.22 Exemple d'un horaire global visualisable par Internet 84

4.1 Matrice de la demande 91
4.2 Matrice des vacances 91
4.3 Matrice de la charge de travail 92
4.4 Matrice de la charge par semaine 92
4.5 Matrice de l'horaire initial de l'algorithme 96
4.6 Matrice des poids 102
4.7 Exemples des solutions avec Voisinage-7, bloc1 111
4.8 Exemples des solutions avec Voisinage-7, bloc2 et bloc3 112
4.9 Exemples des solutions avec Voisinage-8 115
4.10 Évolution de la qualité du meilleur horaire (Best_sol) 118
4.11 Évolution de la qualité de l'horaire courant après l'itération 500 . . . 119
4.12 Horaire confectionné pour l'HGJ (semaines 1 à 7) 120
4.13 Horaire confectionné pour l'HGJ (semaines 8 à 13) 121

Chapitre 1

INTRODUCTION

Le travail des médecins d'urgence est très stressant et fatigant de par la nature des services offerts et en raison du travail posté. Nous appelons travail posté le travail s'effectuant par rotation des quarts de jour, de soir et de nuit. Des études récentes ont montré que la qualité d'un horaire a une grande influence sur la charge de travail ressentie lorsque le travail de nuit est impliqué [10] [24]. Il existe maintenant des recommandations sur la confection d'horaires de travail posté afin de minimiser ses effets négatifs [22] [23]. Cependant, les travaux accomplis jusqu'à ce jour sur la confection des horaires ne permettent pas d'obtenir des horaires satisfaisant toutes ces règles [9]. Ce mémoire traite de la confection d'horaires respectant ces règles.

Ce chapitre constitue une introduction générale au problème de confection des horaires de médecins d'urgence et une revue des principaux axes de recherche de ce domaine. La section 1.1 présente le travail des médecins en salle d'urgence. La section 1.2 décrit les règles qu'un bon horaire doit respecter. La section 1.3 décrit les deux grands types d'horaires de travail, soit les horaires cycliques et les horaires individualisés. Finalement, les objectifs ainsi que le plan du mémoire sont exposés dans la section 1.4.

1.1 Le travail en salle d'urgence

Le travail des médecins en salle d'urgence est un travail exigeant. Les patients arrivent souvent dans un état critique. De plus, un médecin doit s'occuper de plusieurs patients à la fois en raison de l'achalandage de l'urgence et à cause de la séquence de nombreuses procédures médicales nécessaires pour poser le bon diagnostic. En conséquence, le travail des médecins en salle d'urgence demande un haut niveau de vigilance et est reconnu comme étant très fatigant. Les urgences sont ouvertes 24 heures par jour, 7 jours par semaine : la présence d'un ou de plusieurs médecins est donc requise en tout temps. Les horaires de travail en salle d'urgence impliquent ainsi la rotation des quarts de jour, de soir, et de nuit, soit les horaires de travail posté. Le travail posté est plus fatigant que le travail de jour. Le travail en urgence est donc très fatigant et stressant, même si on réduit le nombre d'heures travaillées par semaine.

Il a été démontré qu'un horaire bien conçu peut cependant réduire le niveau de fatigue et de stress en plus de faciliter les contacts avec la famille et les amis [1]. Il est donc très important d'offrir de bons horaires de travail aux médecins. Malheureusement, la confection de bons horaires est très complexe et demande beaucoup de temps. La plupart des hôpitaux de Montréal n'utilisent pas de logiciels pour générer leurs horaires [9]. La qualité et le temps de confection varient donc grandement d'un établissement à l'autre selon l'habileté du médecin qui fait l'horaire. Notre travail vise à aider les médecins en développant un algorithme capable de confectionner des horaires de qualité égale ou supérieure à ce qu'ils peuvent faire manuellement et ce, en une fraction du temps.

1.2 Les horaires ergonomiques pour les médecins

La confection d'un horaire pour les médecins d'urgence est une tâche relativement facile en raison de la petite taille du problème, mais confectionner un bon horaire est

un grand défi. Un bon horaire de travail minimise les influences négatives du travail posté en respectant le plus possible le cycle circadien et les besoins sociaux et familiaux [1]. Parce que l'individu fonctionne sur un cycle de vingt-cinq heures (rythme circadien) plutôt que vingt-quatre, les rotations des quarts de travail vers l'avant et des congés plus longs après le travail de nuit sont donc plus compatibles au rythme chronobiologique. Du côté social, un travailleur a besoin de garder des contacts avec sa famille et ses amis. Ainsi, les fins de semaine de congé et l'absence de longues séquences de travail de soir aident le travailleur à garder une vie sociale et familiale satisfaisante.

À partir des travaux de recherche portant sur l'influence du travail posté sur l'individu, Knauth [22] [23] a défini des règles ergonomiques pour la confection des horaires. Ces règles, au nombre de 12, sont les suivantes :

1. Minimiser le travail de nuit autant que possible.
2. Limiter le nombre de quarts de travail de nuit consécutifs à deux ou trois.
3. Limiter le nombre de quarts de travail de soir consécutifs à quatre.
4. Éviter les courtes périodes de repos (moins de 11 heures) entre la fin d'un quart et le début du quart suivant.
5. S'il y a du travail durant les fins de semaine, donner des fins de semaines de congé avec au moins deux jours de congé consécutifs.
6. Éviter les longues séquences de travail suivies de périodes de mini-vacances de quatre à sept jours.
7. Faire de préférence des rotations de quarts vers l'avant (ordre ergonomique).
8. Favoriser les horaires individuels avec le moins de changements possible.
9. Ajuster la longueur des quarts de travail en fonction de la charge de travail.
10. Considérer des quarts de nuits plus courts.
11. Éviter de débuter les quarts de jour très tôt.

12. Permettre aux employés d'échanger des quarts de travail entre eux pour leur donner de la flexibilité dans leurs horaires.

Une bonne connaissance de ces règles est essentielle pour aider les médecins à bien définir les règles de confection de leurs horaires.

Carter et Lapierre [9] ont analysé les horaires de médecins en salle d'urgence de six hôpitaux de Montréal (Québec). Ils ont remarqué qu'il y a beaucoup de variations d'un hôpital à l'autre concernant les règles et les méthodes utilisées pour la confection de leurs horaires. Toutefois, il y a beaucoup de similitudes entre les hôpitaux concernant les règles de base des horaires. Tous les hôpitaux respectent les règles suivantes :

1. Observer un minimum de 16 heures entre la fin d'un quart et le début du quart suivant.
2. Observer des séquences de travail composées d'un nombre maximum de trois à cinq quarts consécutifs.
3. Observer un nombre minimum de deux jours de congés consécutifs suite à chaque séquence de travail de jour.
4. Observer un nombre minimum de trois jours de congés consécutifs suite à chaque séquence de travail de nuit.
5. Minimiser le nombre de fins de semaine où le médecin travaille une seule journée sur deux.
6. Minimiser le nombre de fins de semaine de travail consécutives.
7. Espacer les séquences de travail le plus uniformément possible.

À ces règles, chaque hôpital en ajoute une ou plusieurs autres telles que par exemple :

- les médecins seniors travaillent moins les fins de semaines et durant les quarts de nuit ;
- on peut tenir compte des dates de non-disponibilité pour chaque médecin.

Selon Amilcar [2] le choix des règles est souvent très lié à la méthode de confection des horaires. La qualité des horaires dépend donc de l'habileté du médecin à faire des horaires selon le niveau de complexité choisi. Un constat fort intéressant de Carter et Lapierre [9] est que la satisfaction des médecins envers leur horaire ne dépend pas du nombre de règles choisies. Ainsi, des médecins d'un hôpital peuvent être tout aussi contents de leur horaire simple, et même parfois plus, qu'un groupe de médecins avec des horaires conçus en fonction de règles très complexes et qui respectent leurs préférences individuelles. Un choix judicieux des règles de confection est donc fort important. Ce choix doit être adéquat pour le groupe de médecins. Ainsi, si le groupe de médecins est relativement homogène, un horaire avec un nombre limité de règles sera satisfaisant. Pour un groupe de médecins plus hétéroclite, il faut un éventail de règles plus grand, mais également des méthodes de confection plus sophistiquées pouvant faire des horaires satisfaisant les exigences du groupe. L'utilisation d'un ensemble de règles simples ou complexes dépend des besoins de chaque groupe de médecins.

1.3 Types d'horaires de travail

Il existe deux grands types de méthodes de confection d'horaires de travail : les horaires cycliques, où toutes les personnes travaillent selon un même horaire qui se répète, et les horaires individualisés, où chaque personne travaille selon un horaire personnalisé tenant compte de ses préférences personnelles [2] [9]. Dans le cadre de cette recherche, nous avons abordé les deux types de problèmes de confection d'horaire en collaborant avec un hôpital pour chaque type d'horaire. Nous avons travaillé sur la confection d'horaires cycliques avec l'Hôpital Charles-Lemoyne et d'horaires individualisés avec l'Hôpital Général Juif de Montréal.

1.3.1 Horaires cycliques

Dans un horaire cyclique, tous les médecins ont le même horaire de base. Une fois l'horaire de base confectionné, tel celui présenté à la figure 1.1 pour un contexte de 3 médecins, le principe est le suivant : le médecin A est affecté à l'horaire 1 durant la semaine 1, à l'horaire 2 durant la semaine 2, et ainsi de suite. Le médecin B est affecté à l'horaire 2 durant la semaine 1, à l'horaire 3 durant la semaine 2, et ainsi de suite. Le médecin C est affecté à l'horaire 3 durant la semaine 1, à l'horaire 1 durant la semaine 2, et ainsi de suite.

	L	M	M	J	V	S	D
Horaire 1	J	J	J	J	J	C	C
Horaire 2	S	S	S	S	S	C	C
Horaire 3	N	N	N	N	N	C	C

J - Jour, S- Soir, N- Nuit et C - Jour Congé.

Figure 1.1 – Exemple d'horaire cyclique

Les avantages des horaires cycliques sont l'équité et sa réutilisation possible. Un horaire cyclique est équitable parce que, pour un cycle donné de l'horaire, soit 3 semaines dans l'exemple de la figure 1.1, les médecins auront tous effectué les mêmes quarts de travail dans la même séquence. De plus, la possibilité de répéter l'horaire cyclique réduit grandement la quantité de travail de confection d'horaire. Un horaire cyclique peut être valable pour des années. Ils sont donc bien adaptés au contexte de travail stable avec un personnel relativement homogène.

Les horaires cycliques ont toutefois leurs limites. En effet, ils exigent que tous les médecins travaillent exactement le même nombre de quarts de travail et ce, pour chaque type de quart de travail. S'il existe des médecins à temps partiel, on peut cependant diviser un ou plusieurs horaires entre plusieurs médecins. Mais le nombre

de possibilités de types d'horaires de travail à temps partiel ainsi obtenu est limité. Les horaires cycliques ne permettent pas non plus de personnaliser les horaires en fonction des préférences propres à chaque individu. Cependant, les échanges de quarts entre les médecins peuvent combler les besoins personnels des individus. Carter et Lapierre [9] ont remarqué que certains hôpitaux sont satisfaits de l'utilisation d'un horaire cyclique s'il y a une bonne dynamique de groupe permettant des échanges faciles de quarts entre les médecins. De fait, ces échanges entre médecins solidarisent le groupe de médecins et peuvent donc être perçus comme un atout pour le groupe plutôt qu'une tâche fastidieuse.

1.3.2 Horaires individualisés

Un horaire de travail individualisé est un horaire formé de plusieurs horaires personnalisés pour chaque médecin. La figure 1.2 montre un exemple d'horaire individualisé, où chaque ligne est l'horaire d'un médecin. Dans l'horaire individualisé, les demandes de chaque médecin sont prises en compte, ce qui fait que les horaires sont difficilement interchangeables entre les médecins.

	L	M	M	J	V	S	D	L	M	...
Horaire du médecin A	J	J	J	C	S	C	C	N	N	...
Horaire du médecin B	S	S	S	C	N	C	C	C	C	...
Horaire du médecin C	C	N	N	N	C	C	C	J	J	...
Horaire du médecin D	N	C	C	J	J	C	C	S	S	...

J - Jour, S- Soir, N- Nuit et C - Jour Congé.

Figure 1.2 – Exemple d'horaire individualisé

L'horaire est personnalisé en tenant compte de trois dimensions : (1) la charge de travail ; (2) les vacances et les jours de congé ; (3) les préférences personnelles pour les séquences de travail et de congé. Les médecins peuvent ainsi avoir différentes charges

de travail, permettant ainsi d'avoir du personnel à temps plein et tous les formats possibles de travail à temps partiel. Quant au respect de périodes de vacances et de jours de congé, ceci permet aux médecins de respecter leurs autres engagements au niveau professionnel (éducation, recherche, etc.) ainsi que leurs besoins sociaux et familiaux. Finalement, les médecins peuvent avoir des préférences différentes pour les séquences de travail et de congé. La personnalisation des horaires peut être fort intéressante pour les médecins.

Cependant, la personnalisation des horaires augmente la complexité de la confection ainsi que le nombre potentiel de conflits entre les demandes personnelles. En conséquence, la confection d'horaires individualisés est plus complexe à résoudre et à gérer que la confection d'horaires cycliques. Ils doivent donc être utilisés seulement si les horaires cycliques ne sont pas adéquats.

1.4 Organisation du mémoire

Nos recherches sont centrées sur la confection d'horaires de travail pour les médecins en salle d'urgence et elles visent à développer des algorithmes capables de confectionner de bons horaires de travail dans un temps raisonnable. Nous avons travaillé avec l'Hôpital Charles-Lemoyne pour le problème de confection d'horaires cycliques et avec l'Hôpital Général Juif de Montréal pour le problème de confection d'horaires individualisés. Les objectifs spécifiques de recherche sont distincts pour chaque problème.

L'Hôpital Charles-Lemoyne (HCL) utilise un horaire cyclique. Avant la poursuite de nos travaux, l'horaire de travail d'HCL avait une bonne qualité ergonomique, sauf pour les fins de semaine. L'algorithme développé par Labbé [25] a permis de confectionner un bon horaire cyclique pour l'HCL mais manquait de robustesse. Notre premier objectif consistait donc à continuer ses travaux afin d'améliorer son algorithme

pour le rendre plus robuste et flexible. Pour faire le lien entre l'horaire cyclique confectionné par l'algorithme et l'horaire réel utilisé à l'HCL, nous avons également décidé de créer une application sur ACCESS 97 qui permettre de minimiser le temps de gestion des horaires, ce qui était un aspect fort important pour HCL. L'horaire généré par l'algorithme de Labbé a été implanté en juin 1998. Nous avons généré un meilleur horaire que celui de Labbé mais il n'a pas été encore implanté.

L'Hôpital Général Juif de Montréal (HGJ) utilise quant à lui des horaires individualisés. Les médecins utilisent une méthode de confection décentralisée, c'est-à-dire que chaque médecin confectionne son propre horaire d'une façon séquentielle à l'aide de certains outils informatisés (par exemple, tableur). Le médecin responsable des horaires coordonne la confection de l'horaire selon la complexité des contraintes d'horaires des médecins et leur ancienneté. Entre autres, il s'assure que l'horaire final est réalisable du point de vue des besoins en personnel. L'horaire final est, de fait, d'une très bonne qualité. Cependant, cette méthode de confection est étalée sur une longue période et le médecin responsable doit y dédier beaucoup de temps. Pour les aider, nous avons entrepris de transformer l'algorithme développé pour l'HCL afin de confectionner les horaires de l'HGJ. Les résultats sont bons pour le jeu de données que nous a fourni l'HGJ. Toutefois, il faut continuer les travaux de recherche avant de pouvoir implanter notre logiciel au HGJ.

Nous présentons dans ce mémoire la recherche réalisée sur la confection d'horaires en salle d'urgence pour ces deux hôpitaux. L'organisation du mémoire est la suivante. Le chapitre 2 présente un survol des travaux de recherche effectués sur la confection des horaires, ainsi qu'une introduction à la recherche avec tabous. Il se termine avec la présentation d'une formulation mathématique du problème d'horaires sur lequel nous travaillons. Le chapitre 3 présente l'algorithme de recherche avec tabous de Labbé pour la confection d'un horaire cyclique à l'HCL ainsi que les améliorations que nous

y avons apportées. Nous présentons des résultats sur la performance et la robustesse de l'algorithme amélioré. Le chapitre 4 présente notre algorithme pour la confection d'horaires individualisés dans le contexte de l'HGJ ainsi qu'une analyse de ses performances. Enfin, une courte conclusion fait le point sur les algorithmes étudiés et implantés dans le cadre de cette maîtrise, sur les résultats obtenus et sur quelques propositions de directions de recherches à poursuivre dans le futur sur ce type de problèmes et de méthodes de résolutions.

Chapitre 2

PROBLÈMES DE CONFECTION D'HORAIRES

Les travaux de recherche portant sur le développement de méthodes pour confectionner les horaires sont présentés à la section 2.1. La section 2.2 introduit la recherche avec tabous, l'approche algorithmique que nous avons utilisée dans nos travaux. Enfin, la section 2.3 présente une formulation mathématique du problème d'horaires sur lequel nous travaillons.

2.1 Travaux sur la confection d'horaires

La confection des horaires a intéressé plusieurs branches de la science, notamment la recherche opérationnelle. Dans le secteur de la santé, le problème de confection d'horaires des infirmières a attiré plus d'attention que celui des médecins. Même si les deux problèmes semblent très similaires, en réalité ils ont des différences significatives. Par exemple, les conditions de travail pour les médecins sont différentes de celles des infirmières : les infirmières ont une forte syndicalisation, ce que l'on ne rencontre pas chez les médecins. Cela fait que les horaires des infirmières doivent respecter les termes de la convention collective relative aux horaires. Si l'hôpital n'est pas capable

de combler tous les besoins avec le personnel régulier, des infirmières sur appel et à temps partiel sont utilisées. Du côté des médecins, l'absence d'un médecin implique un horaire plus chargé pour les autres, car les médecins sont responsables collectivement de fournir les services requis.

Le problème de confection d'horaires pour les médecins est donc différent du problème de confection d'horaires pour les infirmières et ils sont résolus de façons différentes. La confection d'horaires d'infirmières est typiquement effectuée en deux étapes. Dans un premier temps, on essaie de combler les besoins en personnel infirmier tout en respectant la convention collective. En effet, on tente de minimiser les jours de manque d'effectif infirmier et les jours de surplus d'infirmières. Dans un deuxième temps, on essaie d'utiliser dans l'ordre le personnel flottant, le personnel à temps partiel, celui sur appel, ou le personnel régulier à heures supplémentaires afin de combler les jours où le nombre de personnel régulier est insuffisant, ces différentes ressources ayant un coût unitaire d'utilisation croissant. Le cas des médecins en salle d'urgence est différent. Le concept de "coût" n'est pas pertinent. Il faut plutôt confectionner un horaire de bonne qualité pour les médecins de façon à favoriser la rétention des médecins et faciliter le recrutement. Une des difficultés majeures provient du fait que les règles sont informelles, à cause de la non-syndicalisation et donc de l'absence d'une convention collective ou de règles législatives.

Il y a deux approches au problème de confection d'horaires en santé : les horaires cycliques et les horaires individualisés [2]. Les problèmes de confection d'horaires cycliques et individualisés requièrent des techniques de résolution différentes. Puisque chaque approche fait appel à une littérature distincte, nous présentons séparément les travaux de recherche pour les deux approches du problème d'horaire.

2.1.1 Travaux sur la confection d'horaires cycliques

Les premiers travaux sur les horaires de travail cycliques portent sur les horaires à un seul quart de travail dans un contexte syndical. L'objectif, dans un tel contexte, est de trouver un horaire satisfaisant les règles de travail (convention collective) et la demande en personnel à un coût minimum, c'est-à-dire avec le minimum d'employés [12].

Pour améliorer les horaires de travail cycliques, Burns et Carter [7] présentent une méthode pour déterminer le nombre minimum d'employés nécessaires pour confectionner un horaire cyclique avec un seul type de quart de travail. Dans leur contexte, tous les quarts à affecter sont du même type et l'horaire doit respecter les quatre règles suivantes : satisfaire la demande, maximum 6 jours de travail consécutif, 5 jours de travail par semaine et un minimum de A fins de semaine de congé pour chaque groupe de B fins de semaine. Ainsi, ils proposent un algorithme simple qui confectionne un horaire respectant ces quatre règles avec le nombre minimum d'employés. Dans un deuxième travail, Burns et Koop [8] confectionnent des horaires avec plusieurs types de quarts de travail (par exemple, quart de jour, soir et nuit). On cherche à minimiser le nombre d'employés tout en respectant six règles : les quatre règles utilisées par Burns et Carter [7] plus un minimum de 16 heures de repos entre deux quarts consécutifs et un minimum d'un jour congé entre deux quarts consécutifs différents. L'algorithme de confection comporte les quatre étapes suivantes :

1. Trouver le nombre minimum d'employés nécessaires afin d'assurer un nombre minimum de fins de semaine de congé pour chaque bloc de fins de semaine consécutives d'une longueur donnée, en tenant compte du nombre de quarts de travail par jour.
2. Choisir les modules d'horaires ou mini-horaires pour former l'horaire (ces modules sont définis dans leur article où les quarts sont représentés par des symboles).

3. Faire la combinaison des lignes de l'horaire pour satisfaire la contrainte des fins de semaine ; respecter le nombre requis de fins de semaine de congé parmi un nombre donné de fins de semaine consécutives.
4. Affecter les types de quarts de travail aux jours de travail.

Cet algorithme confectionne des horaires où il y a seulement deux jours de congé par semaine.

Hung [20] présente une méthode heuristique qui est une extension des travaux de Burns et Carter [7] sur la confection des horaires à un seul type de quart de travail, mais qui est plus simple que celui de Burns et Koop [8]. Il présente son algorithme pour deux scénarios : celui où il y a deux jours de congé par semaine et celui où il y a sept jours de congé par deux semaines. Sa méthode heuristique par construction pour le deuxième scénario (qui est plus proche du problème des médecins de l'urgence) est la suivante :

1. Trouver le nombre minimum d'utilisateurs.
2. Affecter des groupes de deux jours de congé.
3. Affecter les quarts pour le premier jour de l'horaire.
4. Affecter le reste des quarts et de jours de congé isolés, en fonction du quart affecté au premier jour.

Cette méthode donne des horaires légèrement meilleurs que les méthodes de Burns et Koops [8].

Toutes ces méthodes donnent de bons horaires quand il y a peu règles à respecter. Avec l'apparition des règles ergonomiques (voir section 1.2), le problème de confection d'horaires devient plus complexe [28], à cause de l'augmentation du nombre de règles. Toutes ces méthodes de confection par étapes où les quarts de travail ne sont pas établis en même temps que les jours de congé ne peuvent pas avoir une bonne qualité

sur le plan ergonomique car ils ne permettent pas de tenir compte de ces aspects au fur et à mesure de la construction de l'horaire.

Laporte et Nobert [26] utilisent une approche différente, soit une méthode basée sur la programmation mathématique en nombres entiers. Cette méthode est toutefois très contraignante et peu flexible pour la confection d'horaires ergonomiques [27]. Laporte [27] suggère même que la confection d'horaires cycliques relève plus d'un art que d'une science, en suggérant de réaliser plutôt les horaires cycliques en utilisant des règles simples permettant de les faire "à la main".

Schwarzenau et al. [29] sont les premiers à proposer une méthode de confection d'horaires ergonomiques avec une approche unifiée de l'affectation des jours de congés et de l'affectation des quarts de travail. Ils font une analyse comparative entre une méthode heuristique et une méthode exacte par énumération pour la confection d'horaires tenant compte de quelques règles ergonomiques. Cependant, la taille des horaires qu'ils arrivent à confectionner dans un temps acceptable est très limitée, comptant un maximum de 5 employés avec la méthode par énumération et de 12 avec la méthode heuristique. De plus, leur heuristique n'est pas explicitement décrite dans l'article ce qui rend la réutilisation de leurs travaux quasi impossible.

Labbé [25] propose la confection d'horaires à l'aide de la recherche avec tabous (méthode meta-heuristique) pour générer un horaire cyclique de grande qualité ergonomique. Il commence avec un horaire initial d'une mauvaise qualité et poursuit en faisant de petits changements qui augmentent la qualité de l'horaire pour arriver, après plusieurs itérations de recherche avec tabous, à un bon horaire. Cet algorithme fonctionne, mais il n'est pas suffisamment flexible et robuste pour donner facilement de bons horaires dans des contextes différents de celui pour lequel il a été développé, soit celui des médecins de l'urgence de l'Hôpital Charles-Lemoyne. Dans ce mémoire

nous reprenons les travaux de Labbé [25] et tentons d'améliorer la performance et la robustesse de sa méthode de recherche avec tabous.

2.1.2 Travaux sur la confection d'horaires individualisés

Le travail de Warner [35] sur la confection des horaires d'infirmières est un des premiers sur la confection d'horaires individualisés dans le contexte de la santé. Il présente un algorithme à deux étapes. Dans une première étape, il génère 600 horaires réalisables pour chaque infirmière : respectant les préférences de celle-ci à l'aide d'un système de pointage que l'infirmière donne à chaque critère de l'horaire. Seuls les 50 meilleurs seront retenus et analysés dans l'étape suivante. Dans la seconde étape, l'horaire de chaque infirmière est choisi parmi les 50 horaires pré-sélectionnés, à l'aide d'un algorithme basé sur la programmation mathématique. L'objectif est de minimiser les coûts tout en respectant la convention collective. Au moment de la publication de l'article (1976), sa méthode était implantée dans certains hôpitaux et elle était capable de confectionner un horaire pour 47 infirmières. Avec la création du logiciel ANSOS, la méthode de Warner est aujourd'hui implantée dans de nombreux hôpitaux. Ce logiciel est présentement vendu par la compagnie "Per-se Technologies" (voir http ://www.per-se.com).

Berrada et al. [4] proposent quant à eux une approche différente pour la confection des horaires d'infirmières, soit une approche multi-objectif. L'objectif de leur modèle est composé de plusieurs objectifs indépendants. Ils proposent trois alternatives pour résoudre leur modèle multi-objectif :

1. La première, basée sur la méthode de Smith et Wiggins [31], correspond à une résolution par étapes : à chaque étape, on minimise un seul objectif sans détériorer la valeur obtenue pour les objectifs précédents. Les objectifs sont classés par ordre d'importance.
2. Une deuxième alternative basée sur la méthode de Sherali [30] consiste à pondérer

chaque objectif $f_i(x)$ en lui assignant un poids λ_i et à les agréger tous en un seul objectif global en faisant la sommation des objectifs individuels pondérés ($F(x) = \sum \lambda_i \cdot f_i(x)$).

3. La troisième alternative est l'application de la recherche avec tabous, basée sur la méthode de Glover [16].

En utilisant un modèle similaire, Beaulieu et al. [3] reprennent les travaux de Berrada et al. [4] pour les appliquer au contexte des horaires des médecins d'urgence. Ils présentent seulement le traitement du problème avec la deuxième alternative (pondération des objectifs).

Jaumard et al. [21] s'inspirent de la méthode de résolution de Warner [35] pour faire la confection des horaires d'infirmières. Ils présentent une méthode exacte basée sur la génération de colonnes pour le problème des horaires d'infirmières. Cette méthode par génération de colonnes décompose le problème en deux : un problème maître et un sous-problème. Le sous-problème sert à générer des horaires individualisés pour les infirmières respectant la convention collective. Ceux-ci sont alors fournis au problème maître afin qu'il choisisse, parmi les horaires générés par le sous-problème, ceux qui sont les plus "intéressants" de façon à concevoir un horaire global à coût minimal. La méthode a été testée à l'Hôpital Royal Victoria (Montréal) et s'avère très prometteuse.

Dowsland [11] propose une autre approche pour générer des horaires d'infirmières. Elle présente une méta-heuristique de recherche avec tabous avec oscillation stratégique, afin de confectionner les horaires des infirmières. Elle utilise un modèle très similaire à celui de Warner [35]. La fonction objectif consiste à maximiser la qualité de l'horaire qui est évaluée selon deux critères : le coût associé à la faisabilité de l'horaire, c'est-à-dire avoir suffisamment d'infirmières pour satisfaire la demande journalière, et le coût associé au respect de la convention collective. Elle résout le problème par os-

cillation stratégique entre ces deux objectifs. Dans une première phase, l'objectif est formé principalement par le coût associé à la faisabilité de l'horaire. Quand l'horaire est réalisable, il oscille vers la deuxième phase où l'objectif est formé principalement par le coût associé au respect de la convention collective. Après quelques itérations, on revient à la première phase et ainsi de suite. La méthode oscille donc en permanence entre ces deux phases de recherche de la faisabilité et de minimisation des coûts. Son algorithme confectionne de bons horaires, mais il manque de flexibilité et de robustesse.

De façon similaire, Burke et al. [6] présentent une méthode de recherche avec tabous pour faire la confection des horaires d'infirmières dans le contexte des hôpitaux belges. Malheureusement, ce travail étant à l'origine d'une application commerciale, l'article contient peu de détails sur leurs implantations des méthodes tabous. Cependant, cet article démontre que les méthodes de recherche avec tabous peuvent être à la base de logiciels commerciaux pour la confection d'horaires.

Si les méthodes de recherche avec tabous ont été essayées pour la confection des horaires des infirmières, rien n'a été fait pour démontrer la performance de celles-ci sur le problème de confection des horaires individualisés des médecins de l'urgence. Ce mémoire essaie de combler ce besoin où les règles ergonomiques du travail posté doivent être respectées.

2.2 La recherche avec tabous

La recherche avec tabous ou recherche tabou (RT) est une métaheuristique. Elle combine une procédure de recherche locale avec des méthodes permettant de surmonter l'obstacle que représentent les optima locaux tout en évitant les retours cycliques.

Nous avons choisi la RT pour résoudre le problème de confection des horaires car lorsqu'on la compare à d'autres méthodes, c'est une méthode d'application assez facile et qui ne nécessite pas l'utilisation de principes mathématiques poussés. Par contre, pour obtenir de bons résultats avec cette méthode, on doit nécessairement avoir une bonne compréhension du problème et des méthodes de RT. La présente section décrit les principes de base de la recherche avec tabous.

2.2.1 Principes de la recherche avec tabous

Les principes de la RT ont été introduits il y a environs 15 ans par Glover [15] et d'une façon indépendante par Hansen [18] (sous le nom de "steepest ascent / mildest descent"). Nous présentons ci-après une brève définition de la RT, basée sur les articles de Soriano et Gendreau [33] et de Glover [16] [17].

La RT est une méthode métaheuristique, une méthode formée d'outils pour permettre de surmonter l'obstacle des optima locaux qu'une heuristique de recherche locale (HRL) atteint. En effet, quand la méthode trouve un optimum local, elle est capable de continuer la recherche et éventuellement de visiter d'autres solutions sans retomber sur le même optimum local, ce qui permet d'atteindre d'autres optima locaux. La RT a été utilisée pour résoudre de nombreux problèmes difficiles avec succès, surtout dans le domaine de l'optimisation combinatoire [32].

Soit un problème d'optimisation donné et X l'espace des solutions de ce problème, l'HRL explore l'espace X en se déplaçant d'une solution s, $s \in X$, à une nouvelle solution s' faisant partie du voisinage de s, $s' \in N(s)$. Ce voisinage $N(s)$ correspond à l'ensemble de toutes les solutions de X pouvant être obtenues par l'entremise d'une modification locale de s (cette modification locale est fonction de la modélisation du problème). La nouvelle solution s' sera choisie parmi les solutions de $N(s)$ comme étant celle ayant la meilleure valeur de la fonction objectif f qu'on cherche à optimiser

et non pas celle qui améliore le plus f comme c'est le cas des heuristiques de recherche locale. Ceci permet donc à la méthode de ne pas rester bloquée lorsqu'elle rencontre un optimum local, mais plutôt de continuer l'exploration vers d'autres régions de l'espace des solutions X.

En effet, si la solution courante est un optimum local, la méthode de RT va forcer le déplacement vers la moins mauvaise solution voisine, même si celle-ci dégrade la valeur de f. On sort ainsi de l'optimum local. Pour éviter que la procédure ne retombe tout de suite sur l'optimum local qu'on vient de quitter, la RT utilise la notion de mémoire. Ainsi, la méthode garde des informations sur les dernières solutions rencontrées dans une ou plusieurs listes. Ces informations sont alors utilisées afin d'interdire temporairement le retour de l'algorithme vers ces solutions les rendant ainsi "tabou" pour un temps limité (d'où le nom de la méthode). Les listes tabou ne contiennent généralement qu'une quantité limitée d'information et celle-ci est mise à jour dynamiquement au fur et à mesure de l'exploration. Si les listes sont bien définies et de longueur adaptée au problème à résoudre, elles vont permettre à la RT de sortir de la vallée où se trouvait l'optimum local et poursuivre la recherche de meilleures solutions dans de nouvelles vallées de X.

L'intensification et la diversification sont d'autres outils utilisés par la RT pour améliorer l'exploration de l'espace des solutions X. L'intensification fait une exploration plus profonde des régions du domaine qui ont été identifiées comme étant prometteuses. La diversification fait une transformation majeure à la solution courante pour être en mesure de sortir de la région dans laquelle on se trouve. Cet outil de la RT est présenté plus en détail à la section suivante.

2.2.2 La diversification dans la RT

Étant donné que la RT est basée sur une HRL et que la ou les listes tabous sont

de longueur limitée, il y a un risque que la méthode n'explore pas, ou du moins très peu, certaines régions du domaine des solutions. La diversification est un outil dont le but est de rediriger la recherche vers des régions du domaine peu ou pas explorées jusque-là. Soriano et Gendreau [32] ont montré l'importance de ce principe pour le développement d'un algorithme de RT vraiment efficace et robuste. Ils recensent trois façons différentes de l'implanter ([32] [33]) :

1. La façon la plus simple d'appliquer la diversification est d'arrêter la RT périodiquement pour changer la solution courante s par une autre solution s'. Cette dernière peut être une solution aléatoire ou, mieux, une solution choisie de façon intelligente (par exemple, une solution avec une structure intéressante ou prometteuse). On recommence alors la recherche à partir de cette nouvelle solution s'.

2. Une autre façon d'appliquer la diversification consiste à faire des modifications dans la fonction objectif. On peut ainsi lui ajouter un terme supplémentaire dans le but de favoriser les solutions ayant les caractéristiques rencontrées plus rarement ou bien de pénaliser celles ayant des caractéristiques se présentant souvent. Cette diversification est généralement utilisée de façon continue [13].

3. Une autre approche de diversification, elle aussi basée sur des modifications de la fonction objectif, est possible lorsque la fonction objectif contient des pénalités correspondants à certaines contraintes du problème qui ont été violées : c'est le principe de la relaxation lagrangienne [30] où l'on enlève des contraintes du problème mais en introduisant en même temps un terme dans la fonction objectif qui mesure et pénalise la violation de ces contraintes. Ainsi, en variant les poids associés aux contraintes, on peut modifier le processus de recherche : en augmentant les poids, on force le respect de ces contraintes et on se concentre alors sur la recherche de solutions réalisables; en diminuant les poids, on permet de violer plus facilement ces contraintes et on se permet ainsi de considérer "temporairement" des solutions non-réalisables donc potentiellement différentes. Ceci

a pour but de permettre de sortir plus facilement des vallées et poursuivre la recherche vers de nouvelles vallées. Ce type de diversification est également connu sous le nom d'oscillation stratégique [14]. Cette méthode peut être implantée de façon continue tel que présenté par Hertz et al. [19].

2.3 Définition du problème de confection d'horaire

Pour arriver à confectionner un bon horaire, il faut bien comprendre quel type de problème on essaie de résoudre et les éléments importants qui le composent. La confection d'horaires est, à la base, un problème d'affectation hautement combinatoire, soit l'affectation de quarts de travail à un groupe de travailleurs. Mais en plus, les affectations doivent respecter plusieurs contraintes. Dans le problème de confection d'horaires de médecins d'urgences, les quarts de travail doivent être affectés aux médecins en respectant une série de contraintes dites "dures", c'est-à-dire qu'elles ne peuvent en aucun cas être violées (par exemple, le nombre de médecins requis par quart de travail), et en minimisant les violations de contraintes dites souples, c'est-à-dire dont le respect est désirable mais pas absolument obligatoire (par exemple, les préférences de médecins).

Une particularité des problèmes de confection d'horaire est qu'ils n'ont pas, en général, une véritable fonction objectif. En effet, l'objectif est de trouver un horaire satisfaisant toutes les contraintes. S'il en existe plusieurs, les utilisateurs les considèrent alors comme équivalents et interchangeables. Toutefois, lorsqu'on intègre dans les contraintes du problème les règles ergonomiques et les préférences des individus, souvent conflictuelles, il devient généralement impossible de trouver un tel horaire parfait [27]. Il s'agit alors d'essayer de trouver l'horaire qui satisfasse "le plus" les différentes contraintes et préférences. Une façon naturelle de réaliser ceci est de relaxer les contraintes souples dont nous venons de parler et de les remplacer par des

fonctions de pénalité mesurant le degré de violation de ces contraintes. Ces pénalités sont ensuite intégrées dans une fonction objectif unique en les pondérant par un poids représentant leur importance relative les une par rapport aux autres en les additionnant. On cherchera ensuite à minimiser cette fonction de pénalité globale pondérée qui mesure en fait la "qualité" de l'horaire considéré. Carter et Lapierre [9] présentent le problème de confection d'horaires des médecins sans fonction objectif. Le but est de trouver un horaire qui respecte toutes les contraintes. Si un tel horaire n'existe pas le but est de trouver un horaire qui respecte les contraintes dures et minimise les violations des contraintes souples.

2.3.1 Variables de décision

Dans l'horaire, les variables de décision correspondent à l'affectation des quarts aux médecins. Le nombre et le type de quart est défini par l'hôpital. L'hôpital les définit en fonction de l'historique des patients qui arrivent à l'urgence et des prévisions des besoins. Les travaux de Vassilacopoulos [34] et Blake et Carter [5] proposent des méthodes pour calculer le nombre et type de quarts requis en fonction de l'historique des patients et du temps d'attente des patients. Toutefois, le nombre de médecins engagés par l'hôpital pour assurer les services de santé à l'urgence variera en fonction des préférences des médecins et de leur disponibilité. L'hôpital doit par contre s'assurer qu'il y a suffisamment de médecins pour suffire à la tache. Sinon, un corps médical surchargé ne permettra pas d'assurer de bons services d'urgence à la population.

Pour la confection d'horaires, il y a plusieurs façons de représenter les variables de décision selon la méthode de résolution utilisée (Carter et Lapierre [9] , Jaumard [21] et Dowsland [11]). Nous présentons deux façons naturelles de représenter les variables.

1. Représentation en variables entières :

   On note par Y la matrice de l'horaire (à deux dimensions) et on définit ses

éléments.

$$Y_{ij} = \begin{cases} k, \text{ si un quart du type } k \text{ est affecté au médecin } i \text{ pour le jour } j \\ \emptyset, \text{ si le médecin } i \text{ est en congé le jour } j \end{cases}$$

Cette forme de représentation est la façon générale de présenter ce type d'horaire dans laquelle les lignes représentent les médecins, les colonnes les jours de travail et les valeurs de la matrice représentent l'affectation retenue pour cette période-là, c'est-à-dire le type de quart de travail, un jour de congé ou un jour de vacances.

2. Représentation en variables binaires

   On note par X la matrice de l'horaire (à trois dimensions) et on définit ses éléments.

$$X_{ijk} = \begin{cases} 1, \text{ le médecin } i \text{ se voit affecter le jour } j \text{ un quart du type } k \\ 0, \text{ sinon} \end{cases}$$

   Cette représentation "simplifiée" est équivalente à la précédente, mais elle a l'avantage de faciliter l'expression mathématique du problème et de ses contraintes.

C'est pour cette raison que nous présentons la formulation mathématique du problème en terme de ces variables binaires bien que dans le développement et la présentation de notre approche de résolution, nous nous basons sur la représentation en variables entières. La représentation en variables entières peut être utilisée parce que les médecins ne peuvent pas travailler plus d'un quart de travail par jour. Dans le cas où on peut affecter plus d'un quart par jour à un utilisateur, la représentation en variables entières n'est évidemment pas adéquate.

2.3.2 Formulation mathématique

Tout d'abord, définissons les termes suivants :

I, l'ensemble des indices i représentant les médecins ;

J, l'ensemble des indices j représentant les jours de l'horaire;

K, l'ensemble des indices k représentant les types de quart de travail;

N, l'ensemble des contraintes souples;

X_{ijk}, la variable de décision à savoir si le médecin i travaille ou non le jour j durant le quart k;

$\overline{X_i}$, l'horaire du médecin i;

$C_n(\overline{X_i})$, la fonction quantifie le nombre de fois avec laquelle l'horaire $\overline{X_i}$ ne respecte pas la contrainte souple n;

P_{ni}, les valeurs des pénalités associées à la contrainte souple n du médecin i;

R_{jk}, le nombre total de quarts du type k qu'il faut affecter le jour j;

S_i, le nombre total de quarts que le médecin i doit réaliser;

T_{ik}, le nombre de quarts de type k que le médecin i doit réaliser.

Nous définissons deux contraintes d'horaire comme étant "dures", les autres étant "souples".

Les contraintes dures doivent toujours être respectées dans l'horaire. Si une contrainte dure n'est pas respectée, l'horaire est rejeté. Quand un horaire respecte les contraintes dures, on dit qu'il est réalisable. Voici les deux contraintes dures :

- Satisfaire la demande : s'assurer pour chaque jour de l'horaire que tous les quarts de travail requis ce jour-là sont affectés à un médecin.

$$\sum_{i \in I} X_{ijk} = R_{jk} \quad , \qquad \forall j \in J, k \in K$$

- Satisfaire le repos minimal : s'assurer qu'entre deux quarts de travail consécutifs il y a un minimum de 16 heures de repos (c.-à-d. entre la fin d'un quart et le début du quart suivant). Clairement, cette contrainte implique que les médecins ne peuvent pas travailler plus d'un quart de travail par jour. Toutefois, limiter

les médecins à un quart par jour n'est pas suffisant. Nous avons dû redéfinir cette contrainte en une partie "dure" et une partie "souple" de la façon suivante :

- La contrainte dure s'assure que chaque médecin travaille un seul quart par jour.

$$\sum_{k \in K} X_{ijk} \leq 1 \ , \qquad \forall i \in I, j \in J$$

- La contrainte souple s'assure de respecter le repos minimal de 16 heures entre deux jours de travail consécutif. Cette possibilité peut effectivement se présenter, comme le montre l'exemple suivant : un médecin travaille un jour le quart de soir (de 16h00 à 0h00) et le quart de jour (de 8h00 à 16h00) le jour suivant. Il y a seulement 8 heures de repos entre les deux (de 0h00 à 8h00). Cette violation est évaluée dans la fonction objectif où un poids très élevé y est associé afin de rendre cette contrainte "souple" très coûteuse à violer et donc la rendre "quasiment" dure.

Les contraintes souples représentent des caractéristiques de l'horaire que l'on juge "désirables". Leur respect n'est pas exigé mais souhaitable. Les contraintes souples forment la fonction objectif $f(\overline{X_i})$. La fonction objectif $f(\overline{X_i})$ mesure la qualité de l'horaire sous la forme d'une somme pondérée des différentes violations des contraintes souples. En effet, pour mesurer la qualité d'un horaire, on parcourt l'horaire en identifiant les contraintes souples qui ne sont pas respectées. La qualité d'un horaire est déterminée par le nombre de fois que cela se produit $C_n(\overline{X_i})$ et par les poids associés (P_{ni}) à chaque type de violation. Si un horaire est de très mauvaise qualité, on dira qu'il est "inacceptable". Les contraintes souples sont divisées en deux groupes :

- Les contraintes qui n'ont pas de relation avec les règles ergonomiques, soit le respect du contrat du médecin.
  - S'assurer que le nombre total de quarts dans l'horaire par médecin respecte

bien son contrat.

$$\sum_{j \in J} \sum_{k \in K} X_{ijk} = S_i \qquad \forall i \in I$$

- S'assurer que le nombre de quarts par type et par médecin respecte son contrat.

$$\sum_{j \in J} X_{ijk} = T_{ik} \qquad \forall i \in I, k \in K$$

- Les contraintes des règles ergonomiques (voir section 1.2).

Le problème de confection d'horaires peut alors se formuler comme suit :

$$Minimiser \quad \sum_{i \in I} f(\overline{X_i}) \;=\; \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} C_n(\overline{X_i}) \cdot P_{ni} \tag{2.1}$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{i \in I} X_{ijk} \;=\; R_{jk} \;, \qquad \forall j \in J, k \in K \tag{2.2}$$

$$\sum_{k \in K} X_{ijk} \;\leq\; 1 \;, \qquad \forall i \in I, j \in J \tag{2.3}$$

$$X_{ijk} \;\in\; \{0,1\} \;, \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \tag{2.4}$$

Dans le cas d'un horaire cyclique, l'horaire est unique. Il y a alors un seul vecteur horaire $\overline{X}$, une seule valeur de $f(\overline{X})$ et les poids sont définis pour un seul médecin, soit P_n. En conséquence, le problème de confection d'horaires cycliques est plus simple que le problème de confection d'horaires individualisés. Toutefois, qu'il s'agisse d'un horaire cyclique ou individualisé, le problème de confection d'horaires demeure très complexe. Ceci est dû au fait que (1) la fonction objectif est non-linéaire et (2)

les variables de décision sont entières (binaires dans cette représentation). Les deux chapitres suivants présentent notre recherche pour améliorer la qualité des horaires de l'Hôpital Charles-Lemoyne (chapitre 3) et de l'Hôpital Général Juif de Montréal (chapitre 4).

Chapitre 3

HORAIRES CYCLIQUES ERGONOMIQUES

Pour faire nos travaux de recherche sur les horaires cycliques ergonomiques, nous avons choisi de travailler conjointement avec les médecins de l'urgence de l'Hôpital Charles-Lemoyne (HCL). L'horaire utilisé à l'HCL est un horaire cyclique de qualité ergonomique élevée et relativement simple à faire manuellement. Toutefois, l'horaire comporte plusieurs fins de semaine de travail brisées et plusieurs fins de semaine de travail consécutives. Cependant, concevoir un horaire cyclique satisfaisant ces deux nouvelles règles en plus des règles existantes d'HCL fait en sorte que ce problème devient très difficile à résoudre. Il faut donc développer un algorithme capable de faire un tel horaire.

Labbé [25] a développé un premier algorithme de recherche avec tabous pour résoudre le problème de la confection d'horaires cycliques pour l'HCL. Son algorithme a réussi à confectionner un très bon horaire pour l'HCL. Toutefois, il n'a pas été capable de trouver d'aussi bons horaires pour des données légèrement différentes. Son algorithme demande donc à être amélioré, en particulier du point de vue robustesse.

Nous avons repris les travaux de Labbé [25] et utilisé une nouvelle approche pour pouvoir confectionner de bons horaires cycliques ergonomiques pour l'HCL et d'autres hôpitaux. Principalement, nous avons ajouté une phase de diversification par changement de poids, une phase de construction d'un horaire initial de meilleure qualité que celui utilisé par l'algorithme précédent ainsi que deux nouveaux types de voisinages. Ces modifications consistent essentiellement à élargir le domaine de solution exploré. Notre algorithme est plus flexible et robuste que l'algorithme de Labbé, et a même permis de trouver de meilleurs horaires pour le contexte d'HCL. De plus, nous avons développé un logiciel sur ACCESS 97 afin de générer facilement les documents de sortie nécessaires à l'utilisation directe des horaires pour l'HCL, soit les horaires avec les dates et les noms des médecins. Cet outil a été très utile pour l'implantation de nos horaires à l'HCL et a ainsi permis à nos horaires d'être utilisés depuis juin 1998.

La section 3.1 présente l'horaire des médecins de l'urgence de l'HCL ainsi que la méthode de confection d'horaires que l'HCL utilisait avant nos travaux. La section 3.2 présente la première application de la recherche avec tabous réalisée par Labbé [25] et notre analyse de cet algorithme. La section 3.3 présente le travail réalisé et l'algorithme résultant de nos recherches. De plus, le logiciel sur ACCESS 97 pour générer et gérer les horaires réels à l'HCL y est décrit.

3.1 Hôpital Charles-Lemoyne

L'Hôpital Charles Lemoyne (HCL) est un hôpital universitaire affilié à l'Université de Sherbrooke situé sur la rive sud de Montréal. Sa salle d'urgence est très achalandée car elle est l'un des quatre centres de traumatologie de la province de Québec, recevant ainsi des patients d'un très vaste territoire. Pour prodiguer ces soins d'urgence d'un haut niveau de complexité, l'HCL a réussi au fil des ans à recruter une équipe médicale de haut calibre. Fait à noter, HCL est un des rares hôpitaux au Québec dont la salle

d'urgence n'a pas de problèmes de rétention et de recrutement de médecins. La qualité des horaires est sûrement un facteur contribuant à cette situation. Dans cette section, nous présentons les détails du problème d'horaire des médecins d'urgence d'HCL. De plus, nous présentons la méthode de confection des horaires telle qu'utilisée par le Dr. A. Montminy, médecin-chef de l'urgence d'HCL au moment de nos travaux.

3.1.1 La demande en médecins

L'urgence d'HCL est fort occupée 24 heures sur 24, 7 jours par semaine. Évidement, il y a une baisse de l'achalandage durant la nuit par rapport au jour et au soir. De plus, les samedis et dimanches sont habituellement légèrement moins occupés que les autres jours de la semaine et le vendredi soir est souvent plus occupé. Pour desservir la population de l'urgence de l'HCL, il faut six médecins par jour travaillant selon les six quarts suivants (le chiffre entre parenthèses correspond à un code indicatif) :

- Jour (7) : 7h00 à 15h00
- Jour (8) : 8h00 à 16h00
- Midi (12) : 12h00 à 20h00
- Soir (16) : 16h00 à 0h00
- Soir (17) : 17h00 à 1h00
- Nuit (0) : 0h00 à 8h00 *

* Même s'il est réalisé dans la journée suivante, il est couramment identifié au jour avant. Toutefois le quart de nuit du vendredi est considéré un quart de fin de semaine et le quart de nuit de dimanche un quart de semaine.

Pour simplifier la confection des horaires, le nombre de médecins et les types de quarts de travail restent les mêmes pour les sept jours de la semaine malgré les fluctuations hebdomadaires. Pour satisfaire cette demande, 12 médecins à temps plein,

travaillant 3,5 quarts de travail par semaine, sont nécessaires. Toutefois, plusieurs médecins optent de travailler à l'urgence à temps partiel pour pouvoir également travailler en milieu clinique ou tout simplement pour travailler moins, par choix. Ainsi, à l'HCL, le nombre de médecins à l'urgence est d'environ 20.

3.1.2 Les règles de l'horaire

Les règles de confection de l'horaire des médecins de l'urgence d'HCL ne sont pas écrites, ni formellement définies. Les horaires actuels permettent de satisfaire toutes les règles suivantes :

- Affecter chaque quart à un seul médecin.
- Respecter la charge de travail de chaque médecin (temps plein, partiel, etc.).
- Avoir des séquences de travail d'un maximum de trois jours consécutifs.
- Ne pas avoir de jours de travail isolés.
- Avoir un congé avec un minimum de deux jours après une séquence de travail.
- Avoir, après une séquence de travail de nuit, un congé avec un nombre minimum de jours égal au nombre de nuits de la séquence plus un.
- Espacer les séquences de travail de nuit dans l'horaire.
- Observer, dans une séquence de travail consécutive, que les quarts soient d'un seul type (jour, midi, soir ou nuit).
- Faire les changements de quarts de travail vers l'avant (jour-midi-soir-nuit) plutôt que vers l'arrière (nuit-soir-midi-jour).

Ces règles respectent toutes les règles d'un horaire cyclique ergonomique présentées par Knauth [22] à l'exception des deux règles suivantes :

- Minimiser le nombre de fins de semaine de travail consécutives.
- Minimiser le nombre de fins de semaine brisées, c'est-à-dire où le médecin travaille une seule journée sur deux.

Ces deux dernières règles ne sont donc pas respectées dans les méthodes actuelles de confection des horaires de l'HCL. Toutefois, elles feront partie des règles que notre

algorithme devra satisfaire.

3.1.3 Méthode utilisé à l'HCL

La méthode utilisée à l'HCL est une méthode très simple et très efficace [9]. L'HCL a défini un horaire cyclique de base d'une durée de 37 jours pour tous les médecins. La confection de l'horaire de base est facile : 3 jours de travail consécutifs suivis de 3 jours de congé avec changement de quart de travail vers l'avant. Comme il y a six types de quarts de travail, cet horaire requiert donc 36 jours (6 x (3 jours de travail + 3 jours de congé)). La dernière séquence, soit celle de travail de nuit, doit toutefois être suivie de 4 jours de congé (i.e. longeur de la séquence plus un) ce qui donne ce total de 37 jours. Tous les médecins suivent ce même horaire de base qui est présenté à la figure 3.1, où les chiffres représentent le quart de travail et les X, les jours de congé.

Pour générer l'horaire détaillé, il suffit d'affecter les 12 médecins à temps plein aux différentes périodes de l'horaire de base, chaque période ayant une longueur de trois jours. L'affectation des médecins à l'horaire de base est représentée à la figure 3.2. À la fin de l'horaire, les 4 jours de congé suivant les 3 nuits de travail font une petite interférence demandant un treizième médecin travaillant à temps partiel pour combler ce surplus. Les 21 premiers jours de l'horaire détaillé sont présentés à la figure 3.3.

777 xxx 888 xxx 121212 xxx 161616 xxx 171717 xxx 000 xxxx

Figure 3.1 – Horaire de base

Pour obtenir les horaires des médecins à temps partiel, quelques horaires de médecins à temps plein sont divisés entre deux ou trois médecins. C'est une façon très simple de gérer les temps partiels. Ainsi, l'horaire d'un médecin à temps plein est divisé entre deux médecins, un travaillant 2 quarts sur 3 (2/3) et l'autre 1 quart sur

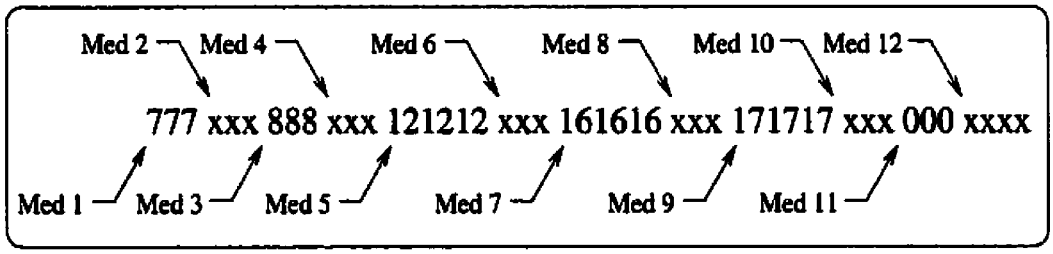

Figure 3.2 – Affectation des médecins à l'horaire de base

Med	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	...
1	7	7	7	x	x	x	8	8	8	x	x	x	12	12	12	x	x	x	16	16	16	...
2	x	x	x	8	8	8	x	x	x	12	12	12	x	x	x	16	16	16	x	x	x	...
3	8	8	8	x	x	x	12	12	12	x	x	x	16	16	16	x	x	x	17	17	17	...
4	x	x	x	12	12	12	x	x	x	16	16	16	x	x	x	17	17	17	x	x	x	...
5	12	12	12	x	x	x	16	16	16	x	x	x	17	17	17	x	x	x	0	0	0	...
6	x	x	x	16	16	16	x	x	x	17	17	17	x	x	x	0	0	0	x	x	x	...
7	16	16	16	x	x	x	17	17	17	x	x	x	0	0	0	x	x	x	x	7	7	...
8	x	x	x	17	17	17	x	x	x	0	0	0	x	x	x	x	7	7	7	x	x	...
9	17	17	17	x	x	x	0	0	0	x	x	x	x	7	7	7	x	x	x	8	8	...
10	x	x	x	0	0	0	x	x	x	x	7	7	7	x	x	x	8	8	8	x	x	...
11	0	0	0	x	x	x	x	7	7	7	x	x	x	8	8	8	x	x	x	12	12	...
12	x	x	x	x	7	7	7	x	x	x	8	8	8	x	x	x	12	12	12	x	x	...
13	x	x	x	7	x	x	x	x	x	8	x	x	x	x	x	12	x	x	x	x	x	...

7 et 8 : quarts de jour, 16 et 17 : quarts de soir
12 : quart de midi, 0 : quart de nuit et x : jour de congé

Figure 3.3 – Horaire détaillé, 21 premiers jours de l'horaire de 37 jours.

Med (2/3): 77x xxx 88x xxx 1212x xxx 1616x xxx 1717x xxx 00x xxxx

Med (1/3): xx7 xxx xx8 xxx xx12 xxx xx16 xxx xx17 xxx xx0 xxxx

Figure 3.4 – Horaire de base pour les médecins à temps partiel

3 (1/3), ou entre trois médecins, tous ayant le même travail de 1 quart sur 3 (1/3). Les cycles sont présentés dans la figure 3.4.

La méthode de confection utilisée à l'HCL a plusieurs bonnes caractéristiques :

- Conception facile de l'horaire.
- Comme l'horaire est cyclique, tous les médecins ont la même charge de travail et la même qualité d'horaire.
- L'horaire respecte toutes les règles ergonomiques pour la confection d'horaire sauf en ce qui concerne les fins de semaine.

L'horaire d'HCL pourrait seulement être amélioré sur deux aspects : les fins de semaine et les vacances. Du côté des fins de semaine, l'horaire d'HCL contient plusieurs fins de semaine de travail brisées, ce qui fait qu'au lieu d'avoir une fin de semaine de congé complète par deux semaines, il n'en a qu'une par trois semaines (voir figure 3.3). De plus, l'horaire comporte plusieurs séquences avec des fins de semaine de travail consécutives, allant jusqu'à quatre fins de semaines consécutives avec du travail. Concernant les vacances, les horaires cycliques ne sont pas conçus pour donner de longues séquences de congé aux médecins et il n'y a généralement pas de médecins supplémentaires pour venir travailler durant la période estivale. Il en va de même pour les demandes de jours de congé : les horaires sont faits sans tenir compte des périodes de non-disponibilité des médecins.

Tous les besoins individuels des médecins, concernant leurs horaires, sont comblés par des échanges de quarts de travail entre les médecins. Puisque l'horaire est donné longtemps à l'avance, les médecins d'HCL préfèrent la souplesse qu'offrent les échanges entre les médecins plutôt que de laisser cette tâche aux mains de celui qui fait les horaires. Par contre, des horaires avec une meilleure qualité ergonomique pour les fins de semaine seraient grandement appréciés par les médecins. Il est effectivement

difficile d'améliorer l'horaire pour les fins de semaine seulement par les échanges. Cet aspect de l'horaire est d'autant plus problématique pour les médecins qui ont des obligations familiales comme par exemple la garde des enfants une fin de semaine sur deux. Il est donc impératif d'avoir un meilleur horaire, c'est-à-dire un horaire d'aussi bonne qualité sur le plan ergonomique qu'offre l'horaire actuel avec, en plus, une fin de semaine de congé complète toutes les deux semaines.

3.2 Application de la recherche avec tabous

Labbé [25] a développé dans le cadre de son mémoire de maîtrise une application de la recherche avec tabous pour faire la confection d'un horaire cyclique de haute qualité pour HCL. Son algorithme a réussi à confectionner un horaire répondant à toutes les attentes de l'HCL et cet horaire a d'ailleurs été implanté en juin 1998.

Même si l'horaire généré pour HCL est très satisfaisant, l'algorithme a des limitations puisqu'il est très sensible aux valeurs des poids utilisés pour les pénalités. De légères modifications de ceux-ci entraînent des changements majeurs dans les horaires générés. Il a ainsi été difficile de lui faire générer d'aussi bons horaires pour un contexte (c'est-à-dire un jeu de données) légèrement différent à celui de l'HCL. Il est donc apparu clair qu'il fallait continuer à travailler sur cet algorithme de recherche avec tabous afin d'en améliorer la robustesse et c'est de ces améliorations que nous traitons dans ce chapitre. Toutefois, avant de présenter ces modifications nous allons d'abord rappeler brièvement les travaux de Labbé [25]. Nous décrivons tout d'abord la structure de données utilisée avant de présenter la fonction objectif et les voisinages utilisés par l'algorithme de recherche avec tabous. Nous terminons par une analyse de la performance de cet algorithme et identifions ses faiblesses.

3.2.1 La structure de données

L'horaire cyclique $f(\overline{X})$ est défini par une matrice A de taille m par n, dans laquelle les colonnes m représentent les jours de travail et les lignes n des segments d'horaires. La figure 3.5 montre un exemple d'un horaire cyclique (de mauvaise qualité) de 21 jours pour 12 médecins. Les valeurs possibles des éléments de la matrice A_{mn} sont :

- $x, x \in (7, 8, 12, 16, 17, 0)$, qui représente l'heure de début d'un quart de travail, le quart que doit réaliser le médecin le jour n (voir section 3.1.1).
- l'absence de valeur numérique, représente le fait que le médecin ne travaille pas le jour n ; c'est un jour de congé.

On remarquera que chaque colonne de l'horaire de la figure 3.5 contient exactement une fois chaque quart de travail du fait qu'il y a toujours 6 médecins travaillant à l'urgence de l'HCL par jour. Il est à noter également que la matrice aurait pu n'avoir que 7 colonnes plutôt que 21. La raison pour laquelle l'horaire cyclique est fait pour une période de 3 semaines est pour faciliter la séparation des horaires à temps plein en horaires pour médecins à temps partiel, c'est-à-dire la division d'un horaire entre deux (2/3 et 1/3) ou trois (1/3, 1/3 et 1/3) médecins.

Le choix de la structure de données a un impact important sur la performance de l'algorithme. Pour obtenir de bons résultats, les voisinages explorés par l'algorithme doivent être générés et analysés rapidement. Cette structure de données facilite les échanges de quarts de travail entre les lignes d'une même colonne. Explorer ce voisinage est une façon très facile et rapide de générer de nouvelles solutions, car les quarts sont toujours assignés à un seul médecin et satisfont la demande journalière des médecins en respectant toujours les deux contraintes du problème que nous avons défini comme dures (voir section 2.3.2). Cette structure de données est donc simple et répond à nos besoins.

Lignes	Colonnes (Jours)																				
Horaires	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
2																					
3	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
4																					
5	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
6																					
7	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
8																					
9	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
10																					
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12																					

Figure 3.5 – Matrice de l'horaire initial utilisé par l'algorithme de Labbé [25]

3.2.2 La fonction objectif

Le but de l'algorithme est de maximiser la fonction objectif qui indique la qualité de l'horaire. Pour calculer la qualité de l'horaire, nous utilisons le concept de violation des règles de confection de l'horaire (c.f. les contraintes souples identifiées à la section 2.3.2) : plus une règle est violée, plus l'horaire est de mauvaise qualité. Donc, le but de notre algorithme est de trouver l'horaire avec le moins de violations des règles de confection.

Puisque nous avons plusieurs règles d'horaire à respecter, le problème de pondération des contraintes se pose. Nous avons donc associé des poids aux contraintes souples (voir section 2.3.2). La valeur du poids associé à la contrainte détermine l'importance de la contrainte dans l'ensemble des contraintes : une contrainte importante aura un poids élevé pour pénaliser fortement sa violation. La fonction objectif $f(\overline{X})$ calcule la qualité de l'horaire en identifiant les contraintes non respectées dans l'ho-

raire $C_n(\overline{X})$ et, s'il y a lieu, en pénalisant leur violation avec le poids associé P_n ($f(\overline{X}) = \sum C_n(\overline{X}) \cdot P_n$).

Contrairement à Beaulieu et al. [3] et Jaumard et al. [21], les poids associés à chaque contrainte ne sont pas reliés directement aux préférences du médecin envers chaque règle de confection de l'horaire, mais plutôt en fonction de la qualité de l'horaire qu'on désire obtenir. L'ajustement des poids est donc très difficile en raison de l'inter-relation de certaines contraintes entre elles. Nous verrons plus en détail à la section 3.3.3 comment nous ajustons les poids P_n et définissons les fonctions $C_n(\overline{X})$.

3.2.3 Algorithme de Labbé

En utilisant les notations suivantes :

A , l'horaire courant ;

$F(A)$, la valeur de la fonction objectif associée à l'horaire A ;

Best_hor , le meilleur horaire trouvé jusque-là ;

Best_sol , la valeur de la fonction objectif de *Best_hor (F(Best_hor))* ;

Max_iter_initial et *Max_iter* , les critères d'arrêt (en nombre total d'itérations) de la phase de construction de l'horaire initial et de la phase de recherche avec tabous respectivement ;

voici l'algorithme de recherche avec tabous de Labbé [25] :

Algorithme de Labbé

Initialiser

A := horaire initial

Best_hor := A

Best_sol := F (A)

Listes tabous := $\emptyset$

Pour i=1 à Max_iter_initial

Voisinage-2

Début

Pour k = 1 à Max_iter

Voisinage-1 (Recherche locale)

Si best_hor n'a pas été amélioré depuis Y itérations alors

Voisinage-2 Ou Voisinage-3 (Diversification)

Retour

Fin

L'horaire initial utilisé est celui montré à la figure 3.5. La première boucle prend l'horaire initial de très mauvaise qualité et structure l'horaire avec les échanges du Voisinage-2 qui consiste à déplacer plusieurs quarts de travail à la fois (voir section 3.2.3.2) : c'est en quelque sorte une phase de construction de l'horaire initial. La deuxième boucle du programme contient l'algorithme principal qui est décrit dans les paragraphes suivants.

3.2.3.1 Recherche locale : Voisinage-1

Le Voisinage-1 est le coeur de l'algorithme de recherche avec tabous. Il permet d'effectuer des changements des quarts dans une seule colonne pour éviter d'explorer des horaires violant la contrainte sur le nombre de médecins par jour (quoique la logique de recherche avec tabous n'interdit pas cette option, il a été jugé que l'exploration d'un voisinage trop large nuirait plus qu'autre chose). Ce voisinage essaie donc tous les changements entre deux lignes d'une même colonne qui génèrent des horaires différents de l'horaire de départ, mais seulement une partie des colonnes d'un horaire sont visitées à chaque itération. Par échange possible du couple (u,v) on entend tout échange de couple qui génère un horaire différent. Voici le Voisinage-1 en pseudo code :

Procédure Voisinage-1

Choisir %p des colonnes de A

Pour chaque colonne choisie faire :

Pour tout couple de quarts (u,v) d'une même colonne faire :

Si le couple (u,v) est possible :

Permuter (u,v) ⇒ A'

Évaluer F(A')

Vérifier le statut dans les listes tabous

Si A' est minimal, (u',v') = (u,v)

Si A' est tabou mais F(A') < Best_sol, (u',v') = (u,v)

Modifier A en implantant le couple minimal (u',v')

Mettre à jour les listes tabous

Mettre à jour Best_hor et Best_sol si amélioration globale

Le paramètre %p définit le nombre de colonnes à explorer par le Voisinage-1 car l'exploration de toutes les colonnes est beaucoup trop coûteuse en temps pour pouvoir être effectuée systématiquement et elle ne donne pas de meilleurs horaires. Les %p colonnes sont choisies de façon aléatoire. Toutes les permutations sont évaluées car même si l'une s'avère "tabou", nous conservons cet échange si l'horaire est le meilleur jusqu'à présent (critère d'aspiration). Un exemple de l'exploration d'une colonne est montré à la figure 3.6.

Horaire de départ

	L	M	M	J	V	S	D
Hor 1	Jour	Jour					
Hor 2			***Jour***	Jour	Jour		
Hor 3						Jour	Jour

Application du Voisinage-1 à la colonne du mercredi

Première solution voisine (Permutation de Hor 1 et Hor 2)

	L	M	M	J	V	S	D
Hor 1	Jour	Jour	***Jour***				
Hor 2				Jour	Jour		
Hor 3						Jour	Jour

Deuxième solution voisine (Permutation de Hor 1 et Hor 3)
Elle n'est pas traitée parce que cette permutation
ne change pas l'horaire de départ

Troisième solution voisine (Permutation de Hor 2 et Hor 3)

	L	M	M	J	V	S	D
Hor 1	Jour	Jour					
Hor 2				Jour	Jour		
Hor 3			***Jour***			Jour	Jour

Figure 3.6 – Exemples des solutions voisines générées avec le Voisinage-1

3.2.3.2 Diversification : Voisinage-2

Pour le Voisinage-2, on permute des blocs horizontaux de deux ou trois cellules adjacentes. On choisit une colonne, on définit les blocs de deux ou trois cellules adjacentes, avec la colonne de gauche et la colonne de droite. On essaie tous les changements par blocs possibles entre deux lignes. Labbé utilise ce Voisinage-2 comme premier niveau de diversification et pour initialiser l'horaire. Un exemple d'exploration de ce voisinage est montré aux figures 3.7 et 3.8. Voici le Voisinage-2 en pseudo code :

Procédure Voisinage-2

Choisir %q des colonnes de A

Pour chaque colonne choisie faire :

Pour chaque couple de bloc3 d'une même colonne faire

A' := A

Si la permutation pour le bloc3 est possible :

Permuter bloc3 ⇒ A'

Si A' est minimal, bloc' := bloc3

Si A' est tabou mais F(A')< Best_sol, bloc' := bloc3

Pour chaque couple de bloc2 d'une même colonne faire

A' := A

Si la permutation pour le bloc2 est possible :

Permuter bloc2 ⇒ A'

Si A' est minimal, bloc' := bloc2

Si A' est tabou mais F(A') < Best_sol, bloc' := bloc2

Implanter la permutation minimale (bloc') dans A

Mettre à jour les listes tabous

Mettre à jour Best_hor et Best_sol si amélioration globale

De façon similaire à Voisinage-1, il serait trop coûteux en temps de permettre d'évaluer la totalité du Voisinage-2 (c.-à-d. de tester les permutations de blocs 2 et 3 pour toutes les colonnes de l'horaire). Donc, seulement une fraction des colonnes de l'horaire sont analysées. Le paramètre $\%q$ définit le nombre de colonnes à analyser. Ces colonnes sont choisies d'une façon aléatoire.

Horaire de départ

Hor	L	M	M	J	V	S	D
1	J	J					
2			***J***	J	J		
3						J	J

Application du Voisinage-2 à la colonne du mercredi (M)

Solutions voisines obtenues par permutation de bloc3 (M+M+J)

Hor	L	M	M	J	V	S	D
1	J		***J***	***J***			
2		***J***			J		
3						J	J

Hor	L	M	M	J	V	S	D
1	J						
2				J	J		
3		***J***				J	J

Hor	L	M	M	J	V	S	D
1	J	J					
2					J		
3			***J***	***J***		J	J

Figure 3.7 – Exemples des solutions voisines générées avec le Voisinage-2, bloc3

Horaire de départ

Hor	L	M	M	J	V	S	D
1	J	J					
2			***J***	J	J		
3						J	J

Application du Voisinage-2 à la colonne du mercredi (M)

Solutions voisines obtenues par permutation de bloc2

(M+M et M+J) entre les lignes Hor1 et Hor2

Hor	L	M	M	J	V	S	D
1	J		***J***				
2		***J***		J	J		
3						J	J

Hor	L	M	M	J	V	S	D
1	J	J	***J***	***J***			
2					J		
3						J	J

Solutions voisines obtenues par permutation de bloc2

(M+M et M+J) entre les lignes Hor1 et Hor3

Hor	L	M	M	J	V	S	D
1	J						
2			J	J	J		
3		***J***				J	J

Note :L'autre permutation n'est pas traitée parce qu'elle ne change pas l'horaire de départ

Solutions voisines obtenues par permutation de bloc2

(M+M et M+J) entre les lignes Hor2 et Hor3

Hor	L	M	M	J	V	S	D
1	J	J					
2				J	J		
3			***J***			J	J

Hor	L	M	X	J	V	S	D
1	J	J					
2					J		
3			***J***	***J***		J	J

Figure 3.8 – Exemples des solutions voisines générées avec le Voisinage-2, bloc2

3.2.3.3 Diversification : Voisinage-3

Ce voisinage change un bloc de trois colonnes adjacentes, mais seulement pour des blocs commençant par un quart de nuit. Ce voisinage essaie de changer le positionnement des nuits dans l'horaire, parce qu'on a constaté en cours d'expérimentation qu'on n'arrivait pas souvent à les déplacer en raison des fortes pénalités qu'engendrent ces déplacements par rapport aux autres modifications. Labbé utilise ce voisinage comme le deuxième niveau de diversification, lorsque le Voisinage-2 ne réussit pas à améliorer l'horaire. Ces changements dans le positionnement des nuits permet d'explorer d'autres parties du domaine de solutions et, éventuellement, de trouver de meilleurs horaires. Voici le Voisinage-3 en pseudo code :

Procédure Voisinage-3

Parcourir l'horaire jusqu'au prochain quart de nuit

Identifier bloc3 (3 quarts)

Pour chaque couple de bloc3 d'une même colonne faire

A' := A

Si la permutation pour le bloc3 est possible :

Permuter bloc3 ⇒ A'

Évaluer A'

Vérifier le statut dans les listes tabou

Si A' est minimal, bloc' = bloc3

Si A' est tabou mais F(A') < Best_sol, bloc'= bloc3

Implanter la permutation minimale (bloc') dans A

Mettre à jour les listes tabous

Mettre à jour Best_hor et Best_sol si amélioration globale

3.2.4 Analyse de l'algorithme de Labbé

L'algorithme de Labbé a confectionné un très bon horaire satisfaisant les médecins de l'HCL qui l'ont adopté en juin 1998. Cet horaire, montré à la figure 3.9, respecte les mêmes règles que l'ancien horaire de l'HCL mais, en plus, il ne compte aucune fin de semaine brisée ni fins de semaine de travail consécutives. Cependant, notre analyse de cet algorithme démontre un besoin d'amélioration au niveau de sa répétabilité et sa flexibilité pour résoudre d'autres horaires dans un contexte différent.

Au niveau du temps de calcul, l'algorithme de Labbé est assez performant. Ainsi, il faut une heure de calcul sur une station de travail Sun "Ultra10" pour obtenir le meilleur horaire. Le nombre d'itérations est de 1000, ce qui représente approximativement $\simeq 3 \cdot 10^6$ horaires analysés par l'algorithme, une toute petite portion du domaine des solutions (le nombre total de possibilités est estimé à $2 \cdot 10^{122}$). L'algorithme a donc été capable de trouver une bonne solution en analysant très peu de solutions et ce, dans un temps raisonnable.

Nous avons testé la robustesse de cet algorithme en faisant des essais pour obtenir d'autres horaires pour l'HCL. Ainsi, nous avons exécuté plusieurs fois l'algorithme en modifiant, à chaque résolution, le germe d'initialisation du générateur des nombres aléatoires et l'horaire initial (figure 3.5, permutant certaines lignes de l'horaire initial utilisé par Labbé). Les horaires obtenus à chaque résolution ont eu des qualités très variées. Cette variabilité dans la qualité des horaires obtenus est causée par le fait que lorsque l'algorithme arrive dans un optimum local, bon ou mauvais, il a du mal à en sortir. En effet, la diversification avec le Voisinage-2 et le Voisinage-3 n'est pas efficace pour sortir l'algorithme des optimum locaux. Ceci démontre le besoin d'augmenter la robustesse de l'algorithme.

Nous avons également exploré l'hypothèse qu'une mauvaise détermination de poids pouvait être une cause des faiblesses de l'algorithme. Mais des changements dans les

	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D
Hor 1	12	12	12			17	17			0	0				7	7	7			12	12
Hor 2			16	16	16				7	7			17	17			0	0			
Hor 3	8	8	8			12	12			16	16	16			0	0				7	7
Hor 4			17	17	17			0	0				8	8	8			12	12		
Hor 5	16	16			0	0	0				8	8			12	12	12			17	17
Hor 6			0	0				8	8	8			12	12			17	17	17		
Hor 7		7	7			16	16				7	7			17	17				8	8
Hor 8	7			12	12			16	16				7	7			16	16	16		
Hor 9	0	0				8	8			17	17	17				8	8			16	16
Hor 10				7	7			17	17			0	0	0				8	8		
Hor 11	17	17				7	7	7			12	12			16	16			0	0	0
Hor 12				8	8			12	12	12			16	16				7	7		

7 et 8 : quarts de jour, 16 et 17 : quarts de soir

12 : quart de midi, 0 : quart de nuit et 'nulle' : jour de congé

Figure 3.9 – Meilleur horaire confectionné avec le premier algorithme pour l'HCL

valeurs des poids nous donnent la même variabilité dans la qualité des horaires obtenus. Ces essais nous ont toutefois démontré qu'un seul ensemble de poids, représentant l'importance hiérarchique de chaque contrainte, n'est probablement pas suffisant. Ainsi, varier les poids durant l'exécution de l'algorithme permettra probablement d'augmenter la performance de l'algorithme.

Nos analyses nous font conclure que la principale faiblesse de l'algorithme de Labbé est qu'il examine seulement une petite partie du domaine de solutions, parce que l'algorithme ne peut pas sortir facilement de certains optima locaux. Les causes ont trois origines données par ordre d'importance : (1) la diversification (Voisinage-2 et Voisinage-3) ne permet pas vraiment d'examiner d'autres parties du domaine ; (2) la solution initiale et les nombres aléatoires ont une influence importante sur l'horaire résultant, mais l'algorithme de Labbé utilise toujours le même horaire initial et la même liste de nombres aléatoires ; (3) le voisinage permet des changements dans seulement quelques directions, limitant les recherches à un environnement très local. Dans la section suivante, nous présentons les améliorations que nous avons apportées à l'algorithme de Labbé.

3.3 Nouvelle approche

Nos travaux de recherche ayant débuté avec l'analyse de l'algorithme de Labbé, nous présentons les détails de nos expérimentations sur l'algorithme afin de mieux comprendre les raisons des modifications apportées. Ainsi, notre algorithme comporte de nouveaux outils : la diversification par changements de poids, une nouvelle phase de construction de l'horaire initial et deux nouveaux voisinages. Ces changements ont grandement augmenté la flexibilité et la robustesse de l'algorithme, c'est-à-dire qu'il a été capable de confectionner un meilleur horaire pour l'HCL et de bons horaires pour d'autres contextes.

Nos premiers essais ont été orientés sur l'analyse de l'algorithme de Labbé. Au début de nos analyses, nous avons observé une faible robustesse dans l'algorithme que nous avons initialement cru provenir d'une mauvaise détermination des poids. Nos premiers essais sur la détermination des poids n'ont pas pu faire disparaître les faiblesses de l'algorithme. Ils nous ont plutôt montré la difficulté d'analyser les résultats et l'algorithme en même temps : nous avons donc décidé de décortiquer le problème pour faciliter l'analyse. Nous avons ainsi travaillé avec un horaire avec un seul quart, soit le quart de nuit. Ce travail a été très fructueux car nous avons découvert plusieurs caractéristiques du problème. Ceci nous a amenés à développer une diversification par changements de poids et deux nouveaux voisinages. Finalement, nos dernières expérimentations ont porté sur la phase initiale de l'algorithme de Labbé afin d'y introduire les assises nécessaires à un bon horaire ergonomique. Nous avons travaillé sur l'approche de Labbé, soit l'utilisation d'un algorithme d'initialisation en une seule étape, et essayé une approche de construction de l'horaire initial par étapes, ajoutant graduellement de nouveaux quarts de travail à chaque étape. Les résultats de toutes ces expérimentations nous ont amenés au développement de la nouvelle approche, soit un algorithme de recherche avec tabous beaucoup plus performant que celui de Labbé.

Notre algorithme est plus flexible et robuste que celui de Labbé parce qu'il explore un domaine de solutions plus vaste tout en perdant moins de temps dans les domaines de solutions peu attrayants. Nous obtenons ces meilleurs résultats grâce à l'ajout d'une vraie phase de construction de l'horaire initial, l'utilisation de deux nouveaux voisinages, l'ajout d'une phase de diversification par changement de poids, la résolution multiple de l'algorithme principal et, finalement, un meilleur ajustement des poids dans l'algorithme afin d'obtenir l'horaire final désiré.

Notre algorithme est plus performant que celui de Labbé à plusieurs égards. Tout d'abord, notre algorithme génère de meilleurs horaires cycliques pour le même contexte de l'HCL étudié par Labbé. De plus, il faut moins de temps de travail pour adapter le nouvel algorithme à d'autres urgences et pour obtenir un horaire de bonne qualité. Finalement, notre algorithme génère des horaires de très bonne qualité pour d'autres contextes. Nous avons ainsi fait la confection d'horaires pour d'autres scénarios de l'HCL et pour le contexte de l'HGJ.

3.3.1 Expérimentations

Le travail que nous avons réalisé pendant plusieurs mois a donné comme résultat un nouvel algorithme. Notre recherche a été un processus d'expérimentations selon les étapes suivantes : (1) améliorations de la fonction objectif utilisée pour la confection de l'horaire, (2) analyse du problème d'horaire décortiqué en sous-problèmes, (3) analyse de la phase initiale de l'algorithme. Tout ce travail nous a aidés à comprendre plus à fond le problème et l'algorithme de recherche avec tabous de Labbé. Nous avons ainsi pu développer, par la suite, des outils qui ont amélioré les performances de l'algorithme de Labbé dans un nouvel algorithme que nous appelons la "nouvelle approche".

3.3.1.1 Amélioration de la fonction objectif

Après avoir compris l'algorithme de Labbé, nous avons débuté nos expérimentations en travaillant à améliorer la fonction objectif. Suite à l'implantation de l'horaire présenté à la figure 3.9 à l'urgence de l'HCL, les médecins se sont plaints de la répartition des quarts de travail de nuit dans l'horaire. Ainsi, il arrive que les médecins doivent travailler deux groupes de nuits dans une période très courte. Avec l'ancienne méthode de confection des horaires, les quarts de nuits étaient bien espacés, une propriété de l'horaire qu'on aimerait bien retrouver à nouveau, tout en conservant toutes les autres améliorations bien entendu. Nous avons donc modifié la contrainte de la distribution des nuits. Plus précisément, nous avons remplacé la contrainte requérant d'avoir au minimum 14 jours entre deux groupes de nuits par celle d'avoir au minimum 24 jours et au maximum 27 jours entre deux groupes de nuits. La nouvelle fonction objectif devrait nous permettre de faire la confection de meilleurs horaires pour l'HCL, mais il faut vérifier le tout par des expérimentations.

Nous avons donc fait des expériences avec cette nouvelle fonction objectif intégrée à l'algorithme de Labbé, mais aucun de ces essais nous a donné un horaire satisfaisant. Pour connaître l'origine de ces mauvais résultats, nous avons remis la fonction objectif initiale et analysé les changements des quarts de nuit dans l'horaire. Il s'avère que l'algorithme de Labbé a beaucoup de difficultés à déplacer les quarts de nuit sauf durant la phase initiale de l'algorithme. Le problème est que, lorsqu'il trouve une distribution des nuits assez bonne, la seule façon de l'améliorer passe par une dégradation très marquée de l'horaire en raison de l'inter-relation de nos différentes contraintes présentées dans la fonction objectif. Comme la dégradation de la distribution des nuits diminue beaucoup la qualité de l'horaire, l'algorithme préfère d'autres dégradations moins coûteuses avant de modifier la distribution des nuits. Cette situation a été identifiée par Labbé : il a ainsi développé les Voisinage-2 et Voisinage-3 pour modifier la structure des nuits. En effet, le Voisinage-2 et le Voisinage-3 font

des changements dans la structure des nuits. Mais, en dehors de la phase initiale de l'algorithme, ces transformations ne sont pas suffisamment profondes parce que l'algorithme revient toujours à la même distribution des nuits.

L'algorithme avec l'objectif modifié nous a confectionné des horaires de qualité bien moindre qu'avec la fonction objectif de Labbé. La modification de cette contrainte augmente donc le niveau de difficulté de la résolution du problème, mais la baisse de performance de l'algorithme est difficilement explicable. Pour faire un bon diagnostic de l'algorithme nous avons décidé d'analyser des versions simplifiées du problème.

3.3.1.2 Problème décortiqué

Nous avons donc travaillé avec des problèmes plus simples pour mieux comprendre le problème des horaires cycliques et les mécanismes de la recherche avec tabous. Nous avons tout d'abord travaillé avec un horaire dans lequel il faut affecter seulement les quarts de nuit. Ce travail nous a donné beaucoup d'expérience et nous avons ainsi pu développer des outils très importants pour notre algorithme : la diversification par changement de poids et deux nouveaux voisinages. Nous présentons nos expérimentations en ordre chronologique.

L'horaire simplifié que nous avons tout d'abord utilisé comporte seulement les quarts de nuit. Cet horaire est illustré à la figure 3.10. Cette simplification de l'horaire nous permet de réduire le nombre de contraintes composant la fonction objectif. Nous avons ainsi débuté nos essais en enlevant de la fonction objectif de l'algorithme de Labbé la contrainte de changement de quarts vers l'avant (cycle ergonomique) et nous avons remplacé la contrainte de distribution des nuits par la nouvelle. Avec seulement les nuits, l'horaire contient plus de "cases vides", ce qui permet à l'algorithme d'explorer un pourcentage plus grand du domaine des solutions concernant les nuits, et ainsi d'augmenter la possibilité de trouver une bonne solution. En effet,

les horaires obtenus lors des premiers essais avec le problème simplifié aux quarts de nuit sont de meilleure qualité au niveau des nuits. Toutefois, les résultats ne sont pas optimaux, soit l'obtention d'un horaire avec une pénalité égale à zéro. Comme nous croyons que cet horaire optimal existe, nous avons poussé plus loin notre analyse de l'algorithme.

En analysant le processus de construction de l'horaire, nous avons découvert qu'il fallait mieux guider l'algorithme lors du placement des nuits. Nous avons alors décidé d'ajouter une contrainte dans la fonction objectif qui vérifie en combien de groupes de travail les quarts de nuit sont divisés et pénalisés l'horaire si le nombre de groupes n'est pas "optimal". En effet, avec les métaheuristiques, l'ajout d'une contrainte peut faciliter la recherche d'une bonne solution en réduisant l'espace de recherche. Toutefois, elle peut également augmenter la difficulté de l'exploration en réduisant les possibilités de déplacement vers d'autres solutions. Au début, nous avons pensé que le nombre optimal de groupes était de 10 (9 groupes de 2 quarts et 1 groupe de 3 quarts, pour un total de 21 quarts). Cette distribution des nuits maximise les groupes de 2 nuits consécutives, ce qui est mieux pour les médecins. Mais, il a été impossible de confectionner un horaire optimal avec ce nombre parce que les fins de semaines doivent être complètes (travailler samedi et dimanche) et que les semaines ont 7 jours. Conséquemment, si les fins de semaine sont complètes, le nombre de groupes de nuits optimal est de 9 (6 groupes de 2 quarts et 3 groupes de 3 quarts égal à 21 quarts) parce qu'il faut un groupe de 3 nuits pour chaque semaine de 7 jours.

Cependant, l'ajout de la contrainte du nombre de groupes des quarts de nuit égal à 9 n'a pas permis à l'algorithme de trouver l'horaire optimal. Nous avons donc décidé de relaxer un peu la contrainte de distribution des nuits. Comme nous connaissons le nombre de groupes optimal, nous pouvons calculer le nombre optimal de jours entre deux groupes de nuits consécutives soit 25 ou 26. Le détail de ce calcul est le sui-

vant : (a) calculer le nombre de jours libres dans l'horaire soit 12 lignes fois 21 jours égal 252, moins les 21 nuits de travail égal 231 jours libres et (b) calculer le nombre de jours maximum entre deux groupes consécutifs soit 231 jours libres divisé par 9 groupes égal 25,6 jours (25 ou 26). Mais l'algorithme ne peut pas obtenir des horaires avec des nuits espacées de 25 ou 26 jours. Ceci est causé par la structure même de l'horaire cyclique, c'est-à-dire qu'il y a un conflit entre le nombre de jours entre les quarts de nuit (25 ou 26), le nombre de colonnes (21) et les fins de semaine complètes. La solution que nous avons adoptée est une relaxation de la contrainte permettant qu'il y ait de 22 à 29 jours entre deux groupes de nuit.

Avec le nouvel objectif, notre algorithme trouve maintenant des horaires optimaux (une pénalité égale à zéro). Mais, la distribution de la qualité des horaires générés est très large, montrant le peu de robustesse de la part de notre algorithme. En analysant les causes de cette faiblesse, nous avons réussi à détecter que notre algorithme a un problème pour modifier le nombre de jours libres entre les groupes. Une caractéristique intéressante de la méthode de résolution est que l'horaire est évalué de façon horizontale, lisant l'horaire ligne à ligne, tandis que les changements sont faits par changements verticaux. La modification du nombre de jours de congé entre les nuits avec des changements verticaux isolés est une tâche très compliquée. Nous avons développé une nouvelle méthode de recherche qui choisit des colonnes et des lignes dans l'horaire de façon "intelligente" pour que les déplacements verticaux de quarts donnent l'impression de déplacements horizontaux. Cette méthode cherche les groupes de nuits et identifie plusieurs colonnes de l'horaire, généralement non adjacentes, pour finalement faire des modifications qui changent principalement la distribution des nuits dans l'horaire. Cette méthode requiert l'utilisation de deux nouveaux voisinages, les Voisinage-4 et Voisinage-5 qui sont décrits plus en détail dans les sections 3.3.2.4 et 3.3.2.5 respectivement. Ces deux nouveaux voisinages ont grandement amélioré la qualité des horaires confectionnés.

Nous avons fait par la suite des essais avec les ajouts (nouvelles contraintes et les deux nouveaux voisinages) toujours sur le problème simplifié. Si les résultats sont meilleurs, la variabilité dans la qualité des horaires nous montre que l'algorithme a encore de la difficulté à sortir des optima locaux. Ces essais nous montrent que les derniers horaires possèdent beaucoup de similitude au niveau de la structure. Ceci semble provenir de l'incapacité de l'algorithme à ressortir d'une vallée lorsqu'il arrive dans un optimum local, bon au mauvais, avec les outils à sa disposition. Il reste alors "captif" dans cet optimum local et ne réussi pas à briser cette structure que nous appelons "inamovible". Pour que l'algorithme soit capable de modifier profondément la structure d'une solution, nous avons développé une nouvelle diversification en changeant les poids des contraintes. Le principe de cette diversification est la variation de certains poids pendant quelques itérations afin de modifier cette structure inamovible de l'horaire. Nous décrivons plus en détail cet outil à la section 3.3.2.6.

Avec la mise en oeuvre des nouvelles contraintes, des nouveaux voisinages et de la diversification par changement de poids dans l'algorithme, nous avons réussi à obtenir des résultats très satisfaisants sur le problème simplifié aux quarts de nuit. Nous présentons un de nos horaires à la figure 3.10. Nous avons ensuite intégré ces améliorations à l'algorithme afin de résoudre le problème avec tous les quarts de travail. Nous obtenons des horaires de travail de bonne qualité. Mais, on peut faire encore mieux.

3.3.1.3 Phase initiale de l'algorithme

Nous décrivons ici les travaux effectués sur la phase initiale de l'algorithme. L'objectif était de comparer la performance de la stratégie consistant à bâtir l'horaire initial par étapes, en ajoutant de nouveaux quarts à chaque étape, à celle consistant

Hor	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D
1		0	0	0																	
2												0	0								
3																					0
4	0																				
5							0	0	0												
6														0	0						
7																			0	0	
8																					
9					0	0															
10										0	0										
11																					
12																0	0	0			

Figure 3.10 – Horaire avec seulement les quarts de nuits

à utiliser un algorithme d'initialisation de l'horaire travaillant avec tous les quarts à la fois (comme dans l'approche précédente). Nous élaborons ci-dessous sur chacune des méthodes.

Nous avons testé différentes stratégies de construction par étapes pour confectionner l'horaire initial de l'HCL. Nous avons toujours gardé le principe général de débuter avec seulement les quarts de nuits et ensuite d'ajouter les autres quarts de différentes manières. Les variantes que nous avons testées sont les suivantes :

E1 - Ajouter tous les autres quarts en même temps : à partir d'un bon horaire avec les nuits, nous ajoutons tous les autres quarts de travail.

E2 - Ajouter un quart à la fois : à partir d'un bon horaire avec les nuits, nous ajoutons les quarts de jour, suivi d'une optimisation, après nous ajoutons les quarts de soir, suivi d'une optimisation, et, finalement, les derniers quarts de midi.

E3 - Ajouter les fins de semaine et ensuite les quarts de la semaine : à partir de l'horaire avec les nuits, nous ajoutons les quarts des fins de semaine pour obtenir

une structure qui respecte les contraintes des fins de semaine. Nous terminons par l'ajout des quarts de la semaine.

Nous avons également essayé une stratégie différente, soit celle de ne pas débuter avec les quarts de nuits.

E4 - Débuter avec les fins de semaines et ensuite le reste des quarts. Pour la difficulté à obtenir une bonne affectation des quarts de fin de semaine, nous confectionnons un horaire avec seulement les quarts de fin de semaine y compris les nuits de fin de semaine et, après, on ajoute les quarts de travail de la semaine.

Dans les essais avec cette méthode, nous utilisons l'algorithme de recherche avec tabous régulier sauf que nous n'utilisons pas la diversification par changement de poids parce qu'elle détruit la structure de l'horaire que nous voulons garder en phase initiale. Une comparaison des différentes stratégies présentées nous indique que les meilleurs résultats sont obtenus par E3, suivi de E1, E4 et E2. La stratégie E2 s'avère fort longue parce que la structure des quarts de travail est détruite chaque fois qu'on ajoute un autre quart de travail, sauf pour la structure des quarts de nuit.

En travaillant sur la stratégie E3, nous nous sommes aperçus que certains horaires avec les nuits de très bonne qualité ont les nuits des fins de semaines mal placées pour pouvoir respecter la contrainte optimale de ne pas avoir de fins de semaine de travail consécutives. Pour respecter la contrainte des fins de semaine non consécutives pour le contexte de l'HCL (12 médecins pour combler 6 quarts par jour), cela signifie que les médecins travaillent une fin de semaine sur deux, c'est-à-dire qu'ils travaillent les fins de semaine paires ou impaires de l'horaire. En conséquence, certains horaires de nuits ont des fins de semaine paires et impaires pour un même médecin, générant une pénalité que l'algorithme ne peut pas éliminer. Nous avons résolu le problème en rejetant les horaires initiaux qui ne respectent pas cette propriété (on ne tient pas compte de cette contrainte lors de l'exécution de l'algorithme). Nous exécutons donc l'algorithme de la phase initiale jusqu'à ce qu'on trouve un horaire satisfaisant les

contraintes sur les congés des fins de semaine.

Avec cette nouvelle phase d'initialisation, soit la stratégie de construction par étape en débutant avec les quarts de nuit, suivi des quarts de fin de semaine et des autres quarts de la semaine, nous obtenons de très bons horaires. Avec ces modifications, l'algorithme de Labbé a été grandement amélioré tant au niveau de la qualité des horaires qu'au niveau de la flexibilité et de la robustesse. En fait, l'algorithme résultant n'a plus que de vagues similitudes avec l'algorithme original de Labbé.

Il ne reste plus qu'à tester et améliorer la stratégie d'initialisation telle que proposée par Labbé, soit une initialisation en une seule phase avec un horaire initial complet mais de mauvaise qualité. Dans la phase d'expérimentation sur l'algorithme d'initialisation à une seule étape, nous avons tout d'abord analysé les premiers déplacements que l'algorithme fait dans l'horaire initial de mauvaise qualité. Il s'avère que les premiers déplacements avec le Voisinage-1 améliorent la qualité de l'horaire. Toutefois, comme les déplacements sont faits dans une seule colonne, plusieurs groupes de travail d'un seul jour sont générés, ce qui produit beaucoup de pénalités dans des contraintes de deuxième ordre, soit des contraintes de moindre importance. Nous avons alors plutôt essayé déplacer des blocs de 2 ou 3 colonnes de large à la fois, soit le Voisinage-2 de Labbé, pour accélérer l'obtention du premier optimum local. Une comparaison des deux façons de travailler a montré que l'utilisation du Voisinage-2 au début de la phase initiale accélère l'obtention du premier optimum local et ainsi améliore la qualité de l'horaire. Cela signifie que la structure "inamovible" de l'horaire a une meilleure qualité, ce qui fait que les horaires finaux ont aussi une meilleure qualité parce que l'algorithme explore des parties plus intéressantes du domaine des solutions. Les détails de cette phase telle qu'implantée dans notre algorithme sont présentés à la section 3.3.2.1.

Nous avons comparé les deux méthodes de confection des horaires initiaux, soit par construction ou dans une seule étape. La qualité des horaires confectionnés par les deux méthodes est similaire, mais le temps de confection est supérieur avec la méthode de construction par étape. Nous avons donc implanté dans notre algorithme la phase d'initialisation d'une seule étape.

Le travail réalisé pendant l'expérimentation nous a donné une grande connaissance du problème de confection des horaires cycliques ainsi que sur la recherche avec tabous. Après tout le travail de recherche réalisé, nous avons transformé l'algorithme de Labbé petit à petit, ajoutant un outil à la fois afin d'augmenter la robustesse et la flexibilité de l'algorithme. Ce nouvel algorithme, que nous appelons "nouvelle approche", est présenté en détail dans les sections suivantes.

3.3.2 Nouvelle approche

Avant de présenter la nouvelle approche, nous présentons les contraintes souples qui forment notre fonction objectif et mesurent la qualité de l'horaire. Voici les contraintes souples de notre fonction objectif :

- Avoir des séquences de travail d'un maximum de trois jours consécutifs.
- Ne pas avoir de jour de travail isolé.
- Avoir un congé minimum de deux jours après une séquence de travail.
- Avoir un congé minimum de trois jours après une séquence de travail de nuit.
- S'assurer que dans une séquence de travail les quarts soient d'un seul type (jour, soir, midi ou nuit).
- Faire les changements de quarts de travail vers l'avant (jour-midi-soir-nuit) plutôt que vers l'arrière (nuit-soir-midi-jour). Cet ordre ergonomique et les variantes qui sont acceptées sont présentés à la figure 3.11.

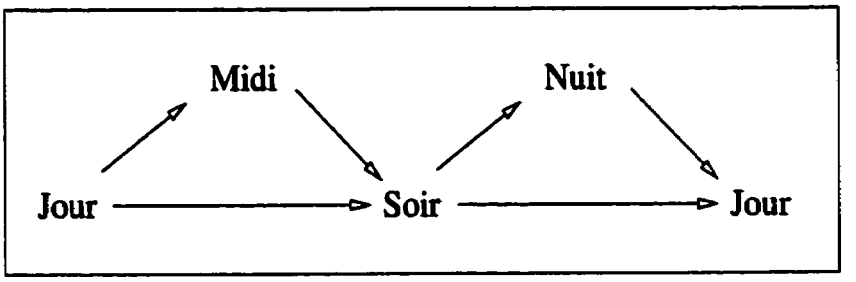

Figure 3.11 – Cycle ergonomique des quarts à l'Hôpital Charles Lemoyne

- Avoir les fins de semaine de travail complet (c.-à-d. travailler le samedi et le dimanche).
- Ne pas avoir deux fins de semaine de travail consécutives.
- Avoir entre 22 et 29 jours entre deux groupes de nuits consécutives.
- Avoir 9 groupes de nuits dans l'horaire.

Maintenant, voici le pseudo code de la nouvelle approche :

Algorithme Nouvelle Approche

Début

Best_hor := horaire initial

Best_sol := coût (horaire initial)

Pour l = 1 à %nombre_répétitions

A := horaire initial

Best_hor_temp := A

Best_sol_temp := coût (A)

Listes tabous := ∅

Construction de l'horaire initial

Pour k = 1 à %Max_iter

Voisinage-1 (Exploration locale niveau 1)

Si Best_hor_temp n'a pas été amélioré depuis Y itérations alors

Voisinage-2 (Diversification niveau 1)

Voisinage-4 (Diversification niveau 1)

Voisinage-5 (Diversification niveau 1)

Si Best_hor_temp n'a pas été amélioré après Y_1 itérations alors

Diversification par poids (Diversification niveau 2)

Retour

Si Best_hor_temp < Best_hor alors

Best_hor := Best_hor_temp

Best_sol := Best_sol_temp

Retour

Fin

Dans la structure de la nouvelle approche, on peut encore reconnaître l'algorithme de Labbé auquel ont été incorporés des éléments pour améliorer l'analyse du domaine. Ainsi, l'algorithme a deux niveaux de diversification : nous utilisons tout d'abord le Voisinage-2, le Voisinage-4 et le Voisinage-5 pour un premier niveau de diversification (comme c'étant le cas auparavant) et, s'il n'y a toujours pas d'amélioration, nous utilisons la diversification par changement de poids. Dans les sections suivantes nous montrons selon l'ordre d'apparition, les parties plus importantes de la nouvelle approche.

3.3.2.1 Construction de l'horaire initial

L'horaire initial a une forte influence sur la solution finale et sur le temps de résolution. Les premiers déplacements deviennent très importants parce qu'ils vont définir des structures "inamovibles" qui vont être très difficiles à déplacer. Par rapport à l'algorithme de Labbé, nous avons amélioré la phase de construction de l'horaire initial et nous avons ajouté des effets aléatoires afin de pouvoir exécuter l'algorithme plusieurs fois (voir section 3.3.2.7). Nous présentons en pseudo code notre construction de l'horaire initial :

Procédure de construction de l'horaire initial

A := horaire initial

n := 0

Répéter jusqu'à n = critère_arrêt

  Temp_Best_Sol := coût (A)

  Voisinage-2

  Si Temp_Best_Sol > coût (A) alors n := 0

    sinon n := n + 1

Retour

Notre algorithme d'initialisation est centré sur l'utilisation du Voisinage-2. On exécute notre algorithme tant qu'il y a des améliorations dans la qualité de l'horaire. Avec cette méthode simple, les structures "inamovibles" de l'horaire fourni à la procedure principale de recherche avec tabous sont de meilleure qualité, c'est-à-dire que la répartition des nuits et des fins de semaine de travail sont plus propices à la confection d'horaires complets de bonne qualité.

3.3.2.2 Exploration locale : Voisinage-1

Ce voisinage est le même que celui de l'algorithme de Labbé (voir section 3.2.3.1).

3.3.2.3 Diversification niveau 1 : Voisinage-2

Ce voisinage est le même que celui de l'algorithme de Labbé (voir section 3.2.3.2).

3.3.2.4 Diversification niveau 1 : Voisinage-4

Le Voisinage-4 fait des changements verticaux qui apparaissent comme des changements horizontaux. Un exemple du Voisinage-4 est montré à la figure 3.12. Ainsi, on permute le dernier jour de travail d'un groupe de travail consécutif du médecin i en le déplaçant comme premier jour de travail dans le groupe suivant de travail du même type du médecin i'. Ensuite on permute le dernier jour de travail du groupe où l'on vient d'ajouter un jour avec le début du groupe suivant. On exécute à nouveau cette même opération mais cette fois avec le médecin i' étant devenu le médecin i. Ce voisinage est possible seulement quand toutes les colonnes (jours) ont les mêmes types de quarts et les séquences de travail consécutives sont uniformes. Voici le Voisinage-4 en pseudo code :

Procédure Voisinage-4

Pour chaque type de quart faire :
  Choisir une colonne (col_act) :
    A' := A
    col1 := col_act
    Répéter jusqu'à col1 = col_act-1 (une seule boucle)
      Identifier la ligne (i) avec le type de quart voulu dans col1
      Identifier la dernière colonne (col2) du groupe
      Identifier la ligne du groupe suivante (i')
        Permuter les lignes i et i' de A', à la colonne col2
        Mesurer A'
      Si A' est minimal garder A' dans A"
      col1 := col2+1
    Retour
  Implanter l'horaire minimal (A")
  Mettre à jour Best_hor_temp si amélioration globale

Horaire de départ

Med	L	M	M	J	V	S	D
1	J	J					
2					J	J	J
3			J	J			

Premières solutions voisines, à partir de la colonne du lundi

Hor	L	M	M	J	V	S	D
1	J						
2					J	J	J
3		***J***	J	J			

Hor	L	M	M	J	V	S	D
1	J						
2				***J***	J	J	J
3		J	J				

Hor	L	M	M	J	V	S	D
1	J						
2				J	J	J	
3		J	J				***J***

Deuxièmes solutions voisines obtenues dans une deuxième boucle

Hor	L	M	M	J	V	S	D
1							
2				J	J	J	
3	***J***	J	J				J

Hor	L	M	M	J	V	S	D
1							
2			***J***	J	J	J	
3	J	J					J

Hor	L	M	M	J	V	S	D
1							
2			J	J	J		
3	J	J				***J***	J

Figure 3.12 – Exemple des solutions voisines générées avec le Voisinage-4

3.3.2.5 Diversification niveau 1 : Voisinage-5

Le Voisinage-5 est très semblable au Voisinage-4. Ici cependant, on change tout le groupe de travail consécutif à la fois. Un exemple est illustré à la figure 3.13. Si le médecin i travaille le quart k dans un groupe consécutif les jours $j-2, j-1$ et j; si le médecin i' travaille le même quart k les jours $j+1$ et $j+2$; si le médecin i'' travaille le même quart k les jours $j+3$ et $j+4$; le changement est alors fait entre les médecins i et i' les jours de $j-2$ à $j+2$, soit au total cinq colonnes à la fois. Après le changement, le groupe du $j-2, j-1$ et j est effectué par le médecin i' et le groupe du $j+1$ et $j+2$ est travaillé par le médecin i. Par la suite, on change le groupe $j+1$ et $j+2$ effectué par le médecin i avec le groupe $j+3$ et $j+4$ réalisé par le médecin i''. Après le changement, on exécute à nouveau cette même opération, le médecin i' étant devenu le médecin i. Voici le Voisinage-5 en pseudo code :

Procédure Voisinage-5

Pour chaque type de quart faire :
  Choisir une colonne (col_act) :
    A' := A
    col1 := col_act
    Répéter jusqu'à col1 = col_act-1 (une seule boucle)
      Identifier les colonnes du groupe (gr1) à partir de col1
      Identifier les colonnes du groupe suivant (gr2)
        Permuter gr1 et gr2 dans A'
        Mesurer A'
        Si A' est minimal garder A' dans A"
      col1 := première colonne de gr2
    Retour
  Implanter l'horaire minimal (A")
  Mettre à jour Best_hor_temp si amélioration globale

Horaire de départ

Hor	L	M	M	J	V	S	D
1	J	J					
2					J	J	J
3			J	J			

Premières solutions voisines, à partir de la colonne du lundi

Hor	L	M	M	J	V	S	D
1			***J***	***J***			
2					J	J	J
3	***J***	***J***					

Hor	L	M	M	J	V	S	D
1					***J***	***J***	***J***
2			***J***	***J***			
3	J	J					

Hor	L	M	M	J	V	S	D
1	***J***	***J***					
2			J	J			
3					***J***	***J***	***J***

Deuxièmes solutions voisines obtenues dans une deuxième boucle

Hor	L	M	M	J	V	S	D
1			***J***	***J***			
2	***J***	***J***					
3					J	J	J

Hor	L	M	M	J	V	S	D
1					***J***	***J***	***J***
2	J	J					
3			***J***	***J***			

Hor	L	M	X	J	V	S	D
1	***J***	***J***					
2					***J***	***J***	***J***
3			J	J			

Figure 3.13 – Exemple des solutions voisines générées avec le Voisinage-5

3.3.2.6 La diversification par changement de poids

Une grande partie de l'amélioration de notre algorithme, par rapport à celui de Labbé provient de l'ajout d'une stratégie de diversification par changement de poids. Cette diversification permet à l'algorithme de se rendre d'un seul coup à un horaire très différent (avec des structures "inamovibles" différentes) pour recommencer l'exploration à partir de ce nouvel horaire. Pour ce faire, l'algorithme change les valeurs des poids associés à certaines contraintes, ce qui rend certains horaires médiocres beaucoup plus acceptables. L'algorithme utilise ces nouveaux poids pendant quelques itérations pour obtenir un horaire très différent. Les valeurs des poids pendant la diversification sont choisis de façon à générer de nouvelles structures "inamovibles" permettant d'obtenir des solutions différentes et meilleures.

Plus précisément, la diversification par changement de poids varie les valeurs de certains poids pour obtenir un horaire avec une bonne qualité dans les contraintes favorisées (leur poids sont augmentés) en dégradant les autres contraintes (leur poids sont diminués). Une fois que l'algorithme trouve un tel horaire, le retour aux poids originaux montre que l'horaire est de mauvaise qualité, surtout au niveau des contraintes qui avaient été dégradées. L'algorithme principal peut alors effectuer à nouveau son travail pour améliorer cet horaire.

Le but de la diversification par poids est de faire en sorte que l'algorithme soit capable d'améliorer la qualité de l'horaire dans les contraintes dégradées sans perdre la qualité obtenue dans les contraintes favorisées. Nous avons essayé différentes façons d'appliquer la diversification par changement de poids. Voici les différentes façons :

F1 : Favoriser les contraintes reliées aux nuits.

F2 : Favoriser les contraintes reliées aux fins de semaine.

F3 : Favoriser la contrainte requérant seulement des blocs de travail de 2 ou 3 jours.

F4 : Favoriser la contrainte sur la rotation des quarts vers l'avant.

F5 : Alterner deux façons.

Nos expériences effectuées avec les différentes façons et combinaisons de stratégies démontrent que F1 et F2 ensemble de façon alternée (F5), ou individuellement (F1 ou F2, seulement) produisent les meilleures solutions. Les F3 et F4 ne donnent pas de bons résultats parce qu'ils modifient l'horaire localement, sans vraiment varier la structure inamovible qui est définie par les nuits et les fins de semaine. La diversification a pour objectif d'éviter de cycler autour d'une solution définie par une structure. Avec la répétition de la diversification par changement de poids, l'algorithme explore une plus grande partie du domaine.

3.3.2.7 Résolutions multiples

Nous avons tout d'abord utilisé les résolutions multiples de l'algorithme pour tester sa robustesse et sa flexibilité (voir section 3.2.4). Nous avons laissé les résolutions multiples dans l'algorithme parce qu'à chaque résolution nous faisons varier l'horaire initial et les nombres aléatoires des éléments importants sur l'horaire résultant. L'horaire initial est ainsi modifié à chaque répétition, mais il est toujours de mauvaise qualité, comme dans l'algorithme de Labbé. Nous faisons également varier les nombres aléatoires pour minimiser leur influence dans les Voisinage-1 et Voisinage-2. En conséquence, la répétition est une façon de faire la diversification [33].

3.3.3 Relation entre les poids et l'horaire final

Une partie très importante du développement de notre algorithme de recherche avec tabous est la détermination des valeurs des poids associés aux contraintes. Par définition, ce sont les paramètres qui définissent l'allure de l'horaire désiré. Les valeurs des poids sont définies en fonction de l'importance de la contrainte : plus la contrainte est importante à respecter dans l'horaire, plus le poids associé est élevé. Nous avons effectivement remarqué que les valeurs des poids ont une grande influence sur la so-

lution finale mais, en réalité, ils sont un des facteurs qui déterminent la capacité de l'algorithme à trouver un bon horaire. En effet, les poids définissent à la fois l'allure de l'horaire final et la capacité de le trouver. Ainsi, une fois que tous les outils de l'algorithme de recherche avec tabous sont développés, le seul facteur qui détermine la capacité de l'algorithme à obtenir un bon horaire sont les valeurs des poids. Ils ont une influence sur la capacité de l'algorithme à analyser un espace local, à obtenir de bonnes structures de nuits et de fins de semaine, et à rendre efficace la diversification par poids.

La tâche de déterminer les valeurs des poids n'est pas facile. Les valeurs des poids associés aux contraintes doivent permettre à l'algorithme d'explorer le domaine des solutions, sans créer des vallées profondes impossibles à surmonter. Une petite échelle de valeurs est idéale pour ne pas créer des vallées profondes. Par contre, une plus grande échelle peut être nécessaire pour bien pondérer les poids des contraintes en fonction de leur importance dans l'évaluation de l'horaire. Une mauvaise détermination de l'échelle des poids dans un sens ou dans l'autre donnera de mauvais horaires. De plus, l'inter-relation des contraintes fait en sorte que la valeur du poids d'une contrainte dépend de la valeur des poids associés aux autres contraintes. Nous avons beaucoup expérimenté avec les valeurs des poids dans le problème général comme dans la phase de diversification par changement de poids (voir section 3.3.2.6). Cet exercice était essentiel afin de comprendre les relations entre les poids et leur influence dans l'obtention d'un bon horaire final. Notre choix final des poids est le suivant : (a) poids élevés pour les nuits et les fins de semaine pour forcer le respect de ces contraintes et limiter les changements de ces structures en dehors de la phase de diversification par poids ; (b) poids moins élevés pour les autres contraintes pour permettre une bonne exploration locale.

3.3.4 Résultats

Nous avons testé la nouvelle approche pour le même contexte d'horaire d'HCL sur lequel Labbé a travaillé et sur d'autres contextes de l'HCL et de l'HGJ. La nouvelle approche est très performante pour générer des horaires cycliques dans toutes ces différentes situations. Mais nous parlons tout d'abord du temps de calcul avant de parler de la qualité des horaires obtenus.

La nouvelle approche nécessite 3 heures de calcul pour obtenir le meilleur horaire sur un station de travail Sun "Ultra10". Toutefois, si le critère d'arrêt par stagnation est actif, il faut 15 heures d'analyse de plus. Ce temps de calcul reste raisonnable pour la confection d'un horaire cyclique. Le nombre d'itérations est d'environ de 10000; si on fait plus de 100 répétitions, ceci représentent approximativement $\simeq 5 \cdot 10^{12}$ horaires analysés par l'algorithme, une toute petite portion du domaine de solutions. Nous montrons la progression de la qualité de l'horaire courante en fonction des itérations aux figures 3.14 et 3.15.

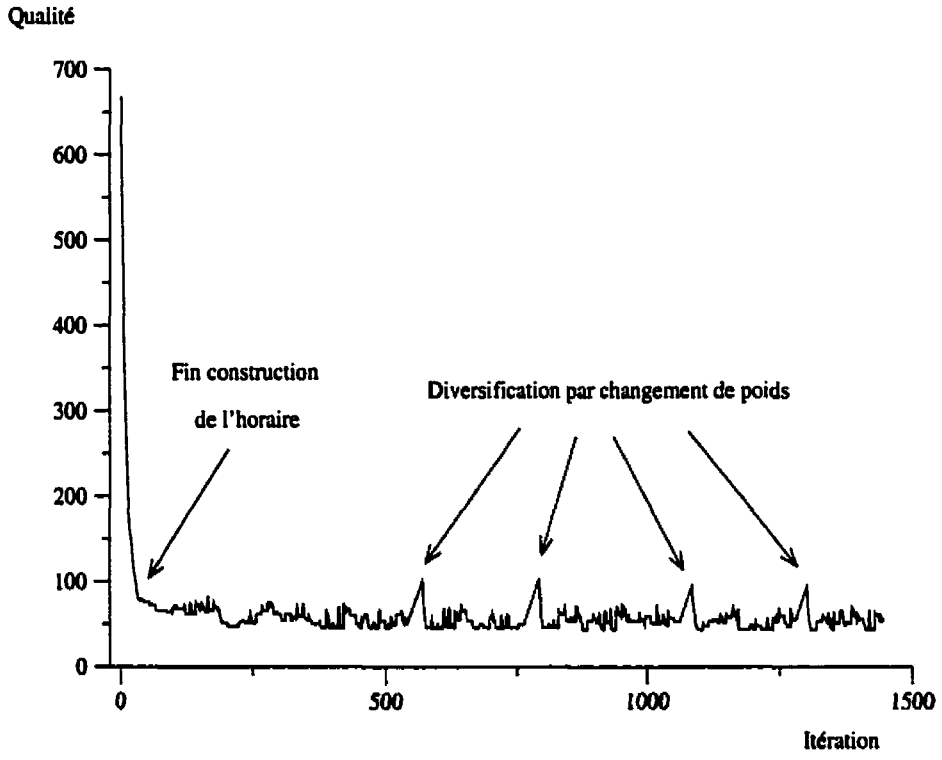

Figure 3.14 – Évolution de la qualité de l'horaire en fonction des itérations

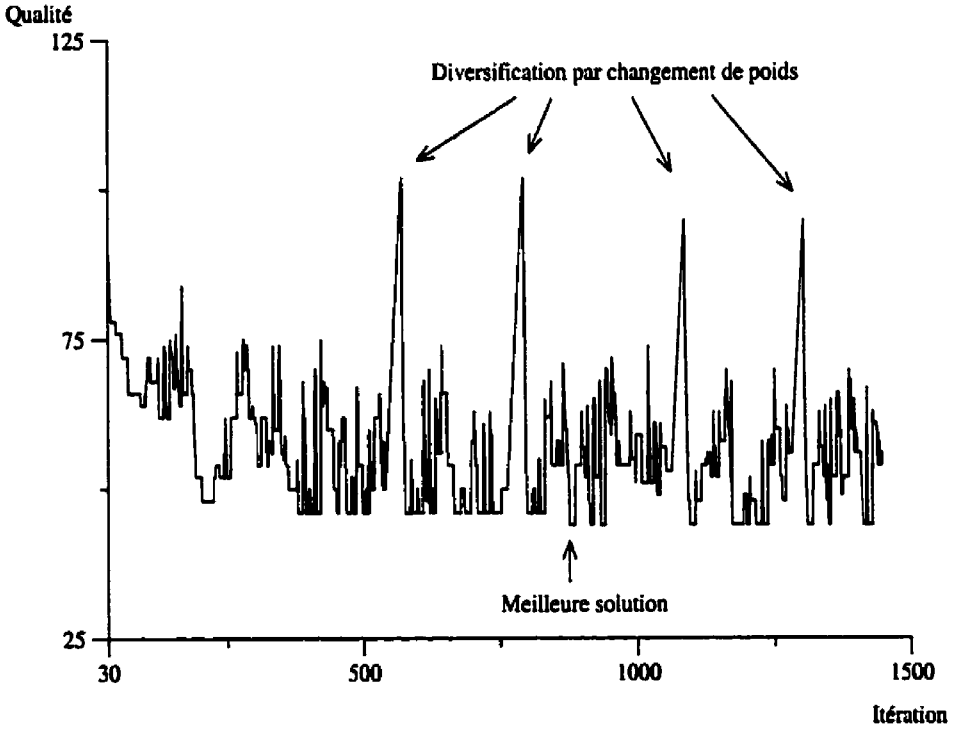

Figure 3.15 – Évolution de la qualité de l'horaire courante après l'itération 30

Notre nouvelle approche nous a permis de générer un nouvel horaire pour l'HCL supérieur à celui de Labbé (voir figure 3.16). Par rapport à l'horaire de Labbé (figure 3.9), les nuits de l'horaire sont mieux distribuées. Ainsi, dans le nouvel horaire, les groupes de nuits sont espacés de 16 à 35 jours, tandis que dans l'horaire de Labbé cela varie de 12 à 59 jours. L'horaire de la nouvelle approche a donc une meilleure distribution de nuits tout en ayant les autres bonnes caractéristiques de l'horaire de Labbé.

Hor	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D
1		8	8			7	7			16	16			0	0	0				7	7
2			12	12				8	8			16	16	16			8	8	8		
3	16	16	16			16	16			0	0				7	7			17	17	17
4			7	7	7			16	16			0	0				7	7	7		
5	12	12			17	17	17			8	8	8			16	16			0	0	
6				8	8			17	17				8	8				12	12		
7	17	17			0	0				7	7	7			17	17	17			8	8
8	8			16	16			12	12				17	17			0	0			
9	7	7			12	12	12			17	17	17			12	12	12			16	16
10			0	0				7	7				12	12			17	17			0
11	0	0				8	8			12	12	12			8	8				12	12
12			17	17			0	0	0				7	7				16	16		

7 et 8 : quarts de jour, 16 et 17 : quarts de soir
12 : quart de midi, 0 : quart de nuit et 'nulle' : jour de congé

Figure 3.16 – Meilleur horaire confectionné avec la nouvelle approche pour l'HCL

Pour connaître les performances de notre algorithme, nous l'avons testé sur plusieurs problèmes de confection d'horaires. Nous avons confectionné des horaires pour trois autres scénarios pour l'HCL : (1) figure 3.18, 13 médecins comblant 6 quarts par jour (chaque médecin travaille en moyenne 3.23 quarts par semaine), (2) figure 3.17, 16 médecins comblant 7 quarts par jour durant la semaine et 6 quarts par jour durant la fin de semaine (chaque médecin travaille en moyenne 2.93 quarts par semaine) et (3) figure 3.19, 17 médecins comblant 7 quarts par jour durant la semaine et 6 quarts par jour durant la fin de semaine (chaque médecin travaille en moyenne 2.76 quarts par semaine). Nous avons également confectionné un horaire cyclique pour l'HGJ c'est-à-dire, un horaire pour 15 médecins comblant 7 quarts les jours de la semaine et 6 les jours de fin de semaine pour une charge moyenne de 3.13 quarts par semaine. L'horaire est présenté à la figure 3.20. Les règles de confection étaient similaires à celle de l'HCL.

L'application de la nouvelle approche a trouvé de bons horaires pour tous ces scénarios dans un temps raisonnable. En règle générale, plus la charge moyenne de travail est élevée, plus le problème de confection devient difficile. Les situations où on requiert moins de médecins les fins de semaine que durant la semaine simplifient le problème. En changeant de scénario, nous n'avons pas eu à changer l'échelle des poids mais nous avons du changer les valeurs de certains poids. Ces changements ont été faits par essais et erreurs selon l'horaire obtenu, le temps d'expérimentation a été court. Notre algorithme est donc performant pour obtenir de bons horaires cycliques dans différents contextes. Il reste cependant à effectuer des travaux de recherche pour auto-ajuster les poids associés aux contraintes des horaires.

Hor	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D
1			8	8	8			12	12				16	16			8	8	8		
2	16	16			16	16	16			0	0					8	8			12	12
3	12							16	16			0	0					8	8		
4		12	12			16	16	16						0	0					8	8
5	8			12	12				16	16			8	8	8			12	12		
6	16	16			0	0	0				8	8				16	16			8	8
7			16	16				8	8	8			16	16	16						0
8	0	0				8	8			8	8	8			12	12	12			16	16
9				8	8						16	16				0	0	0			
10	8	8				12	12			16	16	16			8	8				16	16
11			0	0				8	8				12	12			16	16	16		
12			16	16	16			0	0				8	8				16	16		
13		8	8			8	8			12	12	12			16	16			0	0	

7 et 8 : quarts de jour, 16 et 17 : quarts de soir
12 : quart de midi, 0 : quart de nuit et 'nulle' : jour de congé

Figure 3.17 – Horaire cyclique pour l'HCL avec 13 médecins

Hor	L	M	M	J	V	S	D
1			12	12	12		
2		17	17				
3	8	8				17	17
4	17						
5	0	0				7	7
6			15	15	15		
7	12	12				16	16
8			8	8	8		
9	15	15				12	12
10				17	17		
11			0	0			
12	7	7	7				
13	16	16	16			8	8
14				16	16		
15					0	0	0
16				7	7		

7 et 8 : quarts de jour, 12 et 15 : quarts de midi

16 et 17 : quarts de soir, 0 : quart de nuit et 'nulle' : jour de congé

Figure 3.18 – Horaire cyclique pour l'HCL avec 16 médecins

Hor	L	M	M	J	V	S	D
1		17	17				
2	7	7	7			12	12
3			15	15	15		
4			16	16			
5			0	0			
6	8	8	8				
7	12	12	12				
8	16	16				8	8
9				17	17		
10					0	0	0
11				7	7		
12					16	16	16
13				8	8		
14	15	15				17	17
15	17						
16	0	0				7	7
17				12	12		

7 et 8 : quarts de jour, 12 et 15 : quarts de midi

16 et 17 : quarts de soir, 0 : quart de nuit et 'nulle' : jour de congé

Figure 3.19 – Horaire cyclique pour l'HCL avec 17 médecins

Hor	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D
1			8	SA				16	16				8	8	SA			16	16		
2	8	SA				16	16	SA						0	0					8	8
3			12	12	12		SA			8	SA				16	16			8	8	8
4				16	16				0	0	0						8	8	SA		
5			16	16	16			8	8				16	16	16						0
6	0				8	8	8			16	16	16			8	SA				16	16
7	16			8	SA			12	12			0	0			8	SA				
8		8	8			16	16				8	8	SA				16	16	16		SA
9				0	0	0				8	8	8			12	12	12			16	16
10	SA			8	8	SA				12	12	12				0	0				
11	8	8	SA					16	16	16						8	8	SA			
12		16	16				0	0					8	8	8			12	12	SA	
13	16	16							8	SA				SA		16	16				
14		0	0					8	SA			16	16	16				8	8		
15	12	12				8	8				16	SA						0	0	0	

8 : quart de jour, 12 : quart de midi

16 : quart de soir, 0 : quart de nuit

SA : jour sur appel et 'nulle' : jour de congé

Figure 3.20 – Horaire cyclique pour l'HGJ

3.4 Mise en oeuvre

Notre algorithme fournit une matrice qui est un "canevas" de l'horaire. Cette matrice ne contient donc pas de noms ni de dates. Il faut un travail de gestion pour générer l'horaire réel avec les noms de médecins et les dates. Avec l'ancienne méthode de confection, l'horaire était réalisé à la main par le médecin et il était retranscrit par une secrétaire du service de l'urgence sur le logiciel Microsoft Word. Avec la nouvelle méthode, la tâche est devenue trop complexe pour gérer le tout sur un éditeur de texte. Nous avons donc développé une application informatique pour faciliter la gestion pratique des horaires.

Le logiciel développé sur ACCESS 97 a pour but de réduire la charge de travail et de minimiser le risque d'erreur. Le logiciel avec des écrans simples et conviviaux permet l'édition des horaires. Une fois la matrice horaire introduite par une personne connaissant bien la base de données, la gestion des horaires peut être par la suite confiée à une personne ayant des connaissances moyennes en informatique. L'application commence avec l'affectation des médecins à temps plein et à temps partiel aux 12 horaires. Le logiciel permet d'une façon très simple de réaliser cette affectation, comme on peut s'en apercevoir à la figure 3.21. Par la suite, il suffit d'entrer la date de début de l'horaire et celle de la fin, et le logiciel est prêt à générer automatiquement l'horaire entre ces deux dates. Cet horaire peut être facilement modifié grâce à une interface qui permet de changer le médecin affecté à un quart de travail dans l'horaire par un autre médecin. Une partie importante du logiciel est la présentation des horaires. Le logiciel permet la présentation de l'horaire global (avec tous les médecins) ou personnalisé pour chaque médecin. Il peut être visualisé sur l'écran de l'ordinateur ou imprimé sur papier en format Word ou format html. Ce dernier format permet même de mettre facilement les horaires détaillés sur un site web. Un exemple de la qualité d'un horaire en format html est montré à la figure 3.22. Le format html est le plus intéressant parce que les horaires peuvent être consulté en tout temps par les

médecins.

Le logiciel réalisé sur ACCESS 97 pour la génération et la gestion des horaires à l'HCL est très utile. Son utilisation facile, son automatisation et les différents formats de présentation des horaires représentent leurs principaux avantages en comparaison avec l'ancienne méthode manuelle. Actuellement, les horaires de l'HCL sont générés avec ce logiciel.

1	3/6	Antoine					
2	3/6	Pierre					
3	2/6 + 1/6		Camila	Anne			
4	3/6	Raymond					
5	2/6 + 1/6		Yvette	Martine			
6	3/6	Jean-Paul					
7	3 à 1/6				Jean	Bernard	Richard
8	2/6 + 1/6		Mathias	Isabelle			
9	3 à 1/6				Marie	Yves	André
10	3/6	Paul					
11	2/6 + 1/6		Denis	Lucile			
12	3/6	Michel					

Figure 3.21 – L'interface pour affecter les médecins au lignes de l'horaire cyclique

Hopital Charles - Lemoyne

Horaire des Medecins de Garde

(du 1-septembre-2000 au 30-septembre-2000)
(Version du 21-novembre-2000)

SEPTEMBRE 2000						
Lundi	**Mardi**	**Mercredi**	**Jeudi**	**Vendredi**	**Samedi**	**Dimanche**
-	-	-	-	**1** *7* Richard *8* André *12* Martine *16* Denis *17* Antoine *24* Pierre	**2** *7* Isabelle *8* Jean-Paul *12* Michel *16* Raymond *17* Paul *24* Pierre	**3** *7* Isabelle *8* Jean-Paul *12* Michel *16* Raymond *17* Paul *24* Pierre
4 *7* Mathias *8* Camille *12* Marie *16* Yvette *17* Bernard *24* Antoine	**5** *7* Denis *8* Camille *12* André *16* Martine *17* Richard *24* Antoine	**6** *7* Denis *8* Anne *12* Yves *16* Michel *17* Jean-Paul *24* Paul	**7** *7* Raymond *8* Pierre *12* Isabelle *16* Michel *17* Jean-Paul *24* Paul	**8** *7* Raymond *8* Pierre *12* Mathias *16* Michel *17* Jean-Paul *24* Bernard	**9** *7* Yvette *8* Antoine *12* Camille *16* Marie *17* Lucille *24* Jean	**10** *7* Yvette *8* Antoine *12* Camille *16* Marie *17* Lucille *24* Richard
11 *7* Paul *8* Antoine *12* Pierre *16* Mathias *17* Raymond *24* Michel	**12** *7* Paul *8* Jean-Paul *12* Pierre *16* Mathias *17* Raymond *24* Michel	**13** *7* Paul *8* Jean-Paul *12* Pierre *16* Martine *17* Anne *24* Denis	**14** *7* André *8* Jean *12* Antoine *16* Yvette *17* Camille *24* Denis	**15** *7* Yves *8* Bernard *12* Antoine *16* Yvette *17* Camille *24* Isabelle	**16** *7* Michel *8* Raymond *12* Paul *16* Jean-Paul *17* Pierre *24* Mathias	**17** *7* Michel *8* Raymond *12* Paul *16* Jean-Paul *17* Pierre *24* Mathias
18 *7* Raymond *8* Lucille *12* Yves *16* Antoine *17* Richard *24* Martine	**19** *7* Camille *8* Denis *12* André *16* Antoine *17* Jean *24* Yvette	**20** *7* Camille *8* Denis *12* Marie *16* Paul *17* Michel *24* Pierre	**21** *7* Jean-Paul *8* Isabelle *12* Raymond *16* Paul *17* Michel *24* Pierre	**22** *7* Jean-Paul *8* Mathias *12* Raymond *16* Paul *17* Michel *24* Antoine	**23** *7* Richard *8* Martine *12* Denis *16* Anne *17* André *24* Antoine	**24** *7* Richard *8* Martine *12* Denis *16* Anne *17* André *24* Antoine
25 *7* Jean *8* Pierre *12* Mathias *16* Raymond *17* Jean-Paul *24* Michel	**26** *7* Paul *8* Pierre *12* Mathias *16* Raymond *17* Jean-Paul *24* Michel	**27** *7* Paul *8* Pierre *12* Isabelle *16* Lucille *17* Yvette *24* Yves	**28** *7* Camille *8* Antoine *12* Richard *16* Denis *17* Yvette *24* Marie	**29** *7* Anne *8* Antoine *12* Bernard *16* Denis *17* Martine *24* Jean-Paul	**30** *7* Raymond *8* Michel *12* Pierre *16* Mathias *17* Paul *24* Jean-Paul	-

Figure 3.22 – Exemple d'un horaire global visualisable par Internet

Chapitre 4

HORAIRES INDIVIDUALISÉS

Après avoir travaillé sur le problème de confection des horaires cycliques, nous avons attaqué le problème de confection des horaires individualisés. Les horaires cycliques ne permettent pas de tenir compte des préférences individuelles. Il faut donc développer des méthodes de confection d'horaires plus sophistiquées pour tenir compte des caractéristiques personnelles, comme les charges de travail individualisées et les vacances.

L'urgence de l'Hôpital Général Juif de Montréal (HGJ) est un bel exemple d'un contexte où les horaires cycliques ne peuvent pas être utilisés. En effet, le caractère religieux et universitaire de l'HGJ fait que les horaires doivent permettre aux médecins de pouvoir respecter le Sabbath ou d'assister aux réunions et congrès qu'impliquent les activités de recherche. Nous avons donc développé un algorithme permettant de générer un horaire satisfaisant les particularités de chaque médecin. Cet algorithme est une extension de celui servant à la confection des horaires cycliques. La qualité de l'horaire que nous avons généré pour une période de travail à l'urgence de l'HGJ démontre que les méthodes de recherche avec tabous sont un outil suffisamment puissant pour résoudre ce problème fort complexe. Cependant, nos travaux sur les horaires individualisés doivent être poursuivis pour augmenter leur robustesse et flexibilité.

La section 4.1 décrit l'HGJ et son horaire, ainsi que la méthode utilisée à l'HGJ pour confectionner l'horaire. La section 4.2 explique le travail réalisé pour le développement de l'algorithme qui confectionne les horaires individualisés pour l'HGJ. La section 4.3 présente les résultats et des directions de recherche à explorer dans le futur.

4.1 L'Hôpital Général Juif de Montréal

L'HGJ est un centre hospitalier affilié à l'université McGill. Sa salle d'urgence est la plus achalandée du Québec pour les cas "sur civière", soit les cas nécessitant le plus de ressources médicales pour les traiter. L'horaire des médecins de l'urgence de l'HGJ est l'un des plus complexes des urgences des hôpitaux de Montréal (Québec) [9]. Le docteur Bernard Unger assure et coordonne sa confection depuis plus de 10 ans. Au fil des ans, il a défini des règles et une méthode de confection pouvant satisfaire une grande panoplie de préférences chez les médecins. La complexité du problème et le haut niveau d'expertise du Dr. Unger en fait un cas de choix pour nos travaux de recherche sur les horaires individualisés. Nous présentons le détail de cet horaire et la méthode de confection de l'horaire à l'HGJ dans cette section.

4.1.1 L'horaire à l'HGJ

L'HGJ confectionne quatre horaires de trois mois par année. Le nombre et type de quart varie selon le type de jour soit "régulier", "férié" ou "fin de semaine". Présentement, les quarts sont les suivants (le chiffre entre parenthèses correspond à un code indicatif) :

- Jours réguliers (7 médecins par jour) :
  - Jour : de 8h00 à 17h00 (D1)

- Jour : de 8h00 à 16h00 (D2, noter toutefois que ce quart n'existe que pour le premier jour de la semaine)
- Jour : de 8h00 à 12h00 (S)
- Jour : de 8h00 à 16h00 (FT, noter que ce quart de jour couvre sensiblement les mêmes heures que le quart D1, mais correspond à des tâches différentes)
- Midi : de 12h00 à 20h00 (P)
- Soir : de 16h00 à 23h00 (E1)
- Soir : de 16h00 à 0h00 (E2)
- Nuit : de 23h00 à 8h00 (NT)

- Jours de fin de semaine et jours fériés (5 médecins par jour) :
  - Jour : de 8h00 à 16h00 (X1)
  - Jour : de 8h00 à 16h00 (X2)
  - Soir : de 16h00 à 0h00 (Y1)
  - Soir : de 16h00 à 0h00 (Y2)
  - Nuit : de 0h00 à 8h00 (Z)

De plus, il y a un médecin sur appel chaque jour (de 0h00 à 23h53, SA). En moyenne, un médecin sur appel doit effectivement se déplacer une fois sur trois à l'urgence pour remplacer un médecin malade, renforcer l'équipe régulière lors d'un achalandage inhabituellement élevé, etc. Comme ce quart est complémentaire et facile à affecter aux médecins, nous n'en avons pas tenu compte dans le contexte de nos travaux.

Pour assurer un bon niveau de service, 22 médecins travaillent à l'urgence de l'HGJ. Les médecins ont différentes charges de travail définies dans leurs contrats d'embauche. Le contrat garantit un nombre de quarts de travail pour chaque année. Il définit également le nombre et le type de quarts de travail qu'ils devront effectuer. Cette variété dans les charges de travail est la raison principale pour laquelle l'HGJ

doit utiliser une méthode de confection d'horaires individualisés. L'autre raison est l'objectif de satisfaire les demandes et les préférences personnelles des médecins.

4.1.2 Les règles de confection des horaires à l'HGJ

À l'HGJ les règles sont en partie exprimées formellement par les contrats, mais plusieurs règles ne sont pas documentées. Ainsi, la connaissance des préférences des médecins a été obtenue au fil des ans par la communication entre chaque médecin et le médecin responsable des horaires. Nous avons donc dû transformer cette connaissance informelle en objectifs et contraintes bien définis. Malgré l'individualité des horaires, nous avons réussi à identifier beaucoup de similarités entre les préférences des médecins. Grâce à ces similitudes et à l'aide des règles ergonomiques, nous avons défini des contraintes générales qui seront personnalisées pour chaque médecin. De plus, de concert avec le médecin responsable, nous avons identifié l'importance de chaque règle et préférence. Voici les règles générales par ordre d'importance :

- Le respect du contrat, où est défini pour chaque médecin :
  - La charge moyenne de travail par semaine, en nombre de quarts par semaine.
  - Le nombre de quarts de nuit et de fins de semaine par horaire.
  - Sept semaines de vacances par année (même nombre pour tous les médecins).
- Les semaines de vacances choisies.
- Les jours de non disponibilité.
- Le nombre maximum de nuits consécutives.
- Le nombre minimum de jours de congés après un quart de nuit.
- Le nombre de jours de travail consécutifs.
- Les jours de congé isolé dans l'horaire permis ou pas.
- La bonne distribution des quarts dans l'horaire, surtout les nuits.
- La préférence de fins de semaine brisées ou complètes.
- La préférence de fins de semaine consécutives ou non-consécutives.
- Les séquences de travail interdites.

- Le nombre de quarts de travail maximum par semaine.

Cette liste est générale. Au moment de confectionner un horaire, il peut y avoir d'autres contraintes ponctuelles et/ou personnelles qui se rajoutent.

4.1.3 Méthode utilisée à l'HGJ

Le médecin responsable est chargé de coordonner et de diriger la confection de l'horaire de la salle d'urgence. Le processus de confection d'un horaire est échelonné sur une période de deux mois, ainsi le médecin responsable a besoin normalement d'une à deux semaines de travail dédiées entièrement à la confection de l'horaire. Même si le médecin responsable fait les horaires depuis 10 ans, il a besoin d'autant de temps à cause de la complexité du problème et du haut niveau de qualité de l'horaire auquel les médecins s'attendent. Pour s'aider, il a développé une méthode par étapes pour confectionner l'horaire et utilise plusieurs programmes sur Excel afin de vérifier le respect des règles. Voici comment il procède :

1. Les médecins identifient leurs jours de non-disponibilité et leurs semaines de vacances. Le médecin responsable vérifie si les demandes sont possibles et discute, au besoin, avec les médecins pour régler le problème des périodes conflictuelles (trop de demandes pour les mêmes périodes).
2. Le médecin responsable génère des matrices avec les données nécessaires pour faciliter la confection de l'horaire. Pendant la confection, ces matrices seront constamment consultées afin d'obtenir un horaire final de bonne qualité. Ces matrices sont :
   (a) Matrice de la demande : les quarts à affecter, le nombre et le type de quart à chaque jour de la période de l'horaire. Un exemple est présenté à la figure 4.1.
   (b) Matrice des vacances : les semaines de vacances et les jours de non-disponibilité demandés par les médecins. Un exemple est présenté à la figure 4.2.

(c) Matrice de la charge de travail : en fonction des contrats et des semaines de vacances demandées, le médecin responsable détermine pour chaque médecin le nombre de quarts à travailler dans l'horaire de trois mois pour chaque type de quart. Un exemple est présenté à la figure 4.3.

(d) Matrice de la charge par semaine : pour faciliter la confection, le médecin responsable détermine le nombre de quarts que chaque médecin aura à réaliser à chaque semaine de l'horaire. Cette matrice est nécessaire en raison de la méthode séquentielle utilisée. Un exemple est présenté à la figure 4.4. (Note : La semaine à l'HGJ débute le lundi à 8h00 et elle finit le lundi suivant à 8h00)

3. Le médecin-chef du département fait son propre horaire personnalisé : il doit choisir les quarts de travail libres dans l'horaire de trois mois de telle sorte à respecter la charge de travail telle que définie par 2.c et 2.d.
4. Le médecin responsable confectionne l'horaire pour les médecins qui ont le plus de contraintes de disponibilité, soit ceux travaillant dans d'autres hôpitaux.
5. Par ordre de séniorité, les autres médecins font leurs horaires respectifs.
6. Les 4 derniers médecins, dont l'un est le médecin responsable, font ensemble leurs horaires et modifient les autres au besoin. Ils n'ont pas à respecter les choix d'horaire des médecins, seulement les matrices 2.b et 2.c.

Cette méthode décentralisée par étapes permet aux médecins d'avoir un horaire répondant à leur besoin. Pour coordonner la confection de l'horaire individuel, le médecin responsable a développé un logiciel sur Excel qui vérifie la cohérence de l'horaire dans toutes les étapes. Les médecins entrent ainsi leur horaire personnalisé dans Excel et obtiennent immédiatement une rétroaction sur leurs choix. Le logiciel est très convivial.

Les médecins de l'HGJ sont satisfaits des horaires obtenus avec la méthode utilisée parce que leurs horaires personnalisés répondent à leurs demandes et préférences. En

L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D	L	M	...
D1	D1	D1	D1	D1	X1	X1	D1	D1	D1	D1	D1	X1	X1	D1	D1	...
D2					X2	X2	D2					X2	X2	D2		...
S	S	S	S	S			S	S	S	S	S			S	S	...
FT	FT	FT	FT	FT			FT	FT	FT	FT	FT			FT	FT	...
P	P	P	P	P			P	P	P	P	P			P	P	...
E1	E1	E1	E1	E1	Y1	Y1	E1	E1	E1	E1	E1	Y1	Y1	E1	E1	...
E2	E2	E2	E2	E2	Y2	Y2	E2	E2	E2	E2	E2	Y2	Y2	E2	E2	...
NT	NT	NT	NT	NT	Z	Z	NT	NT	NT	NT	NT	Z	Z	NT	NT	...
A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	...

Figure 4.1 – Matrice de la demande

	L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D	L	M	...
Med 1	•	•	•	•	•	•	•										...
Med 2												•	•	•	•	•	...
Med 3			•					•	•	•	•	•	•	•			...
. . .																	
Med 20		•							•						•		...
Med 21			•	•	•										•	•	...
Med 22					•	•	•	•									...

Figure 4.2 – Matrice des vacances

	Quarts réguliers							Fériés et Fins de sem.					
	D1	D2	S	FT	P	E1	E2	NT	X1	X2	Y1	Y2	Z
Med 1	1	1	2	0	2	3	3	1	1	0	1	0	0
Med 2	2	3	1	2	0	1	0	2	3	2	1	1	1
Med 3	1	1	2	3	0	0	0	1	2	1	1	0	1
. . .													
Med 20	2	0	5	3	2	2	4	4	3	2	1	0	0
Med 21	3	1	7	2	0	1	4	3	3	3	3	3	3
Med 22	3	1	7	5	3	2	1	2	2	1	3	2	1

Figure 4.3 – Matrice de la charge de travail

	Semaine 1	Semaine 2	Semaine 3	...
Med 1	1	1	2	...
Med 2	2	3	2	...
Med 3	2	1	1	...
. . .				
Med 20	2	2	2	...
Med 21	3	4	3	...
Med 22	3	2	3	...

Figure 4.4 – Matrice de la charge par semaine

conséquence, la perception de la qualité de l'horaire obtenu est très élevée. Mais pour obtenir une telle qualité, cela nécessite beaucoup de travail. Le processus de confection est très long parce que la confection des horaires des médecins est séquentielle et dépend des horaires précédents. Le médecin responsable aimerait avoir un outil de confection générant automatiquement un horaire individualisé de la même qualité. Il examine systématiquement les nouveaux logiciels de confection d'horaires de médecins mis sur le marché et a constaté qu'aucun ne permet de tenir compte de tous les aspects souhaités pour l'horaire de l'HGJ.

4.2 Application de la recherche avec tabous

Après avoir travaillé sur les horaires cycliques, nous avons décidé d'appliquer le même principe à la confection d'horaires individualisés, en espérant obtenir d'aussi bons résultats. Nous présentons ci-après les détails de nos transformations de l'algorithme pour les horaires cycliques. Ces transformations ont nécessité beaucoup de travail afin d'adapter correctement les principaux éléments de l'algorithme : les voisinages, la fonction objectif et les valeurs des poids. Elles ont permis à l'algorithme de confectionner un horaire de qualité similaire à celui confectionné par l'HGJ en une fraction du temps.

Le problème de confection des horaires cycliques et des horaires individualisés sont différents en apparence. Mais les deux sont des problèmes d'affectation (voir section 2.3) où les quarts de travail sont affectés aux médecins. Dans les deux problèmes, nous pouvons utiliser le même principe de recherche avec tabous pour confectionner un horaire, c'est-à-dire réaliser des permutations de quarts dans le même jour (colonne) afin de toujours satisfaire la charge journalière de l'hôpital. Donc, du point de vue algorithmique, le problème de confection d'horaires individualisés est très similaire à celui du problème de confection d'horaires cycliques.

Cependant, le défi de développer un algorithme de recherche avec tabous pour faire la confection d'horaires individualisés est considérable en raison de la grande augmentation du nombre de poids à considérer en même temps. Ainsi, il ne faut pas satisfaire les demandes d'un seul profil de médecin mais plutôt celles de plusieurs profils différents qui peuvent parfois être contradictoires entre eux. Nous rappelons que ces poids ont une grande influence sur la qualité de l'horaire obtenu et sur le temps de résolution. Selon notre expérience, l'augmentation de leur nombre fait augmenter exponentiellement la difficulté d'ajustement de leurs valeurs pour obtenir un bon horaire dans un temps raisonnable. Nous pensons toutefois avoir réussi.

Avant de présenter l'algorithme de recherche avec tabous en tant que tel, nous discutons des transformations que nous avons dû faire subir à l'algorithme de confection d'horaires cycliques pour qu'il puisse générer des horaires individualisés, et le travail réalisé pour obtenir de bonnes valeurs des poids.

4.2.1 Transformation

Nous avons tout d'abord modifié notre algorithme pour qu'il puisse tenir compte des données "individualisées". Ce changement a ainsi augmenté significativement la dimension du problème à résoudre. Nous avons par la suite réorganisé la fonction objectif de façon à tenir compte des particularités du problème d'horaire de l'HGJ. Nous avons ainsi confectionné un premier horaire individualisé. Pour obtenir des horaires acceptables tenant compte des préférences des médecins, nous avons dû décortiquer le problème de façon à trouver deux nouveaux voisinages et une façon d'ajuster les valeurs de poids associés aux préférences individuelles des médecins. Finalement, nous avons donné les derniers raffinements à la matrice de poids en collaboration avec le médecin responsable des horaires à l'HGJ. L'algorithme a confectionné un horaire individualisé de bonne qualité dans un temps raisonnable pour l'HGJ. Nous présentons les détails du développement de l'algorithme dans les prochaines sections.

4.2.1.1 Transformation de la structure

Tout d'abord, nous avons transformé l'algorithme pour l'adapter aux nouvelles données initiales. Nous avons incorporé la matrice de la demande (figure 4.1), la matrice des vacances et de non-disponibilité (figure 4.2) et la matrice de la charge de travail (figure 4.3). Nous avons décidé ne pas utiliser la matrice de la charge par semaine (figure 4.4) pour obtenir une bonne distribution de quarts puisque cette matrice n'est utilisée par le médecin responsable qu'en raison de la méthode de confection actuelle. Nous pensons que les contraintes ergonomiques et la contrainte limitant à 4

le nombre maximum de quarts par semaine sont suffisantes pour obtenir une bonne distribution des quarts, tout en donnant plus de flexibilité à l'algorithme que si la matrice de la charge par semaine était incorporée. Ceci devra toutefois être validé lors des essais de notre algorithme.

La matrice de la demande et la matrice des vacances définissent la structure générale de l'horaire. La matrice de l'horaire est structurée de la même façon que celle utilisée pour l'horaire cyclique (voir section 3.2.1). Dans cette matrice, les colonnes représentent les jours de travail, les lignes représentent les horaires personnalisés des médecins et les valeurs de la matrice représentent les quarts, les congés, mais également les jours de non-disponibilité ou vacances. La taille de la matrice à l'HGJ est de 22 lignes par 91 colonnes, soit huit fois plus grande que celle de l'HCL qui est de 12 lignes par 21 colonnes car nous planifions sur une période de 3 mois pour 22 médecins plutôt que 3 semaines et 12 médecins. De plus, nous devrons tenir compte des jours de non-disponibilité et de vacances durant la résolution du problème. Un exemple du format de l'horaire utilisé par notre algorithme est représenté à la figure 4.5.

	L	M	X	J	V	S	D	L	M	X	J	V	S	D	L	M	...
Med 1	•	•	•	•	•	•	•			D1	D1	D1	X1				...
Med 2	D2			S	S	X1	X1					•	•	•	•	•	...
Med 3	S	S	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	E2	E2	...
. . .																	
Med 20	E1	•							•						•		...
Med 21			•	•	•	Y2	Y2		S	S	S		Z	Z	•	•	...
Med 22		E2	E2	E2	•	•	•	•		NT	NT	NT			D2	D1	...

Figure 4.5 – Matrice de l'horaire initial de l'algorithme

Nous avons modifié la matrice des vacances pour y ajouter des jours de non-disponibilité afin d'obtenir les horaires désirés. Les médecins ont droit à sept semaines de vacances dans l'année (voir section 4.1.2), que les médecins choisissent eux-mêmes. La semaine de vacances est définie du lundi à 8h00 jusqu'au lundi suivant à 8h00. Cependant, le médecin responsable essaie toujours d'allonger les vacances, autant que possible, en ajoutant la fin de semaine précédente. Comme résultat, la semaine de vacance est presque toujours du vendredi à 8h00 jusqu'au deuxième lundi à 8h00 (10 jours). Nous avons décidé d'ajouter ces trois jours aux jours de non-disponibilité pour les médecins, comme pour le Med 3 à la figure 4.5. Ceci augmente quelque peu la difficulté de résolution de l'horaire, mais il assure l'obtention d'un horaire de qualité.

Les voisinages ont dû être adaptés aux nouvelles caractéristiques du problème. Nous avons premièrement interdit la permutation des quarts où un ou plusieurs jours de non-disponibilité sont impliqués. De cette façon, les jours de non-disponibilité et vacances restent toujours invariables. Cette modification a été faite pour tous les voisinages. De plus, nous avons enlevé le Voisinage-4 et le Voisinage-5 de notre algorithme. Ces voisinages font des permutations "aveugles" entre les colonnes, ce qui est adéquat dans le contexte de l'HCL où tous les jours ont les mêmes quarts de travail. Dans le contexte de l'HGJ cette charge de travail n'est pas constante du lundi au dimanche et il y a des jours de non-disponibilités. Ceci fait que l'adaptation des Voisinage-4 et Voisinage-5 aurait été très complexe et leur efficacité très faible. Nous avons augmenté le nombre de colonnes analysées aléatoirement par le Voisinage-1 et le Voisinage-2 puisque le nombre de colonnes de l'horaire de l'HGJ est plus élevé. Les 6 à 10 colonnes analysées sur un total de 21 colonnes lors de la définition d'un voisinage a été modifié à 15 à 25 colonnes à la fois sur un total de 91 colonnes afin de donner des résultats similaires. Finalement, nous avons ajusté les paramètres globaux de l'algorithme, à savoir le nombre d'itérations, la longueur des listes tabous et les durées des diversifications.

En contrepartie, nous avons ajouté un tout nouveau voisinage à l'algorithme, le Voisinage-7. Nous avons amené le concept de travailler intensément sur les horaires complets de deux médecins à la fois. Ainsi, toutes les permutations possibles par bloc de 1, 2 ou 3 quarts sont explorées sur la période de 3 mois. Les concepts du Voisinage-7 sont présentés plus en détail à la section 4.2.2.3.

Les premiers essais nous montrent que la nouvelle taille de l'horaire augmente le besoin de mémoire et de temps pour analyser les voisinages. Toutefois, la station de travail Sun "Ultra10" a suffisamment de mémoire vive et elle est suffisamment rapide pour que le temps de calcul reste raisonnable. Nous n'avons pas vérifié l'impact d'une augmentation de la taille de l'horaire, de 3 à 4 mois par exemple. Nous soupçonnons que le temps de résolution pourrait augmenter d'une façon non-linéaire.

4.2.1.2 Fonction objectif

La fonction objectif ($F(X)$) de l'algorithme a été modifiée pour pouvoir confectionner des horaires individualisés pour l'HGJ. La qualité de chaque horaire personnalisé est calculée seulement en fonction des poids personnels du médecin ($f_i(\overline{X_i}) = \sum C_n(\overline{X_i}) \cdot P_{in}$). En conséquence, la qualité de l'horaire global correspond donc simplement à la sommation des qualités des horaires individuels ($F(X) = \sum f_i(\overline{X_i})$). Il faudra cependant s'assurer que l'horaire résultant ne donne pas de grande diversité entre les qualités des horaires personnalisés. Modifier l'objectif pour faire la sommation du carré des fonctions objectifs des horaires personnalisés permettrait d'éviter ce problème, mais il forcerait démesurément la détérioration des horaires de tous les médecins en présence des demandes très difficiles ou impossibles à satisfaire d'un médecin.

Nous avons défini une série de contraintes générales, dont les valeurs associées, les

poids, peuvent mener à la confection d'horaires de qualité selon les préférences individuelles. Ces valeurs sont définies dans une matrice de poids (nombre de contraintes fois le nombre de médecins) et ils sont utilisés par l'algorithme pour confectionner des horaires personnalisés pour chaque médecin. Selon notre expérience avec les horaires cycliques, trouver de bonnes valeurs aux poids est une tâche difficile à cause de l'interrelation de certaines contraintes et du nombre de poids à ajuster. En fait, nos craintes sur la possibilité d'utiliser les méthodes de recherche avec tabous pour résoudre un problème si complexe reposaient essentiellement sur ce défi : "Comment ajuster tous ces paramètres pour que l'algorithme réussisse à confectionner un bon horaire individualisé ?" Nous expliquons plus en détail comment ajuster ces poids à la section 4.2.1.3.

Le nombre de contraintes est augmenté par la matrice de charge de travail et par des préférences propres à l'HGJ. La matrice de la charge de travail ajoute les contraintes : respecter la charge globale de chaque médecin et respecter la charge pour chaque type de quart. Nous n'avions pas à tenir compte de ces deux contraintes pour les horaires cycliques puisque nous travaillions sur un horaire unique. De plus, à cause des préférences des médecins de l'HGJ, d'autres contraintes sont ajoutées : affecter un maximum de 4 quarts par semaine et avoir les vendredis soir de congé (une option pour certains médecins). Pour simplifier le calcul de la qualité des horaires personnalisés, nous avons défini les contraintes d'une façon globale : ces contraintes sont les mêmes pour tous les médecins, mais nous permettons aux médecins de réaliser une certaine personnalisation de ces contraintes.

Voici les possibilités de personnalisation que nous avons déterminées pour l'HGJ :

- V1 : Comment préférez-vous les fins de semaine : brisées ou complètes ?
- V2 : Permettez-vous d'avoir des fins de semaine de travail consécutives ?
- V3 : Quel est le nombre maximum de nuits consécutives ?
- V4 : Quel est le nombre de nuits consécutives désirables ?

- V5 : Quel est le nombre minimum de jours entre les groupes de nuits ?
- V6 : Quel est le nombre maximum de quarts de travail dans un groupe ?

Une fois que nous avons obtenu les réponses aux questions de personnalisation, nous avons ajusté les poids des contraintes qui vont mesurer la qualité de l'horaire en fonction des préférences du médecin (ces poids ont également été vérifiés par le médecin en charge des horaires). Les contraintes à respecter sont les suivantes :

- P-01 : Respecter la charge totale de quarts tel que défini par le contrat.
- P-02 : Respecter la charge des quarts de nuit et fin de semaine tels que défini par le contrat.
- P-03 : Respecter la charge des quarts de jour, midi et soir tels que défini par le contrat.
- P-04 : Affecter un maximum de 4 quarts par semaine.
- P-05 : Avoir les vendredis soir de congé.
- P-06 : Respecter le choix sur les fins de semaine (V1).
- P-07 : Respecter le choix sur les fins de semaine consécutives (V2).
- P-08 : Avoir des séquences de travail de nuits selon le nombre maximum choisi (V3).
- P-09 : Avoir des séquences de travail de nuits selon le nombre désiré (V4).
- P-10 : Avoir un congé avec un minimum de deux jours après une séquence de travail de nuit.
- P-11 : Espacer les séquences de travail de nuit d'un nombre minimum de jours choisi (V5).
- P-12 : Ne pas avoir un jour de congé isolé.
- P-13 : Ne pas avoir un jour de travail avec un quart de jour, midi ou soir isolé.
- P-14 : Avoir des séquences de travail d'un nombre maximum choisi (V6).
- P-15 : Ne pas mélanger dans un même groupe les quarts de nuit avec les autres types de quarts de travail.
- P-16 : Faire en sorte que dans une séquence de travail consécutive, les quarts

soient d'un seul type (jour, midi, soir ou nuit).

- Respecter les règles ergonomiques du cycle circadien en effectuant les rotations de quarts de travail vers l'avant plutôt que vers l'arrière :
  - P-17 : à l'intérieur d'un groupe de travail ou
  - P-18 : d'un groupe de travail au suivant.

Comme on peut le constater, le nombre de contraintes dans ce nouveau contexte est supérieur à celui des horaires cycliques (voir section 3.1.2).

Nous avons défini la première matrice de poids associés aux contraintes en deux étapes : dans la première, nous avons défini les poids pour un "médecin type" de l'HGJ et, dans la deuxième, nous avons personnalisé les poids en fonction des préférences de chaque médecin. Nous présentons la matrice de poids avec les poids finaux que nous avons utilisés à la figure 4.6. À noter que les poids reflètent à la fois la préférence du médecin et l'importance relative de cette contrainte pour obtenir un horaire de qualité. Ainsi, les valeurs de la contrainte P-04 vont de 10 à 75 alors que les valeurs de P-07 vont de 0 à 3, une contrainte moins importante que P-04.

Nous avons défini un "médecin type" pour l'HGJ. Les poids de ce médecin type serviront de référence pour les poids associés à chaque médecin. Nous avons donc travaillé sur un horaire cyclique pour le contexte de l'HGJ afin d'obtenir le profil de ce médecin type travaillant à temps complet. Les résultats de cette expérience ont été présentés à la section 3.3.4. Nous avons utilisé les poids associés aux contraintes de l'horaire cyclique et défini intuitivement des poids associés aux contraintes non présentes dans l'horaire cyclique. Tous ces poids définissent le "médecin type".
Nous avons par la suite réalisé une première personnalisation des poids avec les renseignements fourni par le médecin responsable. Nous avons tout d'abord ajusté les valeurs de personnalisation des contraintes associées aux questions V1 à V6. Pour personnalisé les poids, nous avons simplement affecté une de ces deux valeurs : la valeur

	Médecin																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
V1*	B	B	B	C	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C	B	C	C	C	C	C	C	C
V2**	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
V3	1	3	2	3	1	1	2	3	2	2	5	3	1	0	0	2	3	5	3	3	3	3
V4	1	1	1	3	1	1	1	3	2	2	4	2	1	0	0	2	2	2	1	3	2	2
V5	0	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	0	7	7	7	7	7	7	7
V6	1	2	2	2	2	2	2	3	3	2	3	2	2	2	2	3	3	3	2	3	3	2
P-01	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
P-02	25	25	25	25	25	25	25	25	30	25	30	30	25	25	25	30	30	25	25	25	25	25
P-03	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
P-04	10	50	50	50	50	50	50	75	10	50	50	50	50	50	75	75	50	50	50	50	50	50
P-05	50	0	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P-06	10	20	20	4	20	20	15	10	10	4	10	10	10	10	20	2	10	10	4	4	4	4
P-07	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	0	3	3	1	3	3	3	3	3	3
P-08	0	10	10	7	15	7	7	7	1	7	7	10	10	0	7	7	7	7	7	7	7	7
P-09	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
P-10	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
P-11	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	0	10	5	10	10	10	10	10	10
P-12	1	1	0	0	0	1	1	0	0	5	0	5	0	5	5	5	5	5	5	0	0	5
P-13	0	0	0	0	0	0	0	5	5	0	5	2	0	0	0	2	5	5	0	5	5	5
P-14	5	5	5	5	5	5	5	3	3	5	2	5	5	5	5	2	5	5	5	5	1	1
P-15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P-16	0	1	1	1	1	0	2	2	2	0	2	2	0	0	0	1	2	2	0	2	2	2
P-17	15	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
P-18	0	1	1	1	1	2	2	2	2	0	2	2	2	0	0	1	2	2	0	2	2	2

* : B - Fins de semaine brisées C - Fins de semaine complètes

** : 0 - Fins de sem. consécutives 1 - Pas de fins de sem. consécutives

Figure 4.6 – Matrice des poids

du poids du médecin type ou la valeur zéro. La valeur zéro est ainsi affectée si la caractéristique de l'horaire qui est définie par la contrainte n'est pas jugée désirable par le médecin. Avec cette première matrice de poids personnalisée pour chaque médecin, l'algorithme est prêt à être testé et amélioré.

4.2.1.3 Problème décortiqué

Les premiers essais pour confectionner un horaire individualisé pour l'HGJ n'ont pas donné de bons résultats. À cause de la complexité du problème, il nous était difficile de savoir si la cause des mauvaises performances étaient dues à la mauvaise calibration des poids ou à une mauvaise exploration de l'espace de solutions de l'algorithme. Nous avons décidé de décortiquer le problème pour faciliter l'analyse de l'horaire et ainsi obtenir de bons horaires.

Nous avons décortiqué le problème en sous-problèmes. Nous avons utilisé une approche différente de celle utilisée pour décortiquer le problème des horaires cycliques. Au lieu de simplifier l'horaire sur lequel on travaille, on a gardé l'horaire original mais on a tenu compte de la qualité des horaires de seulement quelques médecins à la fois. Nous avons ainsi modifié la fonction objectif de l'algorithme pour se concentrer sur quelques horaires personnalisés. Ceci est facile à faire, il suffit de sélectionner un groupe d'horaires personnalisés et dire à l'algorithme de tenir compte seulement de la qualité de ces horaires, en mettant la qualité des autres horaires toujours à zéro ($f_i(\overline{X_i}) = 0$) quelque soit leur qualité réelle. Cette stratégie permet donc de trouver des bons horaires pour le groupe choisi. Évidemment, ceci peut avoir des effets très néfastes sur la qualité des autres horaires, mais c'est une façon simple de débuter l'amélioration de notre algorithme.

Nous avons tout d'abord travaillé sur l'horaire en tenant compte de quelques médecins seulement et nous avons observé une mauvaise distribution de la charge de

travail. Cette mauvaise distribution était insensible aux ajustement des poids. Avant de considérer l'ajout de la matrice de la charge par semaine (voir section 4.2.1.1), nous avons analysé plus en détail le fonctionnement de l'algorithme. Nous avons ainsi identifié une faiblesse. L'algorithme a de la difficulté à modifier l'horaire d'un médecin quand les contraintes de la charge de travail sont satisfaites. En effet, les voisinages explorés par l'algorithme correspondent à effectuer des permutation entre les horaires individuels de deux médecins (deux lignes) sur une, deux ou trois colonnes adjacentes. Lorsque les deux horaires individuels impliqués satisfont déjà ces contraintes, de telles permutations vont donc très souvent déséquilibrer leur charge de travail. Puisque ces contraintes sont très importantes, le poids qui leur est associé est élevé rendant leur violation très coûteuse. Du coup, l'algorithme aura beaucoup de mal à trouver des solutions intéressantes puisqu'elles violeront probablement toutes ces contraintes et il risque de stagner dans la même région.

Une fois améliorée la distribution de quarts, nous avons travaillé sur l'horaire d'un seul médecin. Nous avons ajusté les poids associés aux contraintes pour obtenir des horaires reflétant mieux les préférences individuelles du médecin. Nous avons développé un voisinage pour pallier à cette faiblesse de l'algorithme. Ce nouveau voisinage utilise deux colonnes non adjacentes, puis identifie les lignes impliquant le même quart de travail dans chacune des colonnes. Il permute les deux couples à la fois pour garder le respect de la charge de travail. Grâce à ce voisinage, nous n'avons pas eu besoin d'utiliser la matrice de la charge par semaine (figure 4.4) pour obtenir une bonne distribution des quarts dans les horaires. Nous avons appelé ce voisinage "Voisinage-8". Il est présenté plus en détail à la section 4.2.2.5.

Par la suite, les poids ont été modifiés selon l'expérience acquise avec le contexte de l'HCL et en fonction des essais réalisés pour obtenir des horaires personnalisés optimaux (avec une qualité égale à zéro). Lorsqu'on confectionne un horaire pour un

seul médecin, tout en gardant les autres horaires avec une qualité de zéro ($f_i(\overline{X_i}) = 0$), l'algorithme a été incapable d'obtenir un horaire optimal pour certains médecins. Ceci nous porte à croire que la confection de cet horaire individuel ne pourra probablement jamais satisfaire toutes les contraintes et préférences du médecin en question, et donc que l'horaire complet ne pourra être "parfait" lui non-plus. La cause de ceci est qu'il existe un ou plusieurs conflits dans la définition des contraintes, les valeurs de personnalisation (V1 à V6) ou les données (charge de travail et jours de non-disponibilité) de ce médecin. Par exemple, un médecin qui préfère travailler les fins de semaine brisées (seulement le samedi ou le dimanche) et qui préfère également travailler les fins de semaine non consécutives ne pourra travailler au maximum 1 fin de semaine sur 2. En effet, il y a 13 fins de semaine dans l'horaire. Il doit donc faire un maximum de 6 quarts de fin de semaine pour respecter entièrement ses préférences. Si d'autre part, sa charge de travail prévoit 8 quarts de fin de semaine, il sera alors impossible d'obtenir un horaire personnalisé à valeur zéro. Lorsqu'on confectionne un horaire, il faut être conscient du fait qu'à cause de ces conflits possibles, la qualité de l'horaire optimal n'est pas toujours égale à zéro. Une fois ces conflits identifiés on doit modifier les données ou les contraintes afin de les éliminer et ainsi rendre possible l'obtention d'un horaire optimal pour ce médecin. Pour les médecins avec des conflits, nous avons travaillé en collaboration avec le médecin responsable de l'HGJ pour les résoudre.

4.2.1.4 Collaboration avec l'HGJ

Le Dr. Unger responsable des horaires à l'HGJ a une grande connaissance des préférences des médecins. Avec sa collaboration, nous avons modifié certaines valeurs de personnalisation et relaxé certaines contraintes des médecins avec des conflits. Nous avons pu déterminer de bons poids pour ces médecins et obtenir des horaires optimaux. Le médecin responsable a validé les résultats obtenus pour les horaires personnalisés pour tous les médecins. L'étape suivante a été de confectionner un horaire

individualisé, en mesurant la qualité de tous les horaires en même temps.

Quand nous avons travaillé avec l'horaire global, nous n'avons pas obtenu de bons résultats. Il a fallu réaliser quelques modifications dans les poids à cause des interactions entre certains poids de différents médecins, que grâce à notre expertise nous avons été en mesure d'identifier et de corriger. Après ces modifications l'algorithme a obtenu un bon horaire individualisé pour l'HGJ dans un temps raisonnable.

Le médecin responsable était intéressé à garder sa façon séquentielle de confectionner l'horaire, construisant l'horaire en ajoutant un horaire personnalisé à la fois. Pour pouvoir confectionner l'horaire d'une façon séquentielle avec notre algorithme, nous permettons de fixer un ou plusieurs horaires personnalisés, de façon à ce que les horaires fixés restent inchangés tout au long de la confection. Voici la méthode pour confectionner un horaire individualisé pour l'HGJ de façon séquentielle avec notre algorithme :

(1) Confectionner un horaire personnalisé pour le premier médecin, en mettant la qualité des autres horaires à zéro.

(2) Confectionner un horaire personnalisé pour le deuxième médecin, en mettant comme "fixe" l'horaire déjà confectionné du premier médecin et en mettant la qualité des autres horaires à zéro.

(3) Confectionner un horaire personnalisé pour le troisième médecin, en mettant fixe les horaires déjà confectionnés et en mettant la qualité des autres horaires à zéro, et ainsi de suite, jusqu'à l'avant dernier horaire.

(4) Confectionner les deux derniers horaires, en gardant fixe les autres horaires.

Nous n'avons pas testé la performance de cette méthode versus la méthode non-séquentielle qui tient compte de la qualité de tous les médecins en même temps. Nous soupçonnons que la méthode séquentielle est moins efficace du point de vue mathématique. Cependant, il permet la modification facile d'un horaire par le médecin

responsable et l'ajout de l'expertise de celui-ci dans la confection d'un horaire peut être d'une grande utilité afin d'obtenir un horaire global de bonne qualité.

L'algorithme a été capable de confectionner un bon horaire individualisé pour l'HGJ en tenant compte des préférences et demandes des médecins. L'algorithme est présenté dans la section suivante.

4.2.2 Algorithme Tabou pour les horaires individualisés

Voici l'algorithme pour confectionner les horaires individualisés :

Algorithme Tabou pour les horaires individualisés

Début

Best_hor := horaire initial

Best_sol := coût (horaire initial)

Pour l=1 à %nombre_répétitions

A := horaire initial

Best_hor_temp := A

Best_sol_temp := coût (A)

Listes tabou := ∅

Construction de l'horaire initial

Pour k=1 à %Max_iter

Voisinage-1 (Exploration locale)

Voisinage-7 (Exploration locale)

Si Best_hor_temp n'a pas été amélioré depuis Y itérations alors

Voisinage-2 (Diversification niveau 1)

Voisinage-8 (Diversification niveau 1)

Si Best_hor_temp n'a pas été amélioré depuis Y_1 itérations alors

Diversification par poids (Diversification niveau 2)

Retour

Si Best_sol_temp < Best_sol alors

Best_hor := Best_hor_temp

Best_sol := Best_sol_temp

Retour

Fin

Cet algorithme est très similaire à l'algorithme de la nouvelle approche générant les horaires cycliques (voir section 3.3.2). Les seules différences visibles entre les deux algorithmes sont relatives aux voisinages. Il y a deux nouveaux voisinages, le Voisinage-7 et le Voisinage-8, deux autres ont disparu, le Voisinage-4 et le Voisinage-5, et le Voisinage-1 et le Voisinage-2 ont été repris avec des adaptations mineures.

Parmi les modifications qui ne sont pas visibles, il y a eu des changements significatifs dans la fonction objectif et les poids, et nous avons adapté les valeurs des paramètres (*%nombre_répétitions, %Max_iter, Y et Y_1*) aux caractéristiques du nouvel horaire.

4.2.2.1 Construction de l'horaire initial

L'horaire initial est un horaire de très mauvaise qualité. Il est le résultat du simple jumelage de la matrice de la demande et de celle des vacances. Avant d'appliquer l'algorithme principal de recherche avec tabous, l'algorithme améliore la qualité de l'horaire initial avec une phase de "construction". La construction de l'horaire initial est très similaire à celle des horaires cycliques (voir section 3.3.2.1). Il y a seulement deux différences : (1) l'algorithme de construction est centré sur le Voisinage-2, comme dans le cas des horaires cycliques, mais, en plus, sur le Voisinage-7 et (2) le paramètre n est 5 fois plus grand.

4.2.2.2 Exploration locale niveau 1 : Voisinage-1

Ce voisinage est le même que celui de l'algorithme de Labbé (voir section 3.2.3.1).

4.2.2.3 Exploration locale niveau 1 : Voisinage-7

Ce voisinage analyse tous les changements possibles par blocs de 1, 2 ou 3 colonnes adjacentes entre deux horaires personnalisés (lignes). Puisque les horaires personnalisés sont indépendants et le nombre de colonnes est assez grand, on peut analyser seulement deux lignes à la fois. Dans les figures 4.7 (bloc1) et 4.8 (bloc2 et bloc3) nous avons présenté un exemple. Voici le Voisinage-7 en pseudo code :

Procédure Voisinage-7

Choisir deux horaires personnalisés (lignes, k et l)
Pour chaque colonne faire :
  Pour chaque bloc (bloc1, bloc2 et bloc3) faire :
    A' := A
    Identifier bloc (bloc1, bloc2 et bloc3)
    Si la permutation pour le bloc est possible :
      Permuter bloc ⇒ A'
      Si A' est minimal, bloc' := bloc
      Si A' est tabou mais F(A') < Best_sol, bloc' := bloc
  Retour
Retour
Implanter la permutation minimale (bloc') dans A
Mettre à jour la liste tabou
Mettre à jour Best_hor_temp et Best_sol_temp si amélioration globale

L'exploration de tous les couples d'horaires est trop coûteuse en terme de temps pour pouvoir être effectuée systématiquement. Le Voisinage-7 analyse un seul couple d'horaires personnalisés : ils sont choisis parmi ceux qui ont les plus faibles niveaux de qualité.

Horaire de départ

	L	M	M	J	V	S	D
Med 1	J	J					
Med 2					J	J	J
Med 3			J	J			

Lignes choisis : le Med 1 et le Med 2

Solutions voisines obtenues par permutation de bloc1*

	L	M	M	J	V	S	D
Med 1		J					
Med 2	***J***				J	J	J
Med 3			J	J			

	L	M	M	J	V	S	D
Med 1	J						
Med 2		***J***			J	J	J
Med 3			J	J			

	L	M	M	J	V	S	D
Med 1	J	J			***J***		
Med 2						J	J
Med 3			J	J			

	L	M	M	J	V	S	D
Med 1	J	J				***J***	
Med 2					J		J
Med 3			J	J			

	L	M	M	J	V	S	D
Med 1	J	J					***J***
Med 2					J	J	
Med 3			J	J			

* les solutions voisines identiques à l'horaire de départ ne sont pas traitées.

Figure 4.7 – Exemples des solutions avec Voisinage-7, bloc1

Horaire de départ

	L	M	M	J	V	S	D
Med 1	J	J					
Med 2					J	J	J
Med 3			J	J			

Lignes choisis : le Med 1 et le Med 2

Solutions voisines obtenues par permutation de bloc2 *

	L	M	M	J	V	S	D
Med 1							
Med 2	***J***	***J***			J	J	J
Med 3			J	J			

	L	M	M	J	V	S	D
Med 1	J	J			***J***	***J***	
Med 2							J
Med 3			J	J			

	L	M	M	J	V	S	D
Med 1	J	J				***J***	***J***
Med 2					J		
Med 3			J	J			

Solutions voisines avec permutation de trois colonnes (bloc3) *

	L	M	M	J	V	S	D
Med 1	J	J			***J***	***J***	***J***
Med 2							
Med 3			J	J			

* les solutions voisines déjà traitées

ou identiques à l'horaire de départ ne sont pas traitées.

Figure 4.8 – Exemples des solutions avec Voisinage-7, bloc2 et bloc3

4.2.2.4 Exploration locale niveau 2 : Voisinage-2

Ce voisinage est le même que celui de l'algorithme de Labbé (voir section 3.2.3.2).

4.2.2.5 Exploration locale niveau 2 : Voisinage-8

Quand la charge de travail d'un médecin est satisfaite, il est difficile d'améliorer la qualité de son horaire en permutant des colonnes adjacentes qui vont fort probablement modifier la charge de travail. Le Voisinage-8 fait deux permutations dans deux colonnes non-adjacentes (o et p).

Le principe de ce voisinage consiste à interchanger les quarts de la colonne o se trouvant dans les horaires de deux médecins et, simultanément, à effectuer la même modification dans la colonne p. Afin d'essayer de mantenir la même charge de travail dans les deux horaires individuels impliqués sans que cela n'implique un trop grand effort de calcul, nous ne considérons qu'un sous-ensemble des couples possibles. Les seuls échanges analysés seront ceux qui impliquent le même type de quart au départ de chaque permutation. Plus précisément, on se restreint à des permutations où le quart de la colonne o qui quitte l'horaire du premier médecin est le même que celui qui quitte l'horaire du deuxième médecin dans la colonne p. Sur l'ensemble de ces deux permutations simultanées, la charge des deux horaires impliqués en termes de ce type de quart restera inchangée. Il se peut toutefois que les deux autres quarts impliqués soient différents l'un de l'autre ce qui évidemment modifie alors la charge de travail des médecins impliqués pour ces types de quarts. Bien que ceci soit un inconvénient, nous avons préféré le laisser ainsi pour que l'évaluation de ce nouveau voisinage ne soit pas trop coûteuse. Un exemple est présenté à la figure 4.9.

Voici le Voisinage-8 en pseudo code :

Procédure Voisinage-8

Choisir %e colonnes non-adjacentes

Pour chaque couple de colonnes o et p faire

  Pour chaque type de quart dans la colonne o faire

    A' := A

    Identifier les couples c_o *et* c_p *avec ce type de quart*

    Permuter les deux couples (c_o *et* c_p) $\Rightarrow$ *A'*

    Si A' est minimal, $c'_o := c_o$ *et* $c'_p := c_p$

    Si A' est tabou mais F(A') < Best_sol, $c'_o := c_o$ *et* $c'_p := c_p$

  Retour

Retour

Implanter la permutation minimale (c'_o *et* c'_p)

Mettre à jour la liste tabou

Mettre à jour Best_hor_temp et Best_sol_temp si amélioration globale

De façon similaire au Voisinage-1 et Voisinage-2, il serait trop coûteux en temps d'évaluer pour tous les couples de colonnes non-adjacentes. Alors seulement une fraction des colonnes de l'horaire sont analysées. Le paramètre %e définit le nombre de colonnes à analyser. Ces colonnes sont choisies de façon aléatoire.

Horaire de départ

	L	M	M	J	V	S	D	Charge
Med 1	J	J						2
Med 2					J	J	J	3
Med 3			J	J				2

Les colonnes choisies sont le lundi (L), mercredi (X) et samedi (S)

Colonne du lundi (L) et mercredi (X)

	L	M	M	J	V	S	D	Charge
Med 1		J	***J***					2
Med 2					J	J	J	3
Med 3	***J***			J				2

Colonne du lundi (L) et samedi (S)

	L	M	M	J	V	S	D	Charge
Med 1		J				***J***		2
Med 2	***J***				J		J	3
Med 3			J	J				2

Colonne du mercredi (X) et samedi (S)

	L	M	M	J	V	S	D	Charge
Med 1	J	J						2
Med 2			***J***		J		J	3
Med 3				J		***J***		2

Figure 4.9 – Exemples des solutions avec Voisinage-8

4.2.3 Exploration du domaine

Les principaux outils de l'algorithme pour réaliser une bonne exploration du domaine des solutions sont : la diversification par changement de poids, la construction de l'horaire initial (déjà présenté à la section 4.2.2.1) et la résolution répétée du problème. Ces outils sont les mêmes que ceux développés pour la confection des horaires cycliques (voir sections 3.3.2.1, 3.3.2.6 et 3.3.2.7, respectivement). Nous avons réalisé une adaptation simple de ces outils pour la confection des horaires individualisés. Nous avons remarqué que l'horaire final était amélioré. Mais, plus de recherche serait nécessaire pour évaluer clairement le potentiel de ces outils pour confectionner de bons horaires individualisés.

4.3 Résultats

L'algorithme prend un temps de 3 heures pour trouver la meilleure solution, mais il continue pendant 20 heures de plus à cause du critère d'arrêt par stagnation. Nous avons obtenu ce temps de calcul en utilisant une station de travail Sun "Ultra10". Le temps de confection est un temps raisonnable pour la salle d'urgence de l'HGJ, en considérant que le médecin responsable prend actuellement entre une et deux semaines. Le nombre d'horaires différents analysés est approximativement $\simeq 5 \cdot 10^8$. Les figures 4.10 et 4.11 montrent l'évolution de la recherche avec tabous pour la confection des horaires individualisés. La figure 4.10 montre l'évolution de la qualité du meilleur horaire qui est grandement amélioré pendant la phase de construction de l'horaire initial, c'est-à-dire dans les 300 premières itérations. En comparaison avec l'algorithme pour construire les horaires cycliques, le nombre d'itérations pour la construction de l'horaire initial est 10 fois plus grand. La figure 4.11 montre l'évolution de la qualité de l'horaire courant entre les itérations 500 et 2000. Contrairement au cas des horaires cycliques (voir figure 3.15), le processus d'amélioration n'est pas encore stabilisé après 2000 itérations. Les pointes sont produites par le Voisinage-2 et Voisinage-8

pour surmonter les optima locaux générés par le Voisinage-2 et le Voisinage-7, car la diversification par poids n'a pas encore été activée (sa première activation a lieu à l'itération 10000).

L'algorithme a confectionné un horaire satisfaisant l'HGJ et de qualité similaire à celui confectionné par l'HGJ pour cette période. L'horaire est présenté à la figure 4.12 et à la figure 4.13. Cet horaire répond à la plupart des préférences des médecins. Il satisfait à 100% les contraintes souples les plus importantes (P-01, P-02, P-04, P-05, P-07, P-10, P-15 et P-17, voir section 4.2.1.2) et chacune des autres contraintes sont violées moins de 10 fois pour un total de 38 violations (1 fois : P-08, 2 fois : P-03, P-11 et P-18, 4 fois : P-06, P-12 et P-16, 5 fois : P-13, 6 fois : P-09 et 8 fois : P-14, voir section 4.2.1.2). La qualité est très similaire à celle de l'horaire confectionné par l'HGJ, mais le temps de confection est nettement moindre. La qualité de l'horaire obtenu démontre les possibilités très encourageantes concernant la mise-en oeuvre de ce type d'approche même dans un contexte aussi difficile que celui de lHGJ.

Même si les résultats sont satisfaisants, il reste beaucoup de travail à réaliser. L'algorithme a donné de bons résultats pour un contexte concret, pour lequel un grand travail a été nécessaire afin de définir des poids appropriés pour les médecins. Il faut que les poids soient facilement adaptables à d'autres contextes de l'HGJ et à d'autres urgences pour pouvoir développer des outils simples capables de réaliser de bonnes définitions de poids pour n'importe quel contexte. Pour développer ces outils, il faut plus de travaux de recherche pour avoir une meilleure compréhension de l'influence des poids et des inter-relations entre les différentes contraintes et préférences.

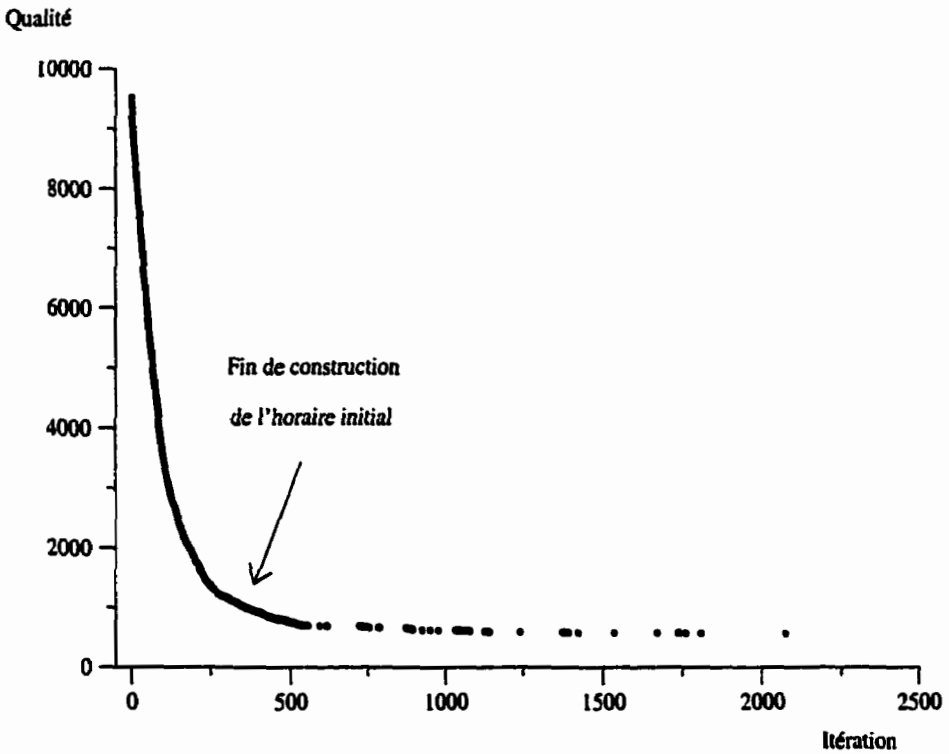

Figure 4.10 – Évolution de la qualité du meilleur horaire (Best_sol)

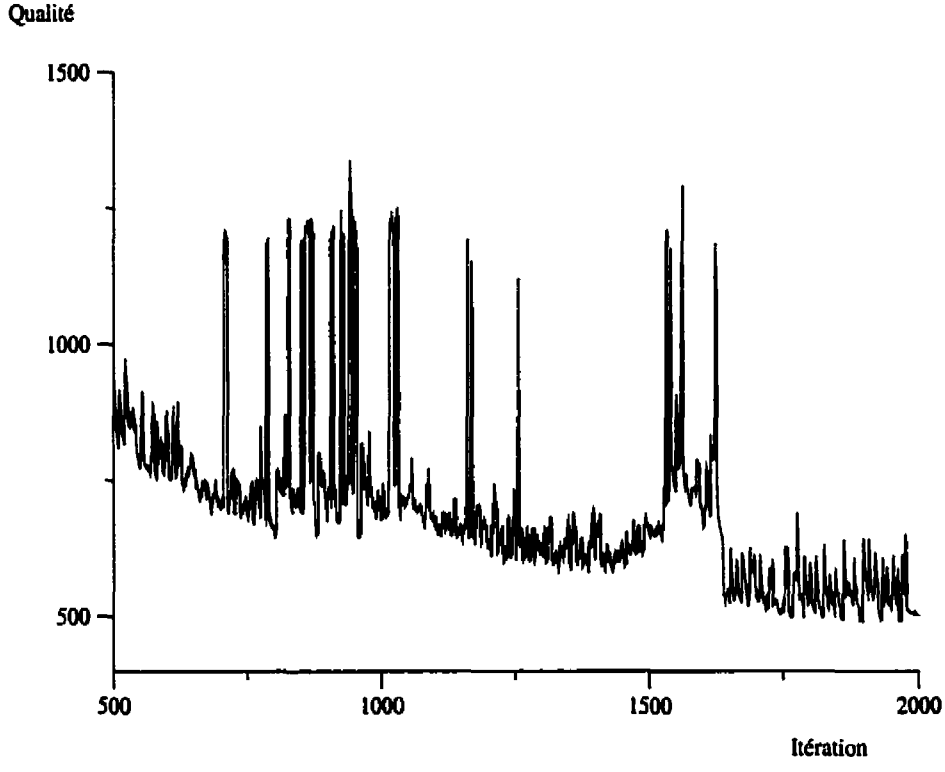

Figure 4.11 – Évolution de la qualité de l'horaire courant après l'itération 500

	1							2							3							4							5							6							7	
Med	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	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D
1								E1			FT				D1					•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•					FT							D1		
2	FT	FT			E2			PP	E1			D1			•	FT					ZZZZ			FT	D1	•	X1			FT			Y1			D1			NT				PP						
3	E1						•	FT		E1		SS	Y2						D1		Y1			PP	PP	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	FT	E2		D1	FT		
4	PP			E2		ZZ				D1	PP		X1	Y1			SS	D1	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	X1		E1	Y1	•			FT	D1				E1				SS				ZZZZ	
5		SS	E1		D1		ZZ			SS	SS				SS			PP		X1		D1	SS		E1	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		PP		SS	SS		
6		D1				X1		D1	SS						PP	NT			•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•					
7			SS	E1	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	PP			SS			E1	PP		SS	•	•	X1		D1	SS		•	Y1	Y1			SS		PP			E1					X1	X1
8	SS	E2		SS	PP			NT	NT						E1	E1								SS	E2	•	ZZ	ZZ	ZZ									PP	E1		X1	X1	SS		D1	PP			
9						X2	X2	SS		PP	E1	PP				SS	E1	E2	PP			SS	E2			X1	Y2			SS	D1		•	ZZ	ZZ			D1	D1	E2			D2	E1				Y1	Y1
10	•		•	•		Y2	Y2	•		•	•				•		•	•	E1			•		•	•	ZZ			•	E2	•	•	•	•		•	E1	•	•			ZZ	•		•	•		X2	
11	E2			D1	SS					•					NT			SS	E2	Y2		PP	E1	E1	NT	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	SS	SS		SS	SS					NT				
12	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		D1		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		E2	Y2	•	•	•	E2							NT	NT				Y2	Y2
13			•							E2	NT		•	•		E2		FT	FT		X1	NT			•	•	•	•	Y2	E1				X2	X2		NT				X2	Y2			SS				
14													X2	Y2												X2	X2	Y2					•	•	•	•												•	•	•
15						•							•						•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			E2	E2			X2	E2						X2
16	NT	NT		•		Y1	Y1		E2	NT				X1	E2			NT	NT			D2	D1			Y1		X2	X2	NT			X1			PP	E2	NT			Y2			FT	E1	NT	•	•	•
17			NT	NT	NT			D2	D1			E2					NT			Y1	Y2						Y1	Y1			FT	X1				NT					Y1	Y1					NT		
18	D2	PP	E2	•							•	NT	ZZ	ZZ				•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•				•	X2	X1	X1	E1			•				D1	D1	E2	•			
19																							NT	NT			•		Y1				•		Y2				FT	D1							E1		
20			D1	FT	FT				FT	FT	E2			X2	FT	•	E2			X2	X2	E2		D1	FT	Y2						X2	Y2	Y2		D2	FT	FT								E2	E2		
21			FT	PP	E1		X1	E2	PP		D1	E1			D2	D1	PP					FT	FT	E2			•	•				ZZ	ZZ					PP	E1	PP					FT	FT	PP		
22	D1	E1	PP			•	•	•				FT	Y1				FT	E1	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			NT										NT	ZZ				PP	E1			

D1, D2, FT, S , X1 ou X2 : quart de jour, E1, E2, Y1 ou Y2 : quart de soir

P : quart de midi et NT ou Z : quart de nuit

• : jour de non-disponibilité ou vacances et vide : jour de congé

Figure 4.12 – Horaire confectionné pour l'HGJ (semaines 1 à 7)

	8							9												10							11							12							13	
Med	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	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D
1												D1	Y1				E1			X1						D1								X1								
2		FT	E1		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			FT	PP			X1	E1		FT	D1							D1	E1			D1	E2			D1		
3	NT	NT			D1					E1	PP		ZZ	ZZ			PP		SS							PP			•		SS	SS			X1	SS		E2	•	•	•	•
4				E1	E2			PP	E1		FT	PP				FT	D1		E1			FT			NT	NT					D1		PP			D2	FT		FT	SS		
5	E2		FT	PP		ZZ				E2		SS			PP			NT				PP		SS	SS		Y1		SS	E1			D1			FT		NT			Y2	
6	SS						ZZ				SS			Y1	E1			SS	D1			SS	SS			SS		Y1	E1									SS	SS			
7			PP			•		SS	NT			E1		•		SS	SS			ZZ	ZZ									SS	NT						D1	D1	•	•	•	•
8		SS	SS	SS	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	SS	PP			NT				D1	E1	PP				D2				SS	Y1	Y1			E1	PP	PP		
9			D1	D1	SS				SS	SS	NT	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		E2	E2	E1					SS		NT	NT	ZZ	
10	•		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	E1	•	•			Y2	•	NT	•	•				•		•	•	FT		
11	E1	PP				X1	X1	NT										E1	PP			D1	PP				ZZ	ZZ			PP	PP				E1	PP				Y1	Y1
12			NT					FT			D1	FT			NT					X2	X2	D2							FT	FT						NT						X1
13	D2			NT	NT			D1			E2		Y2	Y2				FT				NT				FT	•	•	NT	•	•	•			•		•	•	•			•
14	•	•	•	•	•	•	•						X2	X2													Y2							X2	X2						X2	X2
15								E2				E2			E2	E2			E2							E2			E2			E2										
16	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	D2	D1				Y2	Y2			D1	FT	E1			•	D1	FT	FT	FT			E2	NT				X1	Y2
17	D1	E2			FT	X2		E1	E2			NT			FT	E1		D1	FT			E2	E2				X1	X1				NT	NT						E1	E2		
18	PP	E1	E2	•					FT	D1	•							•		Y1	Y1		NT	NT	•				PP	PP	E1	•				PP	E1	PP	•			
19				E2			X2			NT					D1											•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
20	FT	D1				Y2	Y2		D1	FT		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•			E2	E2		X2	X2	D1				E2	Y2	Y2			FT	E2			
21					E1	Y1	Y1			PP	E1					NT	NT		•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•							ZZ
22				FT	PP			D2	PP				X1	X1			E2	E2				•	FT	PP	E1									ZZ	ZZ				D1	E1		

D1, D2, FT, S , X1 ou X2 : quart de jour, E1, E2, Y1 ou Y2 : quart de soir

P : quart de midi et NT ou Z : quart de nuit

• : jour de non-disponibilité ou vacances et vide : jour de congé

Figure 4.13 – Horaire confectionné pour l'HGJ (semaines 8 à 13)

CONCLUSION

Le travail des médecins d'urgence est stressant et fatigant de par la nature des services offerts mais aussi en raison du travail de nuit et des rotations de quarts de travail. Il est possible de minimiser les effets négatifs du travail de nuit et des rotations de quarts en utilisant d'horaires qui respectent les règles ergonomiques. Selon notre revue de la littérature, il y a un grand besoin de travaux de recherche dans le développement d'outils pour la confection de "bons" horaires ergonomiques pour les médecins d'urgence. Les méthodes exactes s'avèrent souvent trop rigides pour la résolution de ce type de problèmes, tandis que la recherche avec tabous, plus flexible, a le potentiel de s'adapter aux exigences du problème. Notre objectif était de développer un algorithme capable de confectionner de bons horaires dans un temps raisonnable. Les deux algorithmes que nous avons développés ont produit des horaires satisfaisants pour les médecins de nos hôpitaux partenaires.

Nous avons travaillé sur la confection des horaires cycliques pour l'Hôpital Charles-Lemoyne (HCL) à partir de l'algorithme de recherche avec tabous de Labbé [25]. Il nous a fallu maîtriser le problème de confection des horaires cycliques ainsi que la recherche avec tabous pour améliorer la flexibilité et la robustesse de l'algorithme existant. Nous y avons incorporé une phase de diversification par changement de poids, une phase de construction de l'horaire initial et deux nouveaux voisinages. Ce nouvel algorithme a confectionné un horaire de meilleure qualité pour le contexte de l'HCL. Nous avons validé ces améliorations dans d'autres scénarios avec des résultats

satisfaisants. Nous avons aussi développé un logiciel sur ACCESS 97 qui fait le lien entre l'horaire cyclique et l'horaire réel, facilitant les tâches reliées à la génération et à la gestion de l'horaire réel à l'HCL.

Suite au succès obtenu dans la résolution du problème de confection des horaires cycliques, nous avons travaillé sur un problème plus général, soit la confection d'horaires individualisés. Ce problème est plus complexe à cause de l'augmentation du nombre de paramètres à ajuster. Pour mener à bien ces travaux, nous avons pu bénéfier de la collaboration de la salle d'urgence de l'Hôpital Général Juif de Montréal (HGJ) qui utilise un horaire de ce type. Dans un premier temps, nous avons transformé l'algorithme développé pour la confection des horaires cycliques, mais ce premier algorithme n'a pas eu la performance attendue. Nous avons donc amélioré l'algorithme en ajoutant deux nouveaux voisinages et en ajustant les valeurs des poids associés aux contraintes. Ces améliorations nous ont permis de confectionner un horaire de qualité similaire à celui confectionné par l'HGJ.

Malgré les résultats satisfaisants, l'algorithme de confection des horaires individualisés est encore dans une phase initiale. Plus de travail est requis afin d'augmenter sa flexibilité et sa robustesse pour qu'il soit capable de s'adapter facilement à d'autres scénarios. D'autre part, une analyse plus approfondie de l'impact des poids associés aux contraintes est nécessaire afin d'aider au développement de méthodes simples pour les déterminer. Ces travaux permettront le développement d'un logiciel de confection d'horaires individualisés de très grande qualité sur le plan ergonomique qui puisse facilement s'adapter à différents contextes. Nos algorithmes aideront ainsi les hôpitaux dans la confection des horaires plus satisfaisants pour les médecins d'urgence, augmentant ainsi leur taux de rétention des médecins et, en conséquence, les aidant à poursuivre leur mission auprès de la population.

Bibliographie

[1] American College of Emergency Physicians (1999). Circadian rhythms and shift work, *Directory of sofware in emergency medecine* **36**, Dallas, États Unis (http ://www.acep.org).

[2] AMILCAR, R. (1996). La gestion des horaires de travail des médecins à l'urgence, *Projet de fin d'études*, École Polytechnique de Montréal, Canada.

[3] BEAULIEU, H., FERLAND, J.A., GENDRON, B. et LEFEBVRE, L. (1998). A computer system based on optimization for scheduling physicians in the emergency room, publication #1127, DIRO, Université de Montréal, Canada.

[4] BERRADA, I., FERLAND, J.A. et MICHELON, P. (1996). A multi-objective approach to nurse scheduling with both hard and soft constraints, *Socio-Economic Planning Sciences* **30**, 183–193.

[5] BLAKE, J. et CARTER, M.W. (1996). An analysis of emergency room wait time issues via computer simulation, *INFOR* **34 :4**, 263–273.

[6] BURKE, P., DE CAUSMAECKER, P. et VANDEN BERGHE, G. (1999). A hybrid tabu search algorithm for the nurse rostering problem, *Lecture Notes in Computer Science* **1585**, 187–194.

[7] BURNS, R.N. et CARTER, M.W. (1985). Work force size and single shift schedules with variable demands, *Management Science* **31**, 599–607.

[8] BURNS, R.N. et KOOP, G.J. (1987). A modular approach to optimal multiple-shift manpower scheduling, *Operations Research* **35**, 100–110.

[9] CARTER, M.W. et LAPIERRE, S.D. (1999). Scheduling Emergency Room Physicians, publication 99-23, Centre de Recherche sur les Transports, Montréal, Canada.

[10] COSTA, G. (1996). The impact of shift and night work on health, *Applied Ergonomics* **27**, 9–16.

[11] DOWSLAND, K.A. (1998). Nurse scheduling with tabu search and strategic oscillation, *European Journal of Operational Research* **106**, 393–407.

[12] EMMONS, H. (1985). Work-force scheduling with cyclic requirements and contraints on days off, weekends off, and work stretch, *IIE Transactions* **17**, 8–16.

[13] GENDREAU, M., HERTZ, A. et LAPORTE, G. (1994). A tabu search algorithm for the vehicle routing problem *Management Science* **40**, 1276–1290.

[14] GLOVER, F. (1977). Heuristics for integer programming using surrogate constraints, *Decision Science* **8**, 156–166.

[15] GLOVER, F. (1986). Future Paths for integer programming and links to artificial intelligence, *Computers and Operations Research* **5**, 533–548

[16] GLOVER, F. (1989). Tabu search - Part I, *ORSA Journal on Computing* **1(3)**, 190–206.

[17] GLOVER, F. (1990). Tabu search - Part II, *ORSA Journal on Computing* **2(1)**, 4–32.

[18] HANSEN, P. (1986). The steepest ascent mildest descent heuristic for combinatorial programming, présenté au *Congress on numerical methods in combinatorial programming (1986)*, Capri, Italie.

[19] HERTZ, A., TAILLARD, E. et DE WERRA, D. (1997). Tabu search, local search in combinational optimisation, ISBN 0471 948225, 121-137.

[20] HUNG, R. (1997). Shiftwork scheduling with phase-delay feature, *International Journal of Production Research* **35**, 1961–1968.

[21] JAUMARD, B., SEMET, F. et VOVOR, T. (1998). A generalized linear programming model for nurse scheduling, *European Journal of Operational Research* **107**, 1–18.

[22] KNAUTH, P. (1993). The design of shift systems, *Ergonomics* **36**, 15–28.

[23] KNAUTH, P. (1996). Design better shift systems, *Applied Ergonomics* **27 :1**, 39–44.

[24] KOGI, K. et THURMAN, J.E. (1993). Trends in approaches to night and new international standards, *Ergonomics* **36**, 3–13.

[25] LABBÉ, S. (1998). La confection automatisée d'horaires pour les médecins en salles d'urgence, Mémoire de Maîtrise, *École des Hautes Études Commerciales*, Montréal, Canada.

[26] LAPORTE, G., NOBERT, Y. et BIRON, J. (1980). Rotating schedules, *European Journal of Operational Research* **4**, 24–30.

[27] LAPORTE, G. (1998). The art and science of designing rotating schedules, publication G-98-43, GERAD, *École des Hautes Études Commerciales*, Montréal, Canada.

[28] LAU, H.C. (1996). On the complexity of manpower shift scheduling, *Computers and Operations Research* **23**, 93–102.

[29] SCHWARZENAU, P., KNAUTH, P., KIESSWETTER, E., BROCKMANN, W. et RUTENFRANZ, J. (1986). Algorithms for the computerized construction of shift systems which meet ergonomic criteria, *Applied Ergonomics* **17 :2**, 169–176.

[30] SHERALI, H.D. (1981). Equivalent weights for lexicographic multi-objective programs : charaterizations and computations, *European Journal of Operational Research* **11**, 367–379.

[31] SMITH, L.D. et WIGGINS, A. (1977). A computer based nurse scheduling system, *Computers and Operations Research* **4**, 195–212.

[32] SORIANO, P. et GENDREAU, M. (1996). Diversification strategies in tabu search algorithms for the maximum clique problem, *Annals of Operations Research* **63**, 189–207.

[33] SORIANO, P. et GENDREAU, M. (1997). Fondements et applications des méthodes de recherche avec tabous, *RAIRO Recherche opérationnelle* **31(2)**, 133–159.

[34] VASSILACOPOULOS, G. (1985). Allocating doctors to shifts in an accident and emergency department, *Journal of the Operational Research Society* **36**, 517–523.

[35] WARNER, D.M. (1976). A mathematical programming model for scheduling nursing personnel in a hospital, *Operations Research* **24**, 842–885.