

**Titre:** Intégration de la durée de séjour dans la planification des priorités  
Title: opératoires

**Auteur:** Adam Lebrigui  
Author:

**Date:** 2022

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Lebrigui, A. (2022). Intégration de la durée de séjour dans la planification des priorités opératoires [Master's thesis, Polytechnique Montréal]. PolyPublie.  
Citation: <https://publications.polymtl.ca/10454/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/10454/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de  
recherche:** Nadia Lahrichi  
Advisors:

**Programme:** Maîtrise recherche en mathématiques appliquées  
Program:

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**  
affiliée à l'Université de Montréal

**Intégration de la durée de séjour dans la planification des priorités opératoires**

**ADAM LEBRIGUI**  
Département de mathématiques et de génie industriel

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*  
Mathématiques appliquées

Juillet 2022

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

**Intégration de la durée de séjour dans la planification des priorités opératoires**

présenté par **Adam LEBRIGUI**

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

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

**Alain HERTZ**, président

**Nadia LAHRICHI**, membre et directrice de recherche

**Issmaïl EL HALLAOUI**, membre

## REMERCIEMENTS

Je souhaite remercier toutes les personnes qui m'auront aidé au travers de ma maîtrise jusqu'à l'aboutissement de ce mémoire.

Tout d'abord, je remercie Mme Lahrichi, ma directrice de recherche, qui m'aura offert l'opportunité de travailler sur ce projet et dont l'implication a été primordiale à l'accomplissement de cette recherche. Je remercie aussi Alberto Lacort Burgos, étudiant travaillant sur un projet connexe avec qui j'ai souvent eu l'occasion d'échanger et de réfléchir ensemble sur les données du CHUM.

Je souhaite également étendre mes remerciements à Dr Lepanto ainsi qu'à tous les experts du CHUM qui auront consacré de leur temps pour répondre à mes questions et m'aider à acquérir une meilleure compréhension du fonctionnement du centre hospitalier, y compris l'accès aux données nécessaires à l'achèvement du projet.

Enfin, je remercie ma mère et mon père pour leur constant soutien et encouragement du commencement jusqu'à la conclusion de ma maîtrise.

## RÉSUMÉ

Ce projet vise à offrir une approche de l'optimisation des priorités opératoires qui prenne en compte l'utilisation des lits, soit au niveau tactique de la programmation. Le modèle développé est destiné à aider l'administration du bloc opératoire du Centre hospitalier de l'Université de Montréal (CHUM) dans la prise de décisions quant à sa planification. Celle-ci a pour objectif de prioriser les patients selon leur temps d'attente, tout en assurant une utilisation optimale des salles et des lits. Dans le cadre du projet, les lits font référence non seulement aux lits de soins intensifs mais également aux lits aux unités chirurgicales de chaque service.

Ainsi, ce modèle d'optimisation propose d'utiliser l'information connue sur les patients électifs en attente de chirurgie pour planifier les priorités opératoires. Nous proposons une politique basée exclusivement sur le temps d'attente. De plus, une version du modèle permet également de se prémunir contre l'incertitude que présentent les patients urgents dans la planification, et ce, afin de limiter les annulations causées par les urgences. À cet effet, nous démontrerons l'efficacité de la réservation de salles et du raccourcissement de l'horizon de temps de 28 à 14 jours comme méthodes disponibles pour limiter l'impact respectif des urgences ainsi que des semi-urgences.

Notre méthode implique de la programmation linéaire avec un modèle déterministe et des variables entières indiquant le nombre de patients planifiés selon les différentes caractéristiques de patient, ainsi que le nombre de priorités opératoires accordées par service. L'objectif consiste en la maximisation de l'utilisation du bloc opératoire en priorisant les patients selon leur temps d'attente, ainsi que la maximisation de l'utilisation des lits de chirurgie et de soins intensifs. Nous considérons l'attribution d'un poids supplémentaire à certains services en fonction de leur priorité relative aux autres services. Au-delà du format traditionnel d'un modèle de planification des priorités opératoires, notre approche novatrice propose d'intégrer l'utilisation des lits en focalisant sur la durée de séjour en fonction de leur trajectoire de soin.

Après une analyse en profondeur du bloc opératoire et de ses patients au CHUM, nous proposons une classification des patients en fonction de leurs diagnostics, leurs besoins en lits, leurs durées de séjour et leurs durées de chirurgie. Nous utilisons pour cela des algorithmes de partitionnement d'ensembles.

Les résultats obtenus montrent que la prise en compte des durées de séjour permet d'éviter les déplacements et annulations causés par un manque de lits. Nous discutons aussi de l'emploi d'un horizon de temps plus court afin de mieux considérer la présence de patients semi-

urgents, et montrons par une simulation de Monte-Carlo que la réservation de salles pour les urgences diminue efficacement les annulations.

## ABSTRACT

The goal of this project is to consider patient length of stay at the tactical level of planning, within the Master Surgery Schedule (MSS). We develop an optimization tool to assist in the decisions taken by the administration of a university hospital. The model aims to prioritize patients according to their time spent on the wait list, while also ensuring an optimal use of the Operating Rooms (OR) and the beds. Within the scope of this project, the beds refer not only to those in the Intensive Care Unit (ICU), but also in the surgical wards for each specialty.

As such, our optimization model uses the known data about elective patients awaiting for their surgery in order to generate the MSS according to the fairest policy which involves giving more weight to patients who waited longer. We also suggest variations of the model to better face the uncertainty caused by emergencies. To this effect, we demonstrate the efficiency of slack reservation and shortening of the planning horizon from 4 weeks to 2 weeks as available methods to lessen the respective impact of urgent and semi-urgent patients.

Our approach involves linear programming with a deterministic model and integer variables indicating the number of patients planned according to the different patient profiles, as well as the number of daily rooms per specialty. The objective is to maximize both the use of the ORs while prioritizing older surgery requests, as well as the use of available beds at the ICU and the surgical wards. We give a weight to some specialties to account for their relative priority. Beyond the traditional format of an MSS optimization model, our novel approach offers to integrate the length of stay by keeping track of bed occupation by each individual patient, as well as their trajectory.

The tracking of patients following their surgeries is done at an increased level of detail through the splitting of each specialty in classes of similar diagnostics. To do so, we use a clustering algorithm in order to group diagnostics based on their length of stay and surgery duration. We distinguish between three types of patients on the wait list, by their need for a hospital stay following their surgery, since it is known to the surgeon. The profiling of patients is the result of an in-depth study of the ORs and the surgical patients at the university hospital, based upon an analysis of historical data. Following an in-depth study of the ORs and its patients at the hospital, we offer to classify patients by their diagnoses, their bed requirements, their length of stay and their surgery duration. To do so, we use a clustering algorithm.

The results show that integrating the length of stay allow for less transfers and cancellations caused by a lack of beds. We also discuss the shortening of the planning horizon so as to

better account for semi-urgent patients, and demonstrate through a Monte Carlo simulation the performance of room reservation in reducing cancellations.



## TABLE DES MATIÈRES

|   |      |
|---|------|
| REMERCIEMENTS . . . . .   | iii  |
| RÉSUMÉ . . . . .  | iv   |
| ABSTRACT . . . . .  | vi   |
| TABLE DES MATIÈRES . . . . .  | viii |
| LISTE DES TABLEAUX . . . . .  | x    |
| LISTE DES FIGURES . . . . .   | xi   |
| CHAPITRE 1 INTRODUCTION . . . . .   | 1    |
| CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE . . . . .   | 6    |
| 2.1 Les trois niveaux de planification . . . . .                                      | 6    |
| 2.2 Gestion des lits . . . . .  | 8    |
| 2.3 Traitement des urgences . . . . .   | 8    |
| 2.4 Récapitulatif . . . . .   | 9    |
| CHAPITRE 3 ÉTUDE DE CAS : CENTRE HOSPITALIER DE L'UNIVERSITÉ DE<br>MONTRÉAL . . . . . | 10   |
| 3.1 Planification du bloc opératoire . . . . .  | 10   |
| 3.2 Caractérisation du bloc opératoire . . . . .                                      | 12   |
| 3.3 Caractérisation des patients . . . . .  | 14   |
| 3.4 Caractérisation des unités . . . . .  | 24   |
| CHAPITRE 4 MODÉLISATION DES PRIORITÉS OPÉRATOIRES . . . . .                           | 28   |
| 4.1 Modèle de base . . . . .  | 28   |
| 4.2 Limitations additionnelles . . . . .  | 32   |
| 4.3 Modèle avec intégration de la durée de séjour . . . . .                           | 34   |
| 4.4 Réservation . . . . .   | 39   |
| 4.5 Diminuer l'horizon de temps . . . . .   | 40   |
| CHAPITRE 5 ANALYSE DES RÉSULTATS . . . . .  | 42   |
| 5.1 Paramètres . . . . .  | 42   |

|  |                                    |    |
|--|------------------------------------|----|
| 5.2  | Analyse de scénarios . . . . .     | 45 |
| 5.3  | Comparaison avec le CHUM . . . . . | 54 |
| CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS . . . . . |                                    | 58 |
| RÉFÉRENCES . . . . .                               |                                    | 59 |

**LISTE DES TABLEAUX**

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Tableau 3.1 | Nombre de priorités opératoires au 4e étage par semaine, par service, du 7 janvier au 1 février 2019 . . . . . | 11 |
| Tableau 3.2 | Répartition des services sur les deux étages du bloc opératoire . . . . .                                      | 12 |
| Tableau 3.3 | Maximum de salles concurrentes par service . . . . .   | 13 |
| Tableau 4.1 | Paramètres du modèle de base . . . . .   | 29 |
| Tableau 4.2 | Paramètres pour les limites additionnelles . . . . .   | 32 |
| Tableau 4.3 | Paramètres pour l'intégration de la durée de séjour . . . . .  | 35 |
| Tableau 4.4 | Paramètre pour l'intégration de la durée de séjour . . . . .   | 38 |
| Tableau 4.5 | Paramètre de la réservation . . . . .  | 40 |
| Tableau 5.1 | Comparaison d'indicateurs de performance entre 5 scénarios . . . . .   | 47 |
| Tableau 5.2 | Tableau comparatif des priorités opératoires par semaine entre 5 scénarios                                     | 50 |
| Tableau 5.3 | Tableau comparatif entre notre solution et la planification du CHUM  | 55 |

## LISTE DES FIGURES

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Figure 3.1  | Ouverture des salles sur une période de 28 jours . . . . .   | 13 |
| Figure 3.2  | Nombre de patients urgents par service, sur un an de données . . . . .   | 15 |
| Figure 3.3  | Répartition des chirurgies entre avril 2018 et mars 2019 selon le temps attendu . . . . .  | 16 |
| Figure 3.4  | Distribution logarithmique du temps d'attente des patients sur un an de données . . . . .  | 17 |
| Figure 3.5  | Distribution logarithmique de la durée de séjour sur un an de données  | 18 |
| Figure 3.6  | Une classe du service hépatobiliaire à exclure, sur des données filtrées avec un intervalle de confiance 5-95 . . . . .                | 19 |
| Figure 3.7  | Création de classes pour chaque service, par un algorithme de propagation d'affinités, chaque couleur représentant une classe. . . . . | 20 |
| Figure 3.8  | Durée médiane de séjour généralisée par service, par classe. . . . .   | 22 |
| Figure 3.9  | Durées médianes de chirurgie par service, par classe. . . . .  | 23 |
| Figure 3.10 | Lits disponibles pour chaque service à l'unité chirurgicale. . . . .   | 24 |
| Figure 3.11 | Occupation des soins intensifs postopératoires en nombre de patients, sans les vendredis et les fins de semaine. . . . .               | 26 |
| Figure 5.1  | Fluctuation de la demande de lits pour le scénario 4 - Réservation. . .  | 49 |
| Figure 5.2  | Histogrammes des priorités opératoires par semaine pour les 5 scénarios  | 51 |
| Figure 5.3  | Utilisation des lits de tous les services pour le troisième scénario : Intégration des lits. . . . .                                   | 53 |

## CHAPITRE 1 INTRODUCTION

La chirurgie est au cœur des activités de l'hôpital, prenant place dans le bloc opératoire. Il s'agit là d'une des structures les plus coûteuses de l'hôpital, puisque le bloc opératoire représente aisément le tiers du budget total à lui seul [1]. Toutefois, ces coûts sont bien justifiés puisque les chirurgies du bloc opératoire peuvent former plus de 40% du revenu de l'hôpital [2]. Non seulement est-il directement impliqué dans la qualité des soins d'une importante proportion des patients, mais sa performance et la bonne gestion de ses ressources peuvent aussi avoir des retombées sur l'ensemble de l'hôpital. D'ailleurs, la demande de soins grandissante et la population vieillissante complexifient l'enjeu qu'est la garantie de hauts standards de qualité de soins avec des ressources limitées. La diminution des coûts et l'amélioration de la qualité des soins convergent alors vers une nécessité d'utiliser plus efficacement les ressources existantes du bloc opératoire [3]. De petites améliorations dans son efficacité peuvent se traduire par d'importants gains dans la qualité des soins des patients ainsi que par une conséquente diminution des coûts.

Ainsi, la bonne gestion du bloc opératoire est cruciale au séjour des patients et au temps d'attente avant leur intervention chirurgicale. Par conséquent, de plus en plus d'hôpitaux font appel aux méthodes de recherche opérationnelle pour aider à la planification du bloc opératoire afin de faciliter l'atteinte d'objectifs, parfois contradictoires, qui seraient autrement hors de portée d'une planification manuelle seulement basée sur l'expérience. En effet, plusieurs ressources et limitations s'entrecroisent, d'autant plus que le bloc opératoire ne peut exister en isolement, mais est étroitement lié avec d'autres départements de l'hôpital, tels que les unités et les urgences. Il en ressort que prendre en compte les ressources en amont et en aval des interventions chirurgicales permettrait une planification plus efficace, car plus exhaustive dans son approche. Ainsi, nous nous intéressons également aux lits qu'occuperont les patients suite à leur intervention chirurgicale dans le cadre de ce projet, et à leur intégration dans la programmation du bloc opératoire. Parallèlement, une attention sera également accordée à l'aléa que présentent les urgences dans la planification, ainsi qu'à une méthode pour en diminuer l'impact.

L'optimisation des priorités opératoires est particulièrement intéressante puisque c'est à ce niveau que des changements majeurs peuvent être apportés aux blocs opératoires ainsi qu'à la gestion à moyen long terme des lits. Ce projet est réalisé en collaboration avec le Centre hospitalier de l'Université de Montréal (CHUM), dont nous étudierons le bloc opératoire et les unités afin d'intégrer les lits à la planification des priorités opératoires. Nous chercherons

non seulement à utiliser efficacement les salles et les lits, mais également à assurer un temps d'attente équitable pour les patients, en priorisant ceux qui auront attendu le plus longtemps.

Afin d'apporter une meilleure compréhension du cadre de notre travail, nous introduirons plusieurs concepts clefs sous forme de définitions. Celles-ci permettront une meilleure compréhension du contexte de notre recherche.

Tout d'abord, nous tâcherons ici de définir les termes relatifs au bloc opératoire.

**Service** : Dénominateur commun sous lequel se trouvent tous les chirurgiens partageant une même spécialité.

**Priorité opératoire** : Créneau pour lequel un service de chirurgie est assigné à une salle du bloc opératoire, afin que des interventions chirurgicales y soient effectuées. Il revient au département du service concerné de répartir ses chirurgiens entre ses différentes priorités opératoires. Celles-ci prennent souvent la forme d'une journée ou d'une demi-journée.

**Grille opératoire** : Ou *Master Surgery Schedule (MSS)* en anglais, il s'agit du tableau renseignant l'ensemble des priorités opératoires planifiées sous un format de jours et de nombre de salles, sur un horizon de temps d'un mois.

**Bloc opératoire** : Lieu physique où ont lieu les interventions chirurgicales, à la fois électives et urgentes. Il comporte un ensemble de salles d'opération, équipées pour un ou plusieurs services de chirurgies, bénéficiant de la présence d'équipes chirurgicales, d'anesthésie et de nettoyage. On y trouve également une salle de réveil, avec son équipe, pour y recevoir les patients à la suite de leur chirurgie, le temps que s'estompe l'anesthésie.

**Durée de séjour** : Temps s'écoulant entre le début d'une chirurgie et le congé du patient opéré. Le séjour du patient s'effectue généralement en unité chirurgicale, mais peut inclure un passage par les soins intensifs ou se terminer par un transfert vers une unité médicale. Elle comprend toujours l'occupation d'un lit.

**Temps d'attente** : Temps s'écoulant entre la demande initiale du patient pour une chirurgie et son exécution. Ce temps d'attente peut être partagé en deux parties, soit l'attente entre la référence par un médecin généraliste et la consultation avec un spécialiste, puis l'attente de ce point jusqu'au moment de la chirurgie. Toutefois, lorsque rien n'est mentionné, dans le contexte du bloc opératoire, il est généralement supposé que l'on parle du deuxième segment, soit de la consultation avec un spécialiste jusqu'au jour de la chirurgie.

**Liste d'attente** : Tableau renseignant sur le nombre de patients par temps d'attente, pour chaque service de chirurgie. Les temps d'attentes y sont regroupés en catégories d'attente (par trimestre d'attente par exemple), qui peuvent être l'objet de différentes cibles par la suite. Pour la planification du bloc opératoire, ce sont des captures de ces listes d'attente à

un moment  $t$  qui sont utilisées. Elles indiquent le nombre de patients en attente par service, par catégorie d'attente.

Au-delà du bloc opératoire et de ses spécificités, ce projet nécessite également l'étude des patients et de leurs trajectoires. Ainsi, nous proposons également la définition de deux termes relatifs aux patients.

**Patients électifs** : Patients en attente de chirurgie, inscrits sur la liste d'attente. Ils sont attribués à des chirurgiens (selon le service) et reçoivent un diagnostic préopératoire, ce qui permet de déterminer en amont la durée de la chirurgie et du séjour de chaque patient. Le besoin d'un lit à l'unité chirurgicale ou à l'unité de soins intensifs est connu en avance. Les patients électifs peuvent être admis peu de temps avant leur chirurgie (la veille ou le matin même) ou longtemps avant dans le cas de longues hospitalisations impliquant une chirurgie élective (qui aurait pu être prévue ou non au début de l'hospitalisation, mais qui est connue suffisamment à l'avance pour être programmable).

**Patients urgents** : Patients qui ne sont pas inscrits sur la liste d'attente, mais qui nécessitent une chirurgie immédiate (généralement moins de 24 heures après leur arrivée). Il existe aussi des patients dits semi-urgents, qui ont besoin d'une chirurgie rapidement, mais peuvent attendre quelques jours jusqu'à un mois, selon le diagnostic. Ces patients ne sont pas programmables, ils représentent un aléa face auquel les hôpitaux doivent se prémunir pour éviter les annulations. En effet, en l'absence de disponibilités au bloc opératoire, ce sont des chirurgies électives moins urgentes qui seront annulées en faveur des chirurgies plus urgentes. Suite à leur chirurgie au bloc opératoire, une partie des patients obtient directement son congé de l'hôpital. D'autres se voient redirigés vers les unités. Il existe trois types d'unités qui nous intéressent dans le cadre de ce projet, que nous tâcherons d'introduire ici.

Les unités sont des regroupements d'activités de soins de santé qui partagent un même espace physique dans l'hôpital. Il existe plusieurs unités, chacune prenant en charge les patients ayant une même thématique en commun. Celles-ci se présentent comme des ensembles de salles et leur personnel infirmier. Les lits, équipés à recevoir les patients tout au long de leur séjour, sont la principale ressource que l'on trouve aux unités. Les trois unités auxquelles nous nous intéresserons sont les suivantes :

**Unité chirurgicale** : Elle prend en charge les patients recevant des soins à la suite de procédures chirurgicales. Elle dispose de plusieurs lits qui sont généralement regroupés par service, mais parfois partagés entre plusieurs services. Si certains patients n'ont besoin de lit qu'après leur chirurgie, d'autres peuvent être admis la veille ou bien avant. Le trajet habituel d'un patient chirurgical implique un passage par la salle de réveil avant d'être mené à l'unité

chirurgicale pour le reste de son séjour, jusqu'à son congé.

**Unité médicale** : Elle assure des soins de médecine à des malades hospitalisés. Elle interagit généralement avec l'unité chirurgicale de deux principales façons :

- **Débordement** : Un manque de place dans l'une ou l'autre des deux unités mène à « l'emprunt » de lits. Ainsi, un patient noté « médical » administrativement pourrait se trouver physiquement à l'unité chirurgicale.
- **Transfert** : Un patient chirurgical ayant besoin d'un traitement médical de longue durée après sa chirurgie pourrait nécessiter un transfert à l'unité médicale afin d'y recevoir les soins appropriés, ce qui est par exemple le cas pour les patients de greffes.

**Unité de soins intensifs** : L'unité de soins intensifs permet la prise en charge de patients en état critique nécessitant une surveillance continue. Elle reçoit à la fois des patients de chirurgie et des patients médicaux ou en provenance des urgences. Une partie de sa capacité d'accueil est consacrée aux Soins Intensifs Postopératoires (SIP), pour recevoir les patients nécessitant une hospitalisation aux soins intensifs immédiatement après leur chirurgie. C'est cette partie des soins intensifs qui nous intéresse dans la planification des priorités opératoires. Dans le cas des patients électifs, on sait d'avance si le patient aura besoin d'un lit en SIP. Par la suite, ces patients vont à l'unité chirurgicale pour terminer leur séjour postopératoire. En cas d'un manque de lits aux soins intensifs, des chirurgies électives seront annulées.



L'objectif de ce projet est de développer un outil mathématique pour optimiser la planification des priorités opératoires. Cette idée peut être divisée en sous-objectifs, soit d'une part offrir un traitement juste des patients selon leur temps d'attente, d'autre part limiter les déplacements ainsi que les annulations des patients qui auraient pu être évités par une meilleure gestion des ressources.

Pour y parvenir, nous offrons une approche novatrice de la planification des priorités opératoires en utilisant la liste d'attente et les diagnostics des patients afin d'intégrer leur utilisation des lits au modèle. Nous considérons non seulement les lits aux soins intensifs, mais également les lits à l'unité chirurgicale pour chaque service.

Nous offrirons d'abord dans le chapitre 2 une revue de la littérature qui couvrira différents sujets abordés dans notre projet. Par la suite, nous étudierons au travers du chapitre 3 le cas du Centre hospitalier de l'Université de Montréal pour en caractériser le bloc opératoire, ses processus ainsi que son environnement. Le chapitre 4 procédera à la modélisation de la planification des priorités opératoires, en partant d'un modèle de base pour y ajouter graduellement plusieurs dimensions, dont l'intégration des lits et la gestion des urgences. Subséquemment, le chapitre 5 présentera les résultats obtenus avec notre modèle, pour finalement conclure le projet au chapitre 6.

## CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE

De plus en plus d'hôpitaux font appel aux méthodes de recherche opérationnelle afin d'aider leurs prises de décisions à plusieurs échelles de la gestion. Parmi elles, la programmation mathématique permet d'aider la planification du bloc opératoire afin de considérer bien plus d'éléments qu'il n'est possible de prendre en compte lors de la planification manuelle. Si cette planification par optimisation mathématique ne concernait traditionnellement que le bloc opératoire, de plus en plus d'auteurs s'intéressent à des paramètres externes au bloc qui en influencent toutefois le fonctionnement, tels que les lits ou les urgences. Il s'agit là de sujets que nous tâcherons de brièvement couvrir au travers de cette revue de littérature.

L'utilisation de méthodes de recherche opérationnelle pour optimiser la programmation du bloc opératoire peut être effectuée à plusieurs échelles. La littérature réfère à ceux-ci comme étant les trois niveaux de planification du bloc opératoire. Nous allons en discuter plus bas et expliciter les raisons de ce partitionnement.

### 2.1 Les trois niveaux de planification

Pour la grande majorité des institutions, les processus qui définissent la distribution des ressources telles que les salles, les emplois du temps ou le personnel prennent place à trois étapes décisionnelles, soit le niveau stratégique, tactique et opérationnel. Celles-ci correspondent respectivement à la planification à long terme, à moyen terme et à court terme du bloc opératoire [4].

Au niveau stratégique sont prises les décisions qui détermineront le reste de la planification du bloc opératoire sur un horizon généralement évalué sur l'année. La disponibilité des ressources y est établie, ainsi que les quotas pour chaque service. C'est par exemple à ce niveau que le temps qui sera accordé à chaque service au bloc opératoire sera décidé [5]. On y retrouve également la politique d'ouverture des salles, la proportion des lits des soins intensifs dédiés aux patients du bloc opératoire, ainsi que généralement les ressources requises pour répondre efficacement à la demande [6].

La planification au niveau tactique quant à elle concerne l'attribution précise des ressources au bloc opératoire. Elle est généralement effectuée sur un horizon d'un mois. La planification des priorités opératoires, et par conséquent notre projet, s'inscrit à cette échelle. L'adoption d'une grille des priorités opératoires est le résultat de discussion entre plusieurs acteurs du bloc opératoire, dont les chirurgiens, les chefs de service et les gestionnaires [7]. Si la

disponibilité des ressources est décidée au niveau stratégique, la répartition et l'utilisation de celles-ci sont confirmées au niveau tactique.

Enfin, au niveau opérationnel, on retrouve la planification détaillée à l'échelle des interventions chirurgicales individuelles. L'affectation des chirurgiens à des créneaux est généralement réalisée par les départements de chaque service, disposant au préalable de la grille opératoire qui indique la combinaison de salles et de jours à leur disposition. Les patients en attente sont eux souvent sur la liste de chirurgiens qui décident ensuite du jour d'intervention. Au-delà de l'allocation des individus, on retrouve aussi l'ordre de passage ainsi que la réservation d'équipement spécialisé [8].

Notre projet quant à lui s'inscrit particulièrement au niveau tactique puisqu'il s'agit de la planification de priorités opératoires. Toutefois, les méthodes d'optimisation employées entrent également dans le niveau opérationnel, puisqu'une affectation des patients est réalisée afin de déterminer le niveau d'occupation des lits.

Si l'on s'intéresse plus particulièrement aux modèles d'optimisation des priorités opératoires, ceux-ci voient différentes variations dans la littérature selon les objectifs des auteurs. Traditionnellement, les deux objectifs les plus populaires dans la planification du bloc opératoire couvrent le temps d'attente des patients ainsi que l'utilisation des salles [9].

Ainsi avons-nous par exemple Blake et Donald qui publient en 2002 un modèle de programmation en nombres entiers pour générer et améliorer par heuristique des priorités opératoires cycliques visant à mieux utiliser les salles du bloc opératoire [10]. Leur modèle renvoie le type et le nombre de salles assignées à chaque service selon le jour de la semaine. Il n'est toutefois pas rare que des auteurs cherchent à obtenir des solutions offrant un compromis entre deux ou plusieurs objectifs, et attribuent alors des poids à chacun [4]. Testi et Tànfani offrent une approche multiobjectif en créant des coefficients afin de prioriser certains patients selon le niveau d'urgence des patients, tout en priorisant ceux-ci selon le temps d'attente, afin d'effectuer l'attribution des priorités opératoires [11].

Au-delà des objectifs de la planification, les modèles doivent tous obéir à un nombre de règles de base du bloc opératoire. Celles-ci sont généralement communes à la plupart des modèles d'optimisation du bloc opératoire, et peuvent couvrir soit la disponibilité des salles, de l'équipement ou encore les contraintes liées aux ressources en aval du bloc. Il est de plus possible que des salles soient restreintes à certains services [12].

## 2.2 Gestion des lits

Toutefois, si l'utilisation des salles est presque omniprésente dans la planification du bloc opératoire, l'utilisation des lits ne l'est pas. En effet, très peu d'auteurs s'y intéressaient avant 2010, les lits n'étant alors considérés qu'afin de niveler leur utilisation et éviter le dépassement de leur capacité [9]. Des auteurs tels que Van Oostrum s'intéressent justement à la planification de priorités opératoires cycliques qui maximise l'utilisation du bloc opératoire tout en nivelant l'utilisation des lits [13]. Les lits y sont considérés afin d'avoir des priorités opératoires qui puissent être répétées sans changements plusieurs fois dans l'année, sans être négativement affectées par les variations de la demande aux unités, soit les pics de cette demande. D'autres objectifs sont également considérés dans la littérature, soit la maximisation des revenus avec une approche stochastique du flot de patients, la disponibilité des ressources aux unités et aux soins intensifs étant aussi prises en compte avec la probabilité pour chaque cheminement de patient dans les travaux de Fügner en 2015 [14].

Dans la littérature plus récente, M'Hallah et Visintin s'intéressent à maximiser l'utilisation du bloc opératoire et considèrent la disponibilité des lits ainsi que la durée de séjour afin d'intégrer les lits dans la planification des priorités opératoires sur un horizon de deux semaines [15]. On y retrouve un suivi détaillé de la durée de séjour des patients et des transferts. L'utilisation des lits ne fait pas partie de la fonction objectif, il s'agit plutôt de contraintes de capacité des lits aux unités et aux soins intensifs. Parallèlement, Augustin présente dans son mémoire une approche inspirée du processus de Markov pour quantifier le risque d'annulations causées par un manque de lits en soins intensifs, la modélisation se basant sur une estimation de 2 admissions par jour [16].

## 2.3 Traitement des urgences

Enfin, la problématique des urgences dans la planification de priorités opératoires se voit quant à elle traitée de deux différentes façons dans la littérature : la première est la politique dédiée qui consiste à réserver des salles pour les patients non électifs. La seconde est la politique flexible qui consiste à réserver une partie de la durée d'ouverture de chaque salle pour les patients non électifs. Une troisième politique est possible, soit un hybride qui implique un mélange des deux précédentes politiques [17] [18].

Une version améliorée de la politique de réservation est suggérée par Kamrana et al. qui réservent une partie de la capacité, mais procèdent également à la création de patients fictifs basés sur des prévisions des urgences, pour les ajouter à la liste d'attente dans l'allocation des patients [3]. Une approche de l'allocation des patients qui incorpore plusieurs niveaux

d'incertitude est tout à fait possible, comme le démontrent Jebali et Diabat en 2017, en intégrant l'aléa des urgences, la variabilité des durées de chirurgies et des durées de séjour aux soins intensifs. Leur objectif est alors de minimiser les coûts engendrés par le dépassement de la capacité des salles au bloc opératoire et des lits aux soins intensifs [19].

Plus l'horizon de temps est court, plus il est possible d'aller chercher de la granularité dans l'intégration d'incertitudes. C'est particulièrement le cas avec le modèle suggéré par Makboul et al. qui procèdent à la planification des priorités opératoires en prenant en compte les disponibilités des lits ainsi que le niveau de priorité des patients, avec un intérêt particulier pour les chirurgies ambulatoires, soit les patients qui pourront quitter l'hôpital le jour même de leur chirurgie [6].

## 2.4 Récapitulatif

Suite à cette revue de littérature, nous avons pu nous positionner au niveau tactique de l'ordonnancement du bloc opératoire. Nous constatons également que si plusieurs auteurs se sont également intéressés aux problèmes de planification des priorités opératoires, la durée de séjour était considérée pour respecter les contraintes de capacité à l'unité chirurgicale et aux soins intensifs. Les auteurs s'intéressent plus à l'utilisation nivelée des lits afin d'éviter les coûts qu'engendrerait son utilisation excédentaire, mais peu à son utilisation efficace. Quant aux durées de séjour, celles-ci sont généralement évaluées selon les services. La variation des durées de séjour est quant à elle généralement la cible de méthodes stochastiques.

Ainsi, si nous nous intéressons aux durées de séjour dans notre programmation tactique du bloc opératoire, nous offrirons une approche déterministe qui intégrera la variation de ces durées par la planification à une échelle plus granulaire des diagnostics des patients. Tout comme le suggère la littérature, nous prendrons en compte l'aléa que présentent les urgences par la réservation de salles, mais nous intéressons également aux différences dans la planification des priorités opératoires selon la longueur de l'horizon de temps.

## CHAPITRE 3 ÉTUDE DE CAS : CENTRE HOSPITALIER DE L'UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

Ce chapitre présente l'environnement dans lequel s'ancre notre recherche, soit le bloc opératoire et les lits au Centre hospitalier de l'Université de Montréal (CHUM). Il vise à offrir une meilleure compréhension des ressources disponibles et des processus mis en place. L'information qui suit provient de deux sources, soit les données historiques du CHUM pour un an, allant du début d'avril 2018 à la fin de mars 2019, ainsi que l'expertise des responsables avec qui nous avons échangé. Certaines données ne sont pas disponibles et ont été estimées suite à des discussions, soit la planification des horaires des salles et les patients de greffes.

Le CHUM est le plus grand centre hospitalier universitaire du Québec, situé dans la ville de Montréal, inauguré en 2017 suite à la fusion de l'Hôtel-Dieu, de l'Hôpital Notre-Dame et de l'Hôpital Saint-Luc. Son bloc opératoire s'étend sur deux étages et réalise chaque année plus de 15 000 chirurgies. Nous en avons étudié la planification du bloc opératoire au niveau opérationnel ainsi qu'au niveau tactique.

### 3.1 Planification du bloc opératoire

Au niveau opérationnel, la planification quotidienne du bloc opératoire traite l'allocation des patients à des salles ainsi que l'ordre de passage. Elle est effectuée par les chirurgiens pour leurs patients. La règle de planification quant au besoin de lits est de planifier la moitié des patients étant de type chirurgie même jour, qui auront leurs lits réservés la veille au soir. L'autre moitié des patients sont des chirurgies d'un jour qui auront leur congé le jour même de la chirurgie.

D'après les gestionnaires, 30% des départs ont lieu avant 11 heures le matin, tandis que le besoin de lits se fait quant à lui en fin de journée vers 15 heures. Parallèlement, il arrive que l'urgence déborde et occupe jusqu'à 40 lits de chirurgie. Cela mène alors à placer seulement 20 à 30% de patients ayant besoin de lits la veille, et entraîne une importante attente à la salle de réveil pour transférer le patient à l'étage.

Plutôt qu'annuler des patients lorsqu'il y a un manque de lits, la gestion déplace les patients entre les unités pour s'assurer de l'accessibilité. Toutefois, ce manque de lits ne peut être toujours réglé par des déplacements puisqu'il est responsable de près de 20% des annulations et retards au bloc opératoire. Les annulations des chirurgies sont l'un des enjeux du bloc opératoire, puisque ce sont 10% des cas planifiés qui se voient annulés. Si l'on inclut également

les retards de chirurgies, ce pourcentage monte à près de 17% des cas. La gestion des lits n'est cependant pas la seule à blâmer, en effet, les annulations mentionnant spécifiquement l'urgence comme raison représentent près de 24% des annulations. Il s'agit là d'une sous-estimation de l'impact du manque de lits et des urgences qui, au-delà des annulations, causent aussi de nombreux délais supplémentaires qu'il est difficile de quantifier précisément.

Au niveau tactique, nous retrouvons la planification des priorités opératoires. Celle-ci suit présentement un modèle historique construit manuellement, qui ne change que très peu au cours de l'année. La planification est cyclique, se répétant aux 2 semaines, et ne présente jamais de changements drastiques d'une semaine à une autre. Certains services disposent d'une priorité opératoire aux deux semaines, tels que les chirurgies buccales et maxillofaciales.

La grille des priorités opératoires se présente sous la forme d'un tableau indiquant pour chaque étage le nombre de priorités par service, par jour. Il n'y a pas de chirurgie électorale pendant les fins de semaine. La grille communique les priorités pour les services hors bloc tels que les grands brûlés ou disposant de leur propre zone comme la radio-oncologie. Elle documente également quel service disposera d'une assistance robot ou non, une seule priorité pouvant en disposer à la fois, tous étages confondus.

Il est également à noter que d'une semaine à une autre, il n'y a jamais d'écarts de plus d'une priorité opératoire pour un même service (à l'exception des semaines avec des jours fériés ou des coupures). Ceci peut être observé avec la dernière ligne du tableau 3.1 récapitulant les priorités opératoires du 4e étage, qui indique l'écart maximal observé entre le nombre de priorités opératoires planifiées sur un mois.

TABLEAU 3.1 Nombre de priorités opératoires au 4e étage par semaine, par service, du 7 janvier au 1 février 2019

|           | CCARD | CDIGE | CHEPA | CONCO | CTHOR | CVASC | GRP |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
| Semaine 1 | 14    | 10    | 9     | 7     | 9     | 4     | 1   |
| Semaine 2 | 14    | 10    | 8     | 8     | 9     | 4     | 2   |
| Semaine 3 | 14    | 9     | 9     | 8     | 8     | 4     | 1   |
| Semaine 4 | 14    | 10    | 8     | 8     | 9     | 3     | 1   |
| Écart     | 0     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1   |

Ainsi, la planification des priorités opératoires est historique. Si elles n'accordent pas de considération pour les besoins en lits des patients, les gestionnaires visent toutefois un équilibre dans l'allocation des patients afin de limiter les annulations dues à des manques de lits. On observe toutefois un nombre important d'annulations de cas planifiés causés non seulement par le manque de lits, mais aussi par les urgences. Après une première approche par la planification du cas que présente ce centre hospitalier, nous proposons d'étudier plus en détail

le fonctionnement de son bloc opératoire.

### 3.2 Caractérisation du bloc opératoire

Sur les deux étages du bloc sont distinctement répartis 16 services de chirurgie, soit sept services au 4e étage et 9 services pour le 5e étage, tels que présentés dans le tableau 3.2.

TABLEAU 3.2 Répartition des services sur les deux étages du bloc opératoire

| 4e étage                            | 5e étage                                   |
|-------------------------------------|--|
| CCARD : Chirurgie cardiaque         | CMBF : Chirurgie buccale et maxillofaciale |
| CDIGE : Chirurgie digestive         | CPLAS : Chirurgie plastique                |
| CHEPA : Chirurgie hépatobiliaire    | GYNE : Gynécologie générale                |
| CONCO : Chirurgie oncologique       | GYON : Gynéco-oncologie                    |
| CTHOR : Chirurgie thoracique        | NEURC : Neurochirurgie                     |
| CVASC : Chirurgie vasculaire        | OPHT : Ophtalmologie                       |
| GRP : Greffe de rein ou de pancréas | ORL : Oto-rhino-laryngologie               |
|                                     | ORTH : Orthopédie                          |
|                                     | UROL : Urologie                            |

L'ouverture des salles est décidée à l'avance, elle est fournie avec la grille opératoire historique. Elle peut varier d'une semaine à une autre et n'est pas cyclique. Celle-ci est illustrée par un exemple avec la figure 3.1 qui présente, sur un horizon de 28 jours le nombre de salles ouvertes par jour.

Il existe trois types de longueurs de salles possibles. L'information concernant la répartition de ces salles entre les priorités opératoires n'est toutefois pas disponible.

- Salles courtes, ouvrent de 7h30 à 15h45, soit 495 minutes.
- Salles moyennes, ouvrent de 7h30 à 17h, soit 570 minutes, pour un maximum de 5 salles.
- Salles longues, ouvrent de 7h30 à 18h, soit pour 630 minutes, pour un maximum de 14 salles.

Il est également considéré que toutes les salles sont polyvalentes. L'équipement disponible, s'il peut être déplacé, est toutefois limité en nombre. Le tableau 3.3 illustre pour chaque service le maximum de salles ayant historiquement opéré sur une même journée, indiquant par là même la limite d'équipement disponible. Lorsqu'une salle dessert plus d'un service sur une même journée, alors elle est considérée avoir eu l'équipement nécessaire à tous les services qu'elle a accueilli (et compte ainsi plusieurs fois).

Quant à l'intercas, ou le temps qui sépare la fin d'une intervention chirurgicale du début de la prochaine, celui-ci est estimé entre 20 et 30 minutes. Cet intervalle de temps est généralement



nécessaire au nettoyage de la salle, mais inclut aussi les potentiels retards d'arrivée des différents acteurs requis pour l'intervention.

Enfin, les différentes équipes impliquées au bloc opératoire sont considérées être toujours disponibles en nombre suffisant. Dans le cas particulier des chirurgiens, leurs disponibilités s'alignent avec les priorités opératoires historiques. Toute modification aux priorités opératoires impliquera alors une réorganisation drastique de l'horaire des chirurgiens.

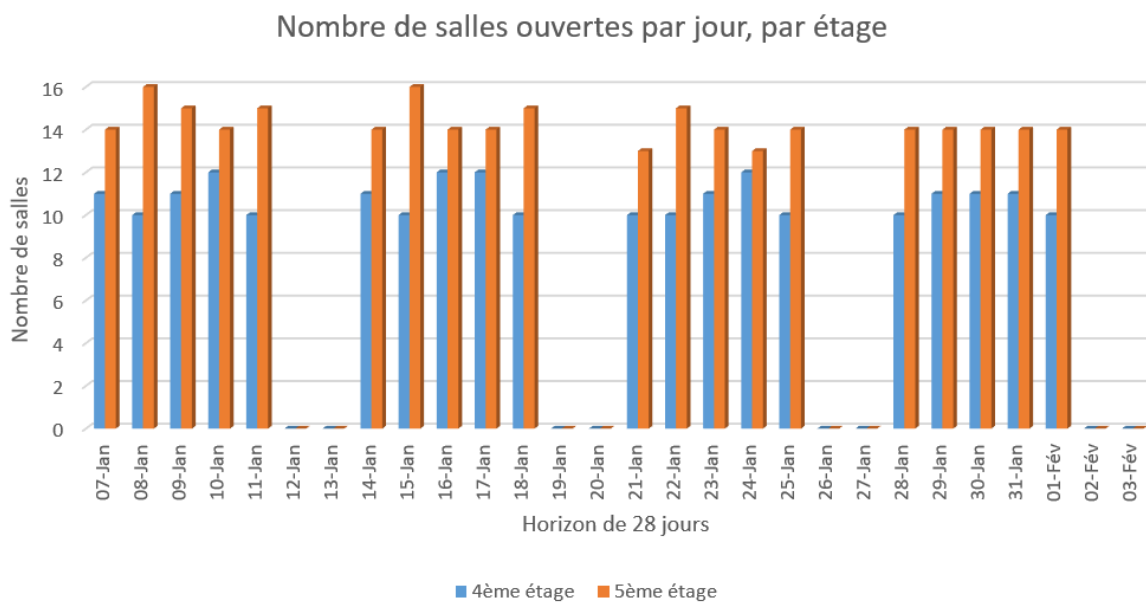


FIGURE 3.1 Ouverture des salles sur une période de 28 jours

TABLEAU 3.3 Maximum de salles concurrentes par service

| 1 salle | 2 salles | 3 salles | 4 salles | 5 salles |
|---------|----------|----------|----------|----------|
| GRP     | CMBF     | CTHOR    | CVASC    | CDIGE    |
|         | OPHT     | CHEPA    | CCARD    | CONCO    |
|         |          | GYON     | NEURC    | UROL     |
|         |          | GYNE     | ORL      |          |
|         |          |          | CPLAS    |          |
|         |          |          | ORTH     |          |

### 3.3 Caractérisation des patients

Les patients sont caractérisés par leur niveau de priorité, leur temps d'attente, la nature de leur arrivée ainsi que le temps passé au bloc opératoire et aux unités.

Au niveau des priorités, il existe deux types d'interventions, soit les chirurgies électives et les chirurgies urgentes. Si les patients électifs sont programmables, car connus à l'avance à l'aide des listes d'attente, ce n'est pas le cas des patients urgents, qui représentent un aléa face auquel il faut se préparer.

Un patient « urgent » est un patient nécessitant une attention immédiate, pouvant induire des annulations de chirurgies électives afin de libérer les ressources nécessaires pour le traiter. Il peut s'agir d'un patient en provenance du département des urgences, ou d'un patient électif dont la situation s'est soudainement aggravée (par exemple, un patient électif ayant besoin d'une seconde chirurgie non prévue au cours de son séjour postopératoire dans l'unité).

Ainsi, nous définissons un patient urgent comme étant un patient dont le temps d'attente entre le dépôt de la requête et le début de la chirurgie ne dépasse pas 24 heures. La figure 3.2 présente le nombre de patients correspondant à ce critère ayant subi une chirurgie au cours de l'année de données étudiées, pour chaque service. Nous observons que la majorité des urgences provient des services d'Orthopédie et d'Urologie, qui à eux deux représentent le quart du volume des arrivées urgentes.

Il existe également des patients semi-urgents, nécessitant une chirurgie dans la semaine suivant leur inscription. Une grande partie de ces patients échappent alors aux captures de la liste d'attente, puisqu'ils apparaissent après la capture de la liste d'attente utilisée pour planifier le mois à venir. On observe que c'est particulièrement le cas pour les services prioritaires tels que celui des chirurgies cardiaques, ayant pour caractéristiques peu de patients sur ses listes d'attente, mais une forte proportion de patients hors liste d'attente.

Dans le cas d'un tel service, l'horaire des chirurgiens peut alors être composé à près de 75% de patients qui ne sont pas capturés par l'affichage de la liste d'attente au jour  $j$ . Il est difficile de déterminer si de tels patients sont programmés aussi rapidement parce que leur situation le demande réellement, ou alors parce que le service dispose de beaucoup de priorités opératoires et fonctionne à flux tendu.

Les patients électifs proviennent quant à eux de la liste d'attente. Ils sont rattachés à un chirurgien plutôt qu'au service, puisque chaque chirurgien a ses propres patients. À chacun de ces patients est associée une métrique de temps d'attente, qui est utilisée pour placer le patient dans une des dix catégories d'attente. Celles-ci sont toutes par intervalles de 6 mois, à l'exception des deux premières catégories qui consistent en des intervalles de 3 mois.

Distribution des chirurgies urgentes par service en nombre de cas opérés

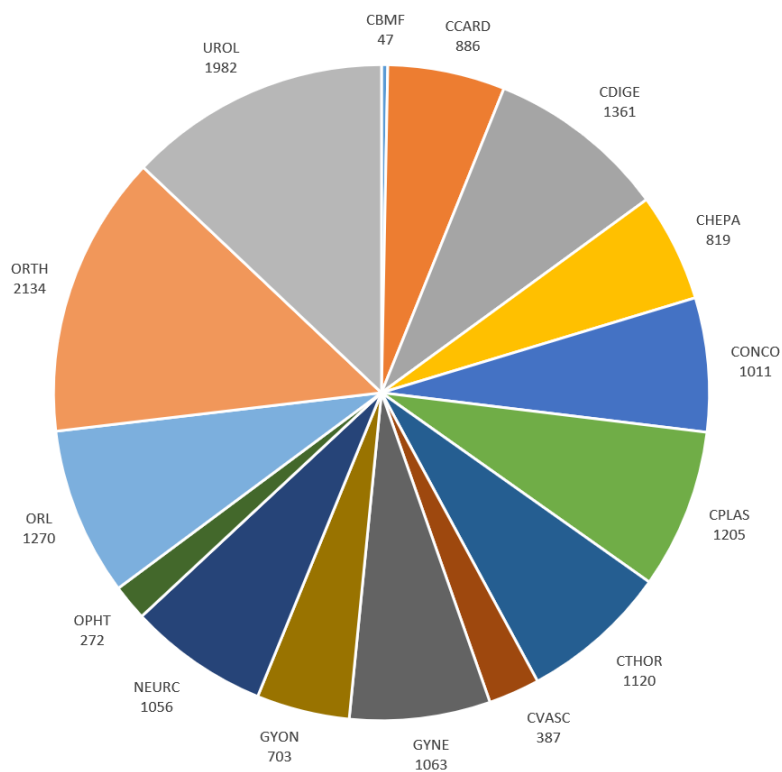


FIGURE 3.2 Nombre de patients urgents par service, sur un an de données

La grande majorité des patients opérés passent moins de 3 mois sur la liste d'attente, avec une moyenne de 110 jours attendus tous services confondus. Cette répartition des patients par catégorie d'attente est illustrée par la figure 3.4.

Ce temps d'attente, en jours, suit une distribution logarithmique d'après la figure. On constate qu'une grande majorité des patients reçoit des soins rapidement après leur requête de chirurgie auprès d'un spécialiste, avec un peu plus de la première moitié des patients attendant moins de deux mois avant le début de leur chirurgie (la médiane se situe à 51 jours d'attente). Cette proportion inclut à la fois les patients électifs réguliers, les semi-urgents, mais pas les vraies urgences (qui eux n'attendent pas plus d'une journée).

L'attente n'est toutefois pas égale pour tous les services. La figure 3.3 montre cette répartition des temps d'attente selon le service. En l'occurrence, certains services observent la quasi-totalité de leurs patients opérés au cours des trois premiers mois, comme c'est le cas pour 97% des chirurgies buccales et maxillo-faciales. Il est difficile d'affirmer si ce temps d'attente faible est dû à la nature urgente des chirurgies, ou parce que l'offre en priorités opératoires est généralement supérieure à la demande de chirurgies.

## RÉPARTITION DES CHIRURGIES PAR CATÉGORIE D'ATTENTE

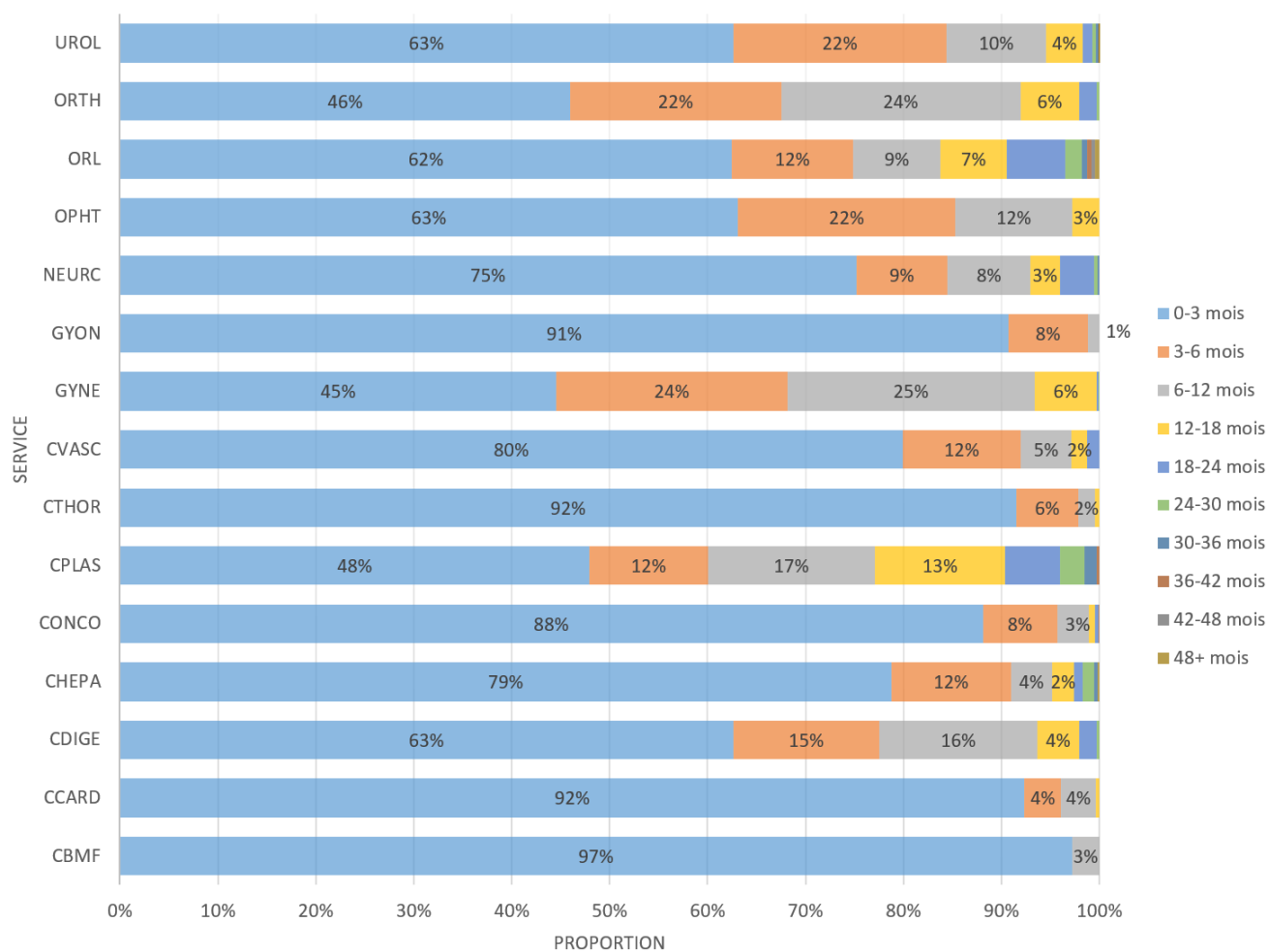


FIGURE 3.3 Répartition des chirurgies entre avril 2018 et mars 2019 selon le temps attendu

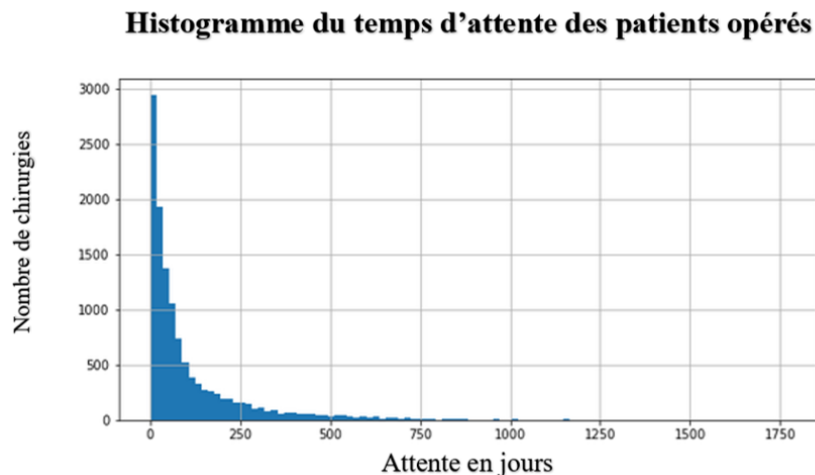


FIGURE 3.4 Distribution logarithmique du temps d'attente des patients sur un an de données

Enfin, les patients du bloc opératoire sont également caractérisés par le type de leur séjour hospitalier. Celle-ci est connue d'avance pour les patients électifs, et définit leur besoin en lit. Il existe trois types de séjours :

- **Hospitalisation (H)** : Ces patients sont admis avant leur chirurgie, occupant un lit avant et après leur chirurgie.
- **Chirurgie même jour (CMJ)** : Ces patients arrivent le jour de leur chirurgie ou la veille au soir et auront besoin d'un lit.
- **Chirurgie d'un jour (CDJ)** : Ces patients arrivent le jour de leur chirurgie et peuvent quitter l'hôpital sans séjour hospitalier.

Une simplification de ces trois catégories nous mène ainsi à considérer les patients ayant besoin de lits et les patients n'ayant pas besoin de lits. Cette information est connue du chirurgien avant l'intervention. Dans la planification du CHUM, les gestionnaires visent un équilibre de 50% de patients nécessitant un séjour hospitalier et de 50% pouvant obtenir leur congé le jour de l'intervention.

La durée de séjour des patients suit une tendance logarithmique, avec une forte densité de durées de séjour faibles, tandis que la « queue » de la courbe s'étend vers 0 pour inclure les durées de séjour plus longues, tel qu'il est illustré par la figure 3.5. Afin d'éliminer les valeurs aberrantes, soit les durées de séjour excessivement très longues de cas particuliers, nous n'avons considéré que les patients dont la durée de séjour respectait un intervalle de confiance de 0-95, ce qui correspond à 89,26% des patients de notre échantillon. La nature logarithmique de la distribution des durées de séjour implique que la moyenne soit tirée vers

le haut par les valeurs extrêmes. Ainsi, employer la médiane permet d'avoir des durées plus représentatives de la réalité, celle-ci étant moins affectée par les valeurs extrêmes.

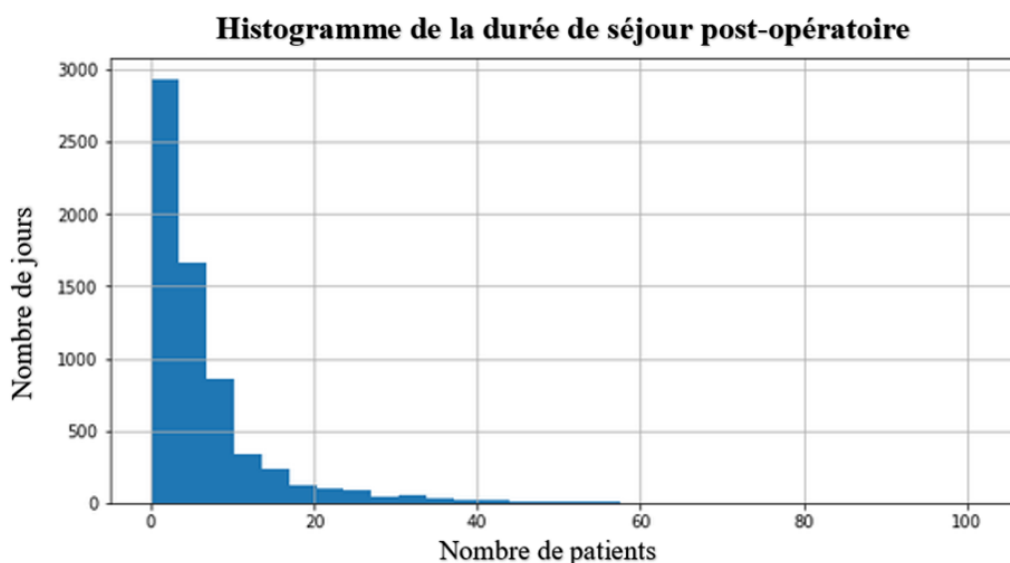


FIGURE 3.5 Distribution logarithmique de la durée de séjour sur un an de données

Nous avons remarqué que les durées de séjour des patients ainsi que leurs besoins en lits pouvaient grandement varier selon le diagnostic du patient. La durée de chirurgie elle aussi variait selon le diagnostic. Afin d'extraire des paramètres plus précis quant au profil des patients, nous avons créé des classes pour chaque service, soit des regroupements de diagnostics similaires.

Ce regroupement de diagnostics a été effectué par propagation d'affinités, un algorithme de partitionnement d'ensembles qui vise à identifier les éléments étant les plus représentatifs d'un ensemble sur la base des critères de ressemblance indiqués. Ici, nos critères étaient les médianes par diagnostic des durées de chirurgies et des durées de séjour. Le partitionnement a été réalisé sur Python, avec un facteur d'amortissement de 90%, en utilisant la librairie de Scikit-learn [20]. Le résultat : entre une et onze classes par service. Nous avons pu éliminer à la suite de ce processus trois autres durées de séjour aberrantes, l'algorithme ayant identifié par exemple une classe de chirurgie hépatobiliaire avec un seul diagnostic dont la durée de séjour était supérieure à 100 jours. Sur la figure 3.6, il s'agit du point encerclé de pointillés rouges, pour le service de chirurgie hépatobiliaire. Il en va de même sur la figure 3.7 qui illustre toutes les classes créées de la sorte. Nous noterons l'absence des greffes, celles-ci n'étant pas documentées historiquement. Nous n'utilisons qu'une seule classe pour les greffes, dont la durée de séjour et la durée de chirurgie ont été fournies séparément par le CHUM.

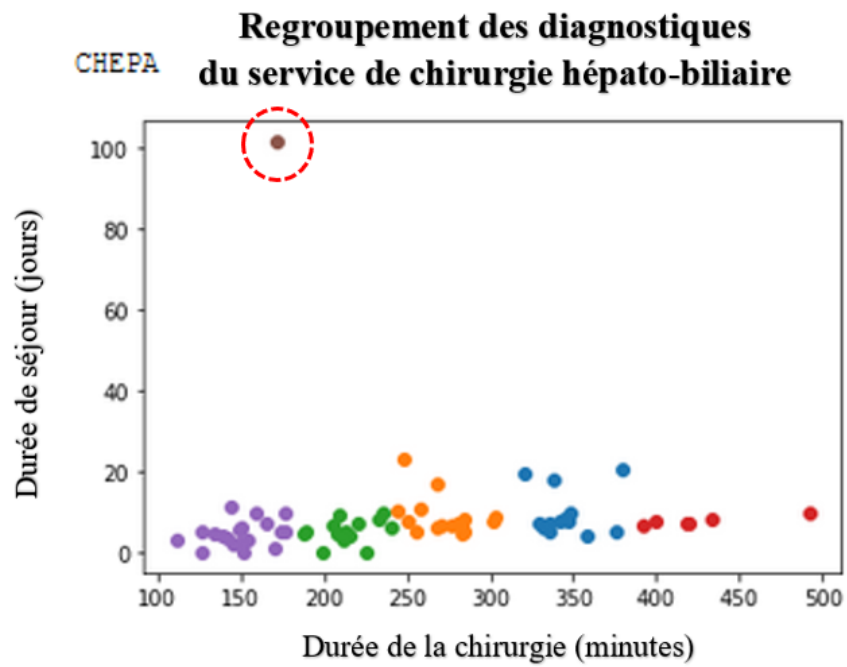


FIGURE 3.6 Une classe du service hépatobiliaire à exclure, sur des données filtrées avec un intervalle de confiance 5-95

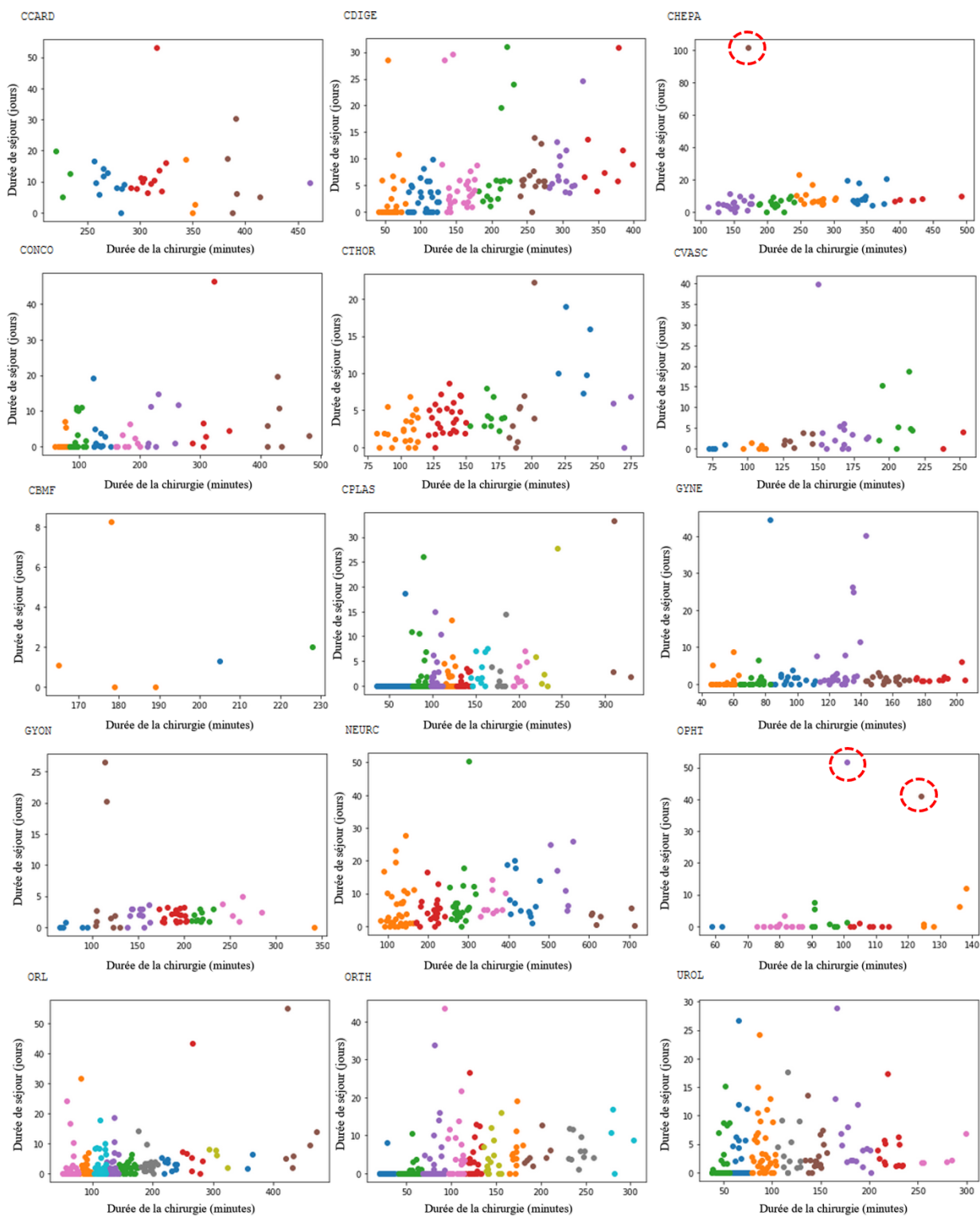


FIGURE 3.7 Création de classes pour chaque service, par un algorithme de propagation d'affinités, chaque couleur représentant une classe.



Ainsi devient-il possible d'estimer pour chaque patient, avant son arrivée au bloc opératoire, quel sera son besoin en lit, sa durée médiane de séjour et sa durée médiane de chirurgie. La durée de séjour diffère si le patient a besoin d'un lit (soit la SW1 durée de séjour à l'unité de chirurgie), ou si le patient a besoin d'un lit, mais passera d'abord par l'unité de soins intensifs (soit ICU1 la durée de séjour aux soins intensifs, suivie par la durée SW2 à l'unité de chirurgie). Ces durées de séjour selon le service et classes sont résumées par la figure 3.8. L'absence de bâton implique que les patients de cette classe retournent chez eux le jour de l'intervention chirurgicale.

Quant aux patients de greffe, ils passent 2 jours en unité chirurgicale, avant d'être transférés en unité médicale.

Le besoin d'un lit aux soins intensifs est relativement bien regroupé par le partitionnement d'ensembles, puisque la probabilité qu'un patient en ait besoin se situe généralement sous 10% ou au-dessus de 98%. La grande majorité des patients ayant fréquemment besoin de soins intensifs sont des patients de chirurgie cardiaque ainsi qu'une classe de patients de chirurgie buccale maxillofaciale. Il existe aussi une classe de chirurgie oncologique pour laquelle ce besoin est de 50%.

La durée de chirurgie quant à elle est résumée pour chaque classe et service par la figure 3.9. Nous l'avons évaluée en calculant la différence de temps entre le début et la fin de l'intervention chirurgicale. Elles sont toutes suffisamment courtes pour qu'il soit régulièrement possible d'opérer au moins un patient dans une salle courte (495 minutes) sans dépassement de temps, à l'exception de la neurochirurgie. En effet, nous avons identifié deux classes qui demandent au minimum une salle moyenne pour l'une, longue pour l'autre, afin que leurs durées de chirurgie n'entraînent pas de temps supplémentaire.

Il est à noter que ces durées de chirurgie provenant des données n'incluent pas les intercas. Dans le cas de durées très courtes comme pour les chirurgies orthopédiques de classe 1, il s'agit très souvent de chirurgies d'un jour suite auxquelles les patients retournent directement chez eux, pour lesquels l'intercas peut parfois être aussi long que la chirurgie elle-même. Plus la durée de chirurgie est courte, plus la prise en compte de l'intercas joue un rôle important dans la planification.

DMS par service, par classe

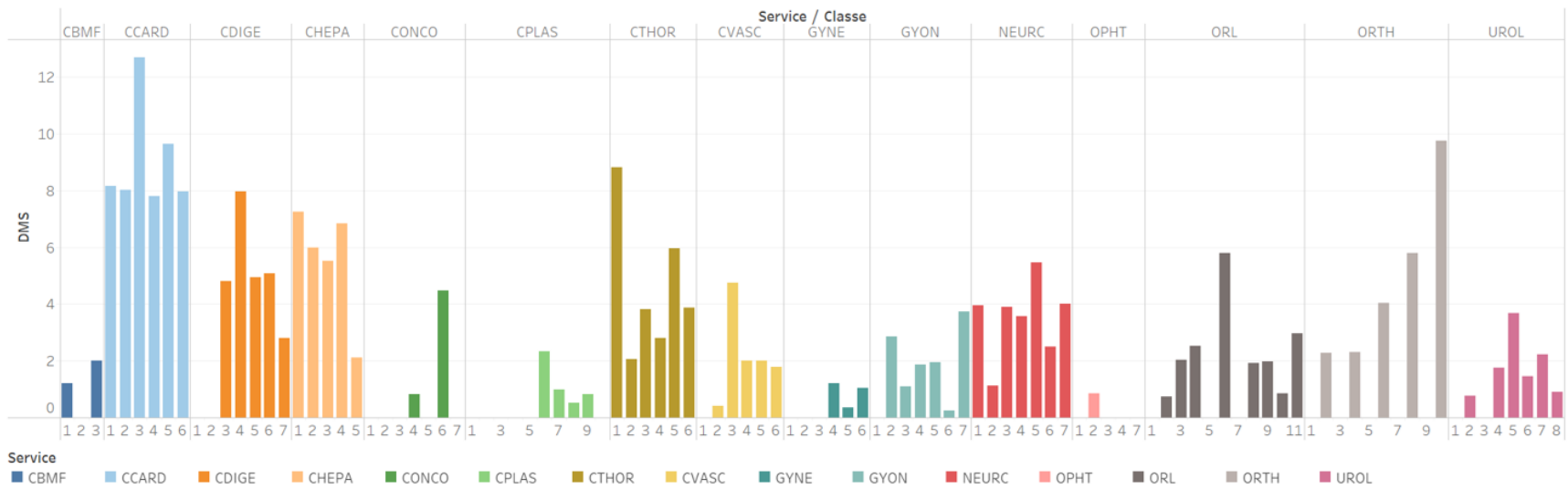


FIGURE 3.8 Durée médiane de séjour généralisée par service, par classe.

Durée de chirurgie par service, par classe

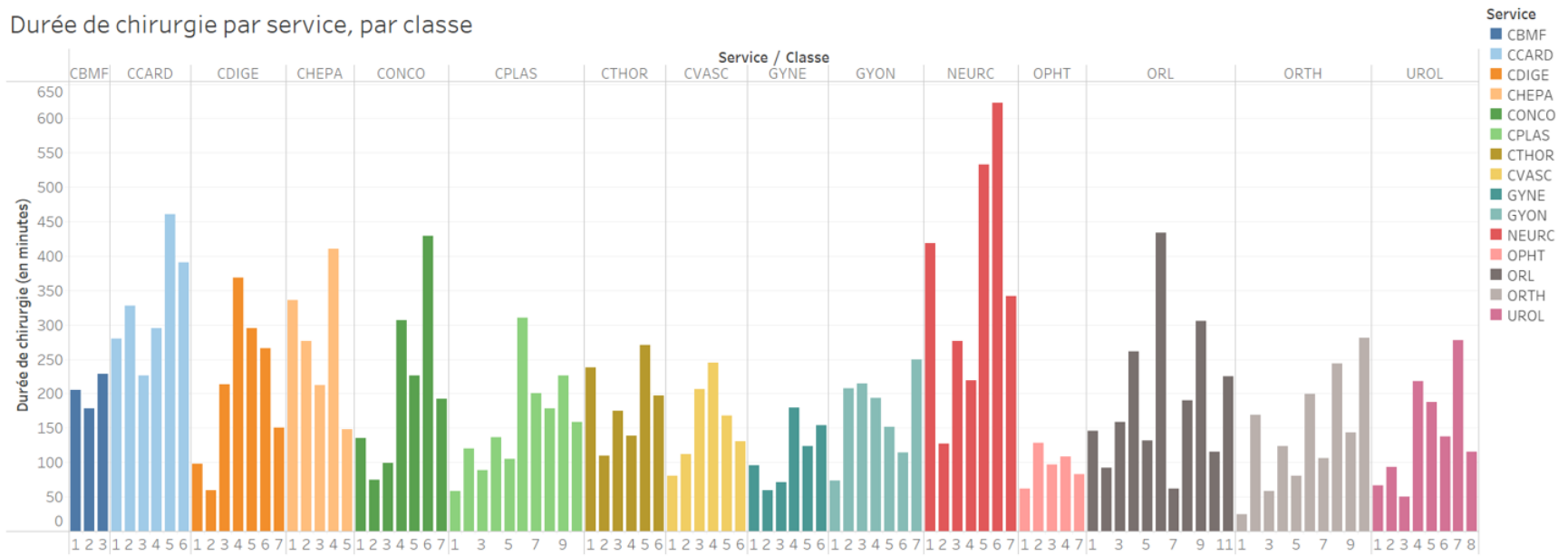


FIGURE 3.9 Durées médianes de chirurgie par service, par classe.

Nous avons couvert jusqu'ici les caractéristiques des patients. Puisque nous désirons considérer la durée de séjour dès la planification des priorités opératoires, il est important de connaître non seulement les attributs de patients vis-à-vis de leur besoin en lit, mais aussi quelles sont les ressources disponibles aux unités.

### 3.4 Caractérisation des unités

En avril 2018, 653 lits ouverts étaient à la disposition du centre hospitalier, partagés entre l'unité chirurgicale et l'unité médicale. Dans certains cas, plusieurs services de chirurgie partageaient des zones. Dans ce type de situation, nous avons supposé un partage à nombre égal afin de déterminer le nombre de lits par service aux fins de cette analyse. Le nombre de lits ainsi disponibles pour chaque service à l'unité chirurgicale est présenté par la figure 3.10.

Pour un cas très particulier, l'unité disposait d'un seul lit qui était partagé pour les patients d'ophtalmologie et de chirurgie buccale maxillofaciale. Sur la figure 3.10, ces services disposent chacun d'un lit (un demi-lit).

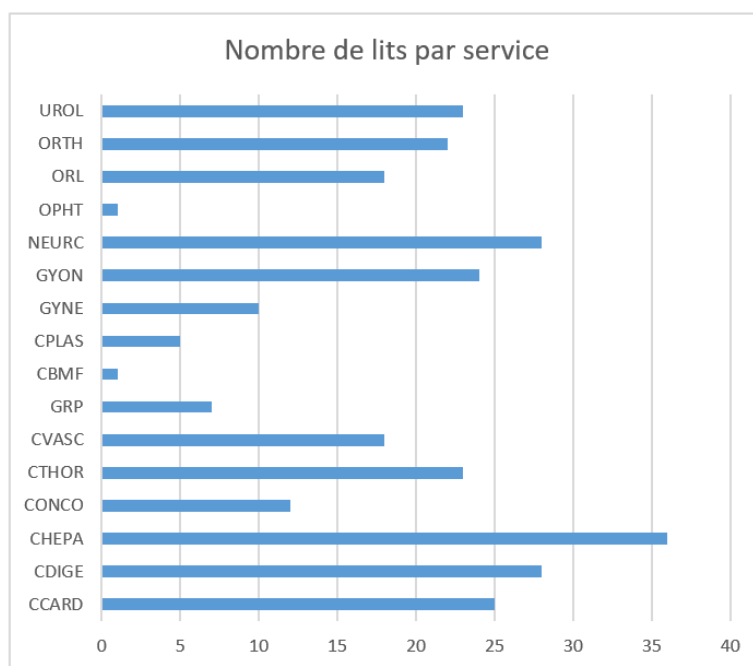


FIGURE 3.10 Lits disponibles pour chaque service à l'unité chirurgicale.

Toutefois, il est rare que tous ces lits soient réellement disponibles pour accueillir des patients de chirurgie. En réalité, on observe souvent un phénomène de débordement des patients de l'unité médicale, qui occupent alors des lits de l'unité chirurgicale. Ainsi, si le nombre de lits

réservés aux patients de chirurgie représente la capacité théorique de l'unité chirurgicale, la capacité réelle est moindre puisque diminuée par ce phénomène.

Pour les patients en état critique, c'est à l'unité de soins intensifs qu'ils occupent un lit jusqu'à ce que leur état permette un retour aux autres unités. La capacité de cette unité était de 42 lits en avril 2018. Les lits de soins intensifs sont partagés par les services des deux étages, sans réservation pour un service particulier. Toutefois, ils ne sont pas utilisés seulement par les patients de chirurgie, mais aussi par les patients d'autres départements. On s'intéresse alors au nombre de lits employés par les patients des soins intensifs postopératoires. Une analyse de l'utilisation des lits de soins intensifs montre que le maximum historique sur l'année étudiée était de 25 lits employés par les patients du bloc opératoire. Toutefois, la médiane, elle, est de 9 lits avec un 75<sup>e</sup> quantile à 13 lits.

On observe également que le flux d'entrées à l'unité de soins intensifs se concentre vers le début de la semaine, pour diminuer fortement le jeudi et vendredi. De plus, le niveau d'occupation des soins intensifs chute dès le vendredi, en préparation pour la fin de semaine qui, elle aussi, représente le seuil le plus bas d'occupation.

La figure 3.11 illustre cette évolution du nombre de lits occupés aux soins intensifs par les patients électifs du bloc opératoire. Nous y avons retiré les fins de semaine ainsi que les vendredis pour lisser la courbe. Le niveau d'occupation chute également entre la fin de décembre et le début de janvier, ce qui coïncide avec la période des fêtes de fin d'année. Un cycle est également observable avec une hausse notable du nombre de patients aux deux derniers mois de l'année, ainsi qu'une baisse graduelle du début du printemps à l'automne, mais il serait difficile de se prononcer sur la saisonnalité avec les données d'une seule année.

Occupation des lits de soins intensifs par les patients du bloc opératoire



FIGURE 3.11 Occupation des soins intensifs postopératoires en nombre de patients, sans les vendredis et les fins de semaine.

Au terme de l'analyse, nous pouvons ainsi décrire la situation au CHUM : la planification y est historique, l'ajustement en termes de disponibilité des lits est réalisé a posteriori avec des déplacements entre unités. Ces déplacements sont efficaces pour les lits de chirurgie, mais ne sont pas applicables pour les soins intensifs qui engendrent des annulations. Le besoin en lits des patients est connu à l'avance et peut être étudié à une échelle plus granulaire en divisant tous les services en classes. On peut également prédire le besoin de soins intensifs grâce à ces classes. L'attribution des services aux salles se fait sur le modèle historique, mais la longueur des salles attribuées n'est pas décidée avec les priorités opératoires : elle est faite à un niveau opérationnel et suit des règles générales. Enfin, les services le plus de priorités opératoires ne sont pas nécessairement ceux avec les plus longs temps d'attente, puisque la présence d'urgences et de semi-urgences joue aussi dans la décision du nombre de priorités opératoires.

C'est grâce à cette compréhension de la situation du contexte autour du bloc opératoire au CHUM que nous avons pu créer un modèle d'optimisation qui respecte les contraintes innées au bloc opératoire du centre hospitalier, et qui en exploite les caractéristiques connues pour créer des priorités opératoires optimales.

## CHAPITRE 4 MODÉLISATION DES PRIORITÉS OPÉRATOIRES

Dans ce chapitre, nous présenterons un modèle mathématique de programmation en nombres entiers qui permet d'optimiser la planification des priorités opératoires. Nous commencerons par poser un modèle de base qui respectera les contraintes précédemment observées dans l'étude des données et cherchera à optimiser l'utilisation des salles en priorisant les longues listes d'attente. Par la suite, nous y intégrerons la durée de séjour des patients, et discuterons de pistes de solutions pour mieux faire face à l'aléa des urgences.

### 4.1 Modèle de base

Le modèle de base est déterministe, et vise à maximiser l'utilisation du bloc opératoire tout en priorisant les patients qui ont le plus attendu. Ainsi, le modèle utilise l'allocation optimale des patients comme étape intermédiaire afin de créer la grille opératoire optimale. Celle-ci nous renseignera alors pour chaque jour combien de priorités opératoires iront à quels services. Notre modèle incorpore également la distribution des salles selon leurs temps d'ouverture entre les priorités opératoires, ce qui n'est pas présentement fait par le CHUM.

Tenir compte des différentes capacités de salles dès la création de la grille opératoire permettra de mieux planifier les services aux interventions particulièrement longues, afin d'utiliser les salles plus efficacement et de limiter les temps supplémentaires. Ainsi, cette considération permettra de mieux répartir dans chaque semaine les services qui bénéficient le plus de l'accès à des salles longues. On planifie alors le nombre de salles par durée d'ouverture qui seront accordées à chaque service, à chaque jour donné.

Afin de pouvoir toutefois respecter les capacités de temps des salles, on génère en amont des patrons, soit des matrices indiquant toutes les combinaisons possibles de classes pouvant avoir lieu dans une même salle en une journée, selon la longueur d'ouverture de la salle. Ces patients doivent appartenir au même service puisque l'on considère qu'une seule priorité opératoire par salle, par jour.

Par exemple, une combinaison de patients serait :

- 2 patients du service 2, classe 1
- 1 patient du service 2, classe 3

Enfin, le modèle renvoie non seulement une grille opératoire, mais aussi une recommandation quant au besoin de lits à planifier lors de l'ordonnancement du bloc opératoire.



TABLEAU 4.1 Paramètres du modèle de base

| Symbole           | Définition  |
|-------------------|---|
| <b>Ensembles</b>  |   |
| $I$               | Ensemble des services   |
| $J$               | Horizon de temps en jours   |
| $K$               | Ensemble des classes (regroupements de diagnostics)   |
| $H$               | Ensemble des besoins en lit, 1 = unité, 2 = soins intensifs, 3 = congé  |
| $Q$               | Ensemble des catégories d'attente   |
| $R$               | Ensemble des étages, 1 = 4e étage, 2 = 5e étage   |
| $S$               | Ensemble des types de salles, 1 = courte, 2 = moyenne, 3 = longue   |
| $P$               | Ensemble des patrons  |
| <b>Constantes</b> |   |
| $a_{ikhq}$        | Nombre de patients sur la liste d'attente du service $i$ et de classe $k$ , avec un besoin en lit $h$ et dont l'attente correspond à la catégorie $q$ |
| $b_{iksp}$        | Le nombre maximum de chirurgies de classe $k$ permises par le patron $p$ dans une salle de type $s$ , pour le service $i$                             |
| $c_q$             | Coût de l'attente de la catégorie $q$   |
| $d_{ik}$          | Durée de chirurgie de classe $k$ au service $i$   |
| $e_i$             | Le nombre maximum de priorités opératoires pouvant être accordées au service $i$ par jour   |
| $f_{jr}$          | Nombre de salles ouvertes par jour $j$ , par étage $r$  |
| $g_s$             | Nombre de salles possibles par longueur d'ouverture $s$   |
| $t_i$             | Niveau de priorité donné au service $i$   |
| <b>Variables</b>  |   |
| $x_{ijkhq}$       | Nombre de patients planifiés par service $i$ , au jour $j$ , de classe $k$ , au besoin en lit $h$ et d'attente $q$                                    |
| $y_{ijs}$         | Nombre de priorités par service $i$ , au jour $j$ , salle de type $s$   |
| $z_{ijsp}$        | Nombre de fois que le patron $p$ est choisi par service $i$ , au jour $j$ , pour des salles de type $s$   |
| $u_{jsr}$         | Nombre de salles ouvertes le jour $j$ , de type $s$ , à l'étage $r$   |

**Fonction objectif :**

$$Max \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{h \in H} \sum_{q \in Q} t_i c_q d_{ik} x_{ijkhq} \quad (4.1)$$

(4.1) Cette fonction vise à maximiser l'occupation des salles, soit la somme des durées de chirurgie  $d_{ik}$  des patients planifiés  $x_{ijkhq}$ . Ceux-ci sont également priorisés selon le coût de l'attente  $c_q$  ainsi que la priorité accordée au service  $t_i$ . Inclure les durées de chirurgie assure que les salles seront utilisées au mieux de leur capacité.

**Contraintes :**

Il est supposé ici que la disponibilité des ressources humaines n'est pas une contrainte limitante et qu'il y en aura toujours de disponibles en quantité suffisante, soit des chirurgiens, des anesthésistes, des équipes de nettoyage ainsi que du personnel à la salle de réveil.

$$\sum_{j \in J} x_{ijkhq} \leq a_{ikhq} \quad \forall i \in I, k \in K, h \in H, q \in Q \quad (4.2)$$

(4.2) Cette contrainte définit que le nombre total de patients planifiés  $x_{ijkhq}$  sur l'horizon  $J$  ne peut dépasser le nombre de patients sur la liste d'attente de profil  $ikhq$ , soit  $a_{ikhq}$ .

$$\sum_{s \in S} u_{jsr} \leq f_{jr} \quad \forall j \in J, r \in R \quad (4.3)$$

$$\sum_{r \in R} u_{jsr} \leq g_s \quad \forall j \in J, s \in S \quad (4.4)$$

$$\sum_{i=1+7*(r-1)}^{7+9*(r-1)} y_{ijs} \leq u_{jsr} \quad \forall j \in J, s \in S, r \in R \quad (4.5)$$

(4.3) Cette contrainte impose que le nombre de salles  $u_{jsr}$  qu'il est possible de programmer au jour  $j$  à l'étage  $r$ , ne puisse dépasser le nombre de salles ouvertes  $f_{jr}$ .

(4.4) Cette contrainte restreint le nombre de salles  $u_{jsr}$  de type  $s$  qu'il est possible de programmer simultanément le jour  $j$ , soit  $g_s$  la borne supérieure du nombre de salles programmables de type  $s$ .

(4.5) Il s'agit de la contrainte qui limite le nombre de priorités opératoires  $y_{ijs}$  assignées à chaque type de salle  $s$  par le nombre de salles du même type qui ont été programmées pour le jour  $j$  à l'étage  $r$  correspondant, soit  $u_{jsr}$ . Les services 1 à 7 ne peuvent être assignés qu'à

des salles à l'étage  $r = 1$ , tandis que les services 8 à 16 correspondent l'étage  $r = 2$ .

$$\sum_{s \in S} y_{ijs} \leq e_i \quad \forall i \in I, j \in J \quad (4.6)$$

(4.6) Cette contrainte empêche la planification pour chaque jour  $j$  de plus  $e_i$  priorités opératoires de service  $i$ . Cette limite du nombre de priorités quotidiennes est définie par la quantité d'équipements disponibles pour chaque service.

$$\sum_{p \in P} z_{ijsp} = y_{ijs} \quad \forall i \in I, j \in J, s \in S \quad (4.7)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{q \in Q} x_{ijkhq} \leq \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} z_{ijsp} b_{iksp} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (4.8)$$

(4.7) Cette contrainte définit que le nombre total de patrons sélectionnés  $z_{ijsp}$  doit correspondre au nombre de priorités opératoires accordées au service  $i$ , le jour  $j$ , pour des salles de type  $s$ .

(4.8) Cette contrainte assure le respect de la capacité journalière du service  $z_{ijsp} b_{iksp}$  quant au nombre de patients  $x_{ijkhq}$  de service  $s$  et de classe  $k$  qu'il est possible d'accueillir. Chaque patron  $p$  correspond à une combinaison de patients de classe  $k$  qu'une salle peut accueillir, et  $z_{ijsp}$  renvoie le nombre de patrons  $p$  sélectionnés au jour  $j$  pour le service  $i$ .

Enfin, toutes les variables du problème sont contraintes par la non-négativité. Ainsi nous avons les contraintes :

$$x_{ijkhq} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, h \in H, q \in Q \quad (4.9)$$

$$y_{ijs} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, s \in S \quad (4.10)$$

$$z_{ijsp} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, s \in S, p \in P \quad (4.11)$$

$$u_{jsr} \geq 0 \quad \forall j \in J, s \in S, r \in R \quad (4.12)$$

Toutefois, le modèle de base n'est pas suffisant pour représenter l'ensemble des contraintes qui permettraient de planifier des priorités opératoires qui respectent les règles implicites de la planification du centre hospitalier qui ont été discutées avec ses gestionnaires. C'est pourquoi nous suggérons l'ajout de limitations additionnelles.

## 4.2 Limitations additionnelles

L'étude des priorités opératoires historiques du CHUM montre que celles-ci ne varient que très peu dans le temps. Cette observation est non seulement valide d'une semaine à l'autre, mais également d'une journée à l'autre. Aussi, il n'est pas possible d'empêcher entièrement la programmation d'un service.

Ainsi, nous établissons des contraintes supplémentaires pour prévenir une divergence trop importante de notre solution vis-à-vis de la grille opératoire actuelle. À cet effet, nous ajouterons des contraintes d'écart ainsi qu'un quota minimum de priorités opératoires à accorder à chaque service. Il est possible de relaxer ou retirer ces contraintes afin d'observer quelle solution on obtiendrait avec plus de flexibilité, contrairement aux contraintes du modèle de base qui ne peuvent être retirées. Elles visent ainsi à faciliter l'adoption de la solution obtenue ainsi qu'à minimiser les changements.

TABLEAU 4.2 Paramètres pour les limites additionnelles

| Symbole                     | Interprétation  |
|-----------------------------|---|
| <b>Nouvel Ensemble</b>      |   |
| $W$                         | Ensemble des semaines   |
| <b>Nouvelles constantes</b> |   |
| $n_i$                       | Quota minimum de chirurgies du service $i$ sur l'horizon de temps |
| $\delta_1$                  | Limite d'écart quotidien  |
| $\delta_2$                  | Limite d'écart hebdomadaire                                       |
| <b>Nouvelles variables</b>  |   |
| $\alpha_{i1}$               | Borne inférieure de l'écart quotidien par service $i$             |
| $\alpha_{i2}$               | Borne inférieure de l'écart hebdomadaire par service $i$          |
| $\beta_{i1}$                | Borne supérieure de l'écart quotidien par service $i$             |
| $\beta_{i2}$                | Borne supérieure de l'écart hebdomadaire par service $i$          |

**Nouvelles contraintes :**

$$\sum_{j \in J} \sum_{s \in S} y_{ijs} \geq n_i \quad \forall i \in I \quad (4.13)$$

(4.13) Cette contrainte impose un minimum de  $n_i$  priorités opératoires par service  $s$  sur l'horizon  $J$ .

$$\sum_{s \in S} y_{ijs} \geq \alpha_{i1} \quad \forall i \in I, j \in J, j \neq 6, 7, 13, 14, 20, 21, 27, 28 \quad (4.14)$$

$$\sum_{s \in S} y_{ijs} \leq \beta_{i1} \quad \forall i \in I, j \in J, j \neq 6, 7, 13, 14, 20, 21, 27, 28 \quad (4.15)$$

(4.14) Cette contrainte assure que la variable  $\alpha_{i1}$  prenne pour valeur la borne inférieure du nombre de priorités  $y_{ijs}$  accordées par jour  $j$  au service  $i$  sur l'horizon. Seuls les jours ouvrables sont considérés, puisqu'aucune priorité opératoire n'est planifiée pour les fins de semaine.

(4.15) Similaire à la contrainte précédente, elle assure que la variable  $\beta_{i1}$  prenne pour valeur la borne supérieure du nombre de priorités  $y_{ijs}$  accordées par jour  $j$  au service  $i$  sur l'horizon.

$$\sum_{j=7w-6}^{7w} \sum_{s \in S} y_{ijs} \geq \alpha_{i2} \quad \forall i \in I, w \in W \quad (4.16)$$

$$\sum_{j=7w-6}^{7w} \sum_{s \in S} y_{ijs} \leq \beta_{i2} \quad \forall i \in I, w \in W \quad (4.17)$$

(4.16) et (4.17) Ces deux contraintes, similaires aux deux précédentes, assurent que  $\alpha_{i2}$  et  $\beta_{i2}$  prennent respectivement pour valeur la borne inférieure et supérieure du nombre de priorités  $y_{ijs}$  accordées par semaine  $w$  à chaque service  $i$ .

$$\beta_{i\sigma} - \alpha_{i\sigma} \leq \delta_\sigma \quad \forall i \in I, \sigma \in \{1, 2\} \quad (4.18)$$

(4.18) La différence entre la borne supérieure  $\beta$  et inférieure  $\alpha$  ne doit pas excéder  $\delta$ .  $\sigma$  vaut 1 pour la contrainte relative à l'écart quotidien, 2 pour l'écart hebdomadaire.

Enfin, les nouvelles variables du problème sont aussi contraintes par la non-négativité. Ainsi nous avons les contraintes :

$$\alpha_{i\sigma} \geq 0 \quad \forall i \in I, \sigma \in \{1, 2\} \quad (4.19)$$

$$\beta_{i\sigma} \geq 0 \quad \forall i \in I, \sigma \in \{1, 2\} \quad (4.20)$$

Le modèle de base qui comprend ces limitations additionnelles présentera ainsi moins de variations de ses priorités opératoires au cours de l'horizon planifié, et respectera également un quota minimum de priorités pour que chaque service puisse traiter ses patients. Faire varier les valeurs des membres de droite de ces contraintes permettrait d'observer quels gains pourraient être faits si l'on était prêt à sacrifier la stabilité et la répétition de la grille opératoire. Maintenant que cette variation du modèle permet une planification qui respecte les règles suivies par le centre hospitalier, nous pouvons nous intéresser aux lits.

### **4.3 Modèle avec intégration de la durée de séjour**

La prise en compte de la durée de séjour nécessite l'ajout de contraintes pour représenter la capacité limitée de lits aux unités. D'une part, nous avons les lits à l'unité chirurgicale qui sont propres à chaque service. D'autre part, les lits aux soins intensifs sont communs à tous les services.

La durée de séjour quant à elle varie au sein d'un même service. La classe (ou l'ensemble auquel appartient le diagnostic) influence cette durée, tout comme le besoin en lit. Ainsi, un patient se rendant directement à l'unité chirurgicale ne passera pas le même temps qu'un patient qui passerait d'abord quelques jours aux soins intensifs avant de continuer son séjour en chirurgie.

Enfin, il est également possible d'intégrer les besoins en lits à la fonction objectif afin de pousser la solution à maximiser non seulement l'utilisation des salles, mais aussi l'utilisation des lits.

TABLEAU 4.3 Paramètres pour l'intégration de la durée de séjour

| Symbole                     | Interprétation   |
|-----------------------------|--|
| <b>Nouvelles constantes</b> |  |
| $\theta_{ikh}$              | Durée de séjour à l'unité chirurgicale par service $i$ , classe $k$ , besoin en lit $h$    |
| $\lambda_{ik}$              | Durée de séjour à l'ICU par service $i$ , classe $k$                                       |
| $\gamma_i$                  | Capacité en lits du service $i$ à l'unité chirurgicale                                     |
| $\mu$                       | Capacité en lits aux soins intensifs   |
| $\epsilon_{ij}$             | Nombre de lits occupés au service $i$ , jour $j$ , par des patients de l'horizon précédent |
| <b>Nouvelles variables</b>  |  |
| $\phi_{ijk}$                | Nombre de lits à l'unité chirurgicale occupés par service $i$ , jour $j$ , classe $k$      |
| $\psi_{ijk}$                | Nombre de lits aux soins intensifs occupés par service $i$ , jour $j$ , classe $k$         |

On considère ici que la capacité  $\gamma_i$  en lits de services est déjà diminuée par le débordement de patients en provenance des unités médicales, pour une perte de 10% de la capacité qui ne peut descendre le nombre de lits disponibles sous 1.

#### Nouvelles contraintes :

Il s'agit ici de compter le nombre de patients occupants des lits chaque jour  $j$ . Pour ce faire, plusieurs sommes itèrent parfois sur les mêmes éléments (jour, attente) de façon indépendante. Afin de représenter ces itérations différentes, nous utilisons pour ces itérations supplémentaires de jours la notation  $l$  plutôt que  $j$ .

Commun à toutes les contraintes pour lesquelles on remplace  $j$  par  $l$  dans les variables, on retrouve l'usage de la fonction  $Max(j-1, 1)$  : On souhaite vérifier pour les patients arrivés avant le jour  $j$  (soit au plus tard au jour  $j-1$ ) s'ils n'ont pas encore terminé leur séjour. Toutefois, si  $j$  vaut 1, alors la somme serait impossible avec  $j-1=0$ . Pour éviter cela, on emploie  $Max(j-1, 1)$ .

$$\begin{aligned}
\epsilon_{ij} + \sum_{q \in Q} x_{ijk1q} + \sum_{q \in Q} \sum_{l=j-\theta_{ik1}+1}^{Max(j-1;1)} x_{ilk1q} + \sum_{q \in Q} \sum_{l=j-\theta_{ik2}-\lambda_{ik}+1}^{Max(j-1;1)} x_{ilk2q} - \sum_{q \in Q} \sum_{l=j-\lambda_{ik}+1}^{Max(j-1;1)} x_{ilk2q} \\
= \phi_{ijk} \qquad \qquad \qquad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (4.21)
\end{aligned}$$

$$\sum_{k=1}^K \phi_{ijk} \leq \gamma_i \quad \forall i \in I, j \in J \quad (4.22)$$

(4.21) Cette contrainte calcule le nombre de lits occupés à l'unité chirurgicale  $\phi_{ijk}$  par service  $i$ , classe  $k$ , jour  $j$ . Cette grande somme est composée de 4 éléments, soit :

1.  $\epsilon_{ij}$  : Les patients de service  $i$  dont la demande de lit date de l'horizon précédent, toujours présents au jour  $j$
2.  $\sum_{q \in Q} x_{ijk1q}$  : La demande de lits au jour  $j$  par des patients qui vont se rendre à l'unité chirurgicale directement ( $h = 1$ ).
3.  $\sum_{q \in Q} \sum_{l=j-\theta_{ik1}+1}^{Max(j-1;1)} x_{ilk1q}$  : Les patients opérés précédemment qui ont demandé un lit et qui occupent encore un lit à l'unité chirurgicale au jour  $j$ .
4. Les patients opérés précédemment qui ont demandé un lit et qui occupent encore un lit à l'unité chirurgicale au jour  $j$ , après un passage initial par les soins intensifs. Cette partie est formée par la différence suivante :
  - (a)  $\sum_{q \in Q} \sum_{l=j-\theta_{ik2}-\lambda_{ik}+1}^{Max(j-1;1)} x_{ilk2q}$  : Les patients opérés précédemment qui ont demandé un lit et qui occupent encore un lit à l'unité chirurgicale au jour  $j$ . Les durées de séjour à l'unité chirurgicale et aux soins intensifs sont cumulées.
  - (b)  $-\sum_{q \in Q} \sum_{l=j-\lambda_{ik}+1}^{Max(j-1;1)} x_{ilk2q}$  : Moins les patients opérés précédemment qui ont demandé un lit, mais qui n'ont pas encore quitté les soins intensifs au jour  $j$ . Par conséquent ils n'occupent pas encore de lit à l'unité chirurgicale.

(4.22) Le nombre de lits occupés par jour  $j$  en unité chirurgicale ( $\phi_{ijk}$ ) ne peut dépasser le nombre de lits disponibles ( $\gamma_i$ ), pour chaque service  $i$ .

$$\sum_{q \in Q} x_{ijk2q} + \sum_{q \in Q} \sum_{l=j-\lambda_{ik}+1}^{Max(j-1;1)} x_{ilk2q} = \psi_{ijk} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (4.23)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \psi_{ijk} \leq \mu \quad \forall j \in J \quad (4.24)$$

(4.23) Cette contrainte est une version plus simple de la (4.21) : Elle calcule le nombre de lits occupés aux soins intensifs  $\psi_{ijk}$  par service  $i$ , classe  $k$ , jour  $j$ . Cette somme est composée de deux éléments, soit :

1.  $\sum_{q \in Q} x_{ijk2q}$  : La demande de lits au jour  $j$  par les patients qui vont se rendre aux soins intensifs ( $h = 2$ ).



2.  $\sum_{q \in Q} \sum_{l=j-\lambda_{ik}+1}^{Max(j-1;1)} x_{ilk2m}$  : Les patients opérés précédemment qui ont demandé un lit et qui occupent encore un lit aux intensifs au jour  $j$ .

(4.24) Le nombre de lits occupés par jour  $j$  aux soins intensifs ( $\psi_{ijk}$ ) ne peut dépasser le nombre de lits disponibles ( $\mu$ ).

Une fois de plus, les nouvelles variables du problème sont contraintes par la non-négativité. Ainsi nous avons les contraintes :

$$\phi_{ijk} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (4.25)$$

$$\psi_{ijk} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (4.26)$$

Si ces contraintes permettent le respect du nombre de lits disponibles à l'unité chirurgicale et aux soins intensifs, elles ne garantissent pas une utilisation efficace des lits. Dans cette optique, nous suggérons une double maximisation, soit l'objectif précédent de maximiser l'utilisation des salles en priorisant selon le temps passé sur la liste d'attente, ainsi qu'un nouvel objectif de maximiser l'utilisation des lits.

**Nouveau paramètre :**

TABLEAU 4.4 Paramètre pour l'intégration de la durée de séjour

| Symbole                   | Interprétation   |
|---------------------------|--|
| <b>Nouvelle constante</b> |  |
| $\eta$                    | Poids attribué à l'occupation des lits dans la fonction objectif |

Afin de s'assurer que les deux éléments à maximiser soient du même ordre de grandeur, il faut alors établir un poids pour l'utilisation des lits.

Nous utilisons l'approche suivante afin de trouver une bonne valeur de  $\eta$ . Nous effectuons d'abord deux résolutions différentes, chacune avec une seule dimension à maximiser. Ensuite, nous posons l'équation suivante :

$Z_1$  = Valeur de la fonction objectif qui maximise l'utilisation des salles

$Z_2$  = Valeur de la fonction objectif qui maximise l'utilisation des lits

$$\eta = \frac{Z_2}{Z_1}$$

**Nouvelle fonction objectif :**

$$\begin{aligned}
 &Max \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{h \in H} \sum_{q \in Q} t_i c_q d_{ik} x_{ijkhq} \\
 &+ \eta \left( \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{q \in Q} \theta_{ik1} x_{ijk1q} + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{q \in Q} (\theta_{ik2} + \lambda_{ik}) x_{ijk2q} \right) \quad (4.27)
 \end{aligned}$$

(4.27) Cette fonction vise à maximiser la somme de deux éléments, soit :

1. L'occupation des salles, formée par la somme des durées de chirurgie  $d_{ik}$  des patients planifiés  $x_{ijkhq}$ . Les patients sont priorisés par le coût de l'attente  $c_q$  et selon la priorité accordée au service  $t_i$ . La fonction maximisera l'utilisation des salles.

2. L'occupation des lits (et ce pour les deux trajectoires,  $h = 1$  et  $h = 2$ ). Celle-ci est augmentée par le poids  $\eta$  afin qu'elle soit aussi importante que l'occupation des salles dans la maximisation. La fonction maximisera l'utilisation des lits.

Le modèle ainsi obtenu permet d'intégrer les lits à la planification des priorités opératoires. Nous savons toutefois qu'il ne s'agit pas de l'unique facteur externe au bloc opératoire qui pourrait en influencer le fonctionnement. Comme démontré dans l'étude de cas, les urgences représentent un aléa auquel doit faire face la planification du bloc opératoire. Nous pouvons ainsi nous intéresser à créer un modèle plus robuste face à ces imprévus. Une des méthodes pour y parvenir serait de réserver des salles.

#### 4.4 Réserve

La solution obtenue avec le modèle défini jusqu'ici pourrait toutefois résulter en de nombreuses annulations afin de libérer des créneaux horaires pour les patients urgents. Nous proposons de prendre en compte ces urgences en amont en réservant des salles pour les accueillir. Les salles réservées chaque jour pour recevoir des patients urgents sont donc planifiées "vides" de toute priorité opératoire.

Lorsque des patients urgents arrivent au bloc opératoire, ils sont opérés dans les salles réservées en premier. Puis, si la capacité des salles réservées arrive à saturation, alors il sera nécessaire d'annuler des patients électifs selon la politique d'annulation en place. Nous explorerons davantage ce processus dans la section portant sur la simulation des urgences dans le chapitre 5.

Il est à noter que cette représentation de la réserve des salles considère encore une fois que la disponibilité du personnel n'est pas contraignante. En réalité, il y pourrait y avoir des annulations dues à un manque de chirurgiens pour opérer les patients urgents, même s'il y a des disponibilités dans les salles réservées.

**Nouveau paramètre :**

TABLEAU 4.5 Paramètre de la réservation

| Symbole           | Interprétation             |
|-------------------|----------------------------|
| <b>Constantes</b> |                            |
| $\rho$            | Pourcentage de réservation |

**Modification à la contrainte 4.4 :**

$$\sum_{r \in R} u_{j sr} \leq g_s (1 - \rho) \quad \forall j \in J, s \in S \quad (4.28)$$

(4.28) Le nombre total de salles ouvertes  $u_{j sr}$  est limité par les disponibilités en longueur d'ouverture  $g_s$ , diminué par la proportion  $\rho$  de salles réservées.

Cette version du modèle permet alors de planifier manuellement, ou par heuristique, les salles réservées afin d'accueillir les patients urgents. Cette planification peut aussi se faire à l'échelle opérationnelle, en début de semaine ou même en début de journée, selon la politique de traitement des urgences mise en place par les gestionnaires. Toutefois, elle ne convient pas aux patients semi-urgents qui sont eux connus, mais ne peuvent pas attendre suffisamment longtemps pour être capturés par les listes d'attente. Une dernière variation du modèle qui permettrait alors de prendre en compte cette catégorie de patients serait une planification sur un horizon plus court.

#### 4.5 Diminuer l'horizon de temps

Si la réservation est notamment utile pour faire face aux "vraies urgences", soit les patients dont la situation critique nécessite une chirurgie le jour même de leur arrivée, elle est insuffisante pour aider à gérer les semi-urgences (ou patients électifs au temps d'attente très court). En effet, avec une capture aux quatre semaines de la liste d'attente, la planification manquera tous les patients semi-urgents qui se seront inscrits pour se faire opérer avant le prochain affichage de la liste d'attente.

Cette proportion de patients échappant à la planification peut être drastiquement réduite si l'on planifie les priorités opératoires aux deux semaines, plutôt que sur un horizon de 28 jours. Ainsi, l'affichage de la liste d'attente sera effectué deux fois plus souvent, pour créer une grille opératoire de 14 jours. On échange ici le degré d'efficacité qu'offre une optimisation réalisée

sur un plus grand horizon de temps (fractionner l'horizon résulte en une perte d'optimisation) pour une meilleure flexibilité dans la prise en compte des patients semi-urgents.

Pour mieux comprendre les changements apportés par chaque itération du modèle, il est nécessaire de les résoudre et d'en comparer les résultats. C'est justement ce que nous tâcherons de faire dans la section suivante portant sur l'analyse des résultats.

## CHAPITRE 5 ANALYSE DES RÉSULTATS

Nous discuterons dans ce chapitre des expérimentations effectuées avec le modèle précédemment présenté. Ce chapitre couvre les résultats obtenus suite à la résolution du modèle, présentés sous forme d'analyse de scénarios. Enfin, nous ferons appel à la simulation pour étudier comment la solution proposée réagit face à des arrivées de patients urgents. Toutefois, nous aborderons dans un premier temps le choix des paramètres pour résoudre le modèle.

### 5.1 Paramètres

Les paramètres nous proviennent de différents fichiers, de discussions ainsi que de traitements de données historiques du centre hospitalier. Nous parlerons d'abord des paramètres du modèle de base, pour ajouter successivement les paramètres pour chaque palier de complexification du modèle.

Nous disposons de listes d'attentes de plusieurs mois, soit de décembre 2018 à mars 2019, indiquant les patients non programmés, les patients programmés et les patients non disponibles, pour chaque service et pour chaque catégorie d'attente. Nous considérons que les deux premiers sont programmables, tandis que les patients non disponibles ne le sont pas. La liste d'attente ne fournit toutefois pas d'information quant au diagnostic des patients ou à leur besoin en lit, qui sont des paramètres connus avant l'opération. Nous effectuons alors une génération aléatoire de ces paramètres selon les services, afin d'enrichir le profil des patients de la liste d'attente que nous utiliserons. Aux fins de cette résolution, nous considérons la liste d'attente du mois de janvier. De cette façon, nous obtenons le nombre de patients  $a_{ikhq}$  sur la liste d'attente dont le profil correspond au service  $i$ , la classe  $k$ , au besoin de lit  $h$  ainsi qu'à la catégorie d'attente  $q$ .

Les ouvertures des salles sont quant à elles obtenues au travers de la grille opératoire qui avait été établie pour janvier 2019. Nous en prélevons le nombre de priorités par étage, par jour, pour savoir combien de salles étaient prévues pour chaque étage, chaque jour, soit  $f_{jr}$ . On ne connaît toutefois pas la distribution exacte des longueurs d'ouverture des salles, mais seulement la limite quotidienne  $g_s$  de 14 salles longues et de 5 salles moyennes, ainsi que les services généralement attribués à des salles longues (cardiaque et neurochirurgie). Il n'y a pas de limite sur le nombre de salles courtes. Le nombre de salles suffit toutefois au modèle puisque l'algorithme détermine l'attribution des durées de salles.

L'intercas est ajouté à la durée d'ouverture de chaque salle ainsi qu'à la durée des chirurgies

$d_{ik}$ . Nous utilisons une base de 30 minutes pour cet intercas. Quant aux durées de chirurgies, nous utilisons les médianes obtenues selon la classe et le service.

Ces durées de chirurgies et durées d'ouverture des salles, augmentées par l'intercas, nous permettent de générer des patrons, soit une énumération des combinaisons de chirurgies possibles selon le type de la salle. Cette génération des patrons est effectuée en amont de la résolution, et ne permet des combinaisons qu'au niveau des classes ; aucune combinaison de services différents n'est possible.  $|P|$  prend une valeur quelconque qui doit être supérieure au nombre maximal de patrons possibles pour un service, tous services confondus (1313). Ainsi, la constante  $b_{iksp}$  renseigne le nombre de chirurgies de classe  $k$  que permet le patron  $p$  lorsque la salle est de type  $s$ , pour le service  $i$ .

En ce qui concerne le reste des ensembles, nous considérons :

- 16 services dans l'ensemble  $S$
- 28 jours dans l'horizon  $J$
- 11 classes dans l'ensemble  $K$  (lorsqu'un service possède moins de 11 classes, alors il y a des classes vides que l'on ne retrouve pas dans la liste d'attente)
- 3 besoins de lits possibles dans l'ensemble  $H$  (soit 1 pour le besoin d'un lit en chirurgie, 2 pour le besoin d'un lit en soins intensifs suivi d'un séjour en chirurgie, 3 pour un congé immédiat)
- 10 catégories d'attente de l'ensemble  $Q$
- 2 étages dans l'ensemble  $R$
- 3 types de salles dans l'ensemble  $S$  (soit 1 pour une salle courte de 495 minutes + intercas, 2 pour une salle moyenne de 570 minutes + intercas, 3 pour une salle longue de 630 minutes + intercas)

Enfin, la limite d'équipements par service  $e_i$  correspond à celle précédemment observée dans l'analyse de données, tandis que le niveau de priorité par service,  $t_i$  est égal à 1 pour tous les services à l'exception de la chirurgie cardiaque qui est jugée de nature plus pressante que les autres, la rendant deux fois plus importante ( $t_i = 2$ ). Ainsi, un patient de chirurgie cardiaque est aussi important qu'un patient de n'importe quel autre service ayant attendu deux fois plus longtemps.

Si nous avons couvert jusqu'ici les paramètres du modèle de base, d'autres constantes s'ajoutent avec les limitations additionnelles suggérées au modèle. Celles-ci visent à recréer une stabilité dans le nombre de priorités opératoires afin d'imiter les règles que le modèle historique semble suivre. Ainsi nous avons un minimum d'une priorité opératoire par service  $n_i$  sur l'horizon de temps (il n'est pas possible de ne pas planifier un service), ainsi qu'une limite d'écart quotidienne  $\delta_1$  et hebdomadaire  $\delta_2$  de 1.

L'intégration des lits au modèle nécessite la considération du nombre de lits disponibles par service en chirurgie  $\gamma_i$  correspondant à ceux discutés au chapitre 3. Toutefois, nous diminuons ce nombre de lits de 10% pour représenter le débordement de patients de l'unité médicale, avec un arrondi du résultat. Cette proportion couvre également les rares cas de patients aux durées de séjour tellement longues (souvent hors de l'intervalle de confiance 5-95) qu'il est difficile de les considérer dans un modèle déterministe.

Le nombre de lits aux soins intensifs  $\mu$  est fixé à 75e centile de lits occupés simultanément par des patients du bloc opératoire immédiatement après leur chirurgie, soit 13 lits. L'étude des données historiques montrait une fluctuation suggérant une évolution cyclique du nombre de lits aux soins intensifs dédiés au bloc opératoire au travers de l'année. Toutefois, nous nous limiterons à une évaluation constante sur l'année au troisième quartile pour nos résultats.

Les durées de séjours  $\lambda_{ik}$  quant à elles proviennent de l'analyse des données effectuée au chapitre 3, en jours, arrondies à l'entier supérieur. Ainsi, si un patient ne devait utiliser de lit que pour une demi-journée, nous considérons ce lit occupé pour toute la journée jusqu'à la prochaine ouverture du bloc opératoire le matin suivant. Cette hypothèse convient puisque les lits se libérant au milieu de la journée permettent d'assurer les déplacements de patients et offrent une flexibilité dans la gestion quotidienne des lits.

Pour les lits occupés au début de l'horizon de temps par des patients accueillis à l'horizon précédent,  $\epsilon_{ij}$ , on émet l'hypothèse qu'aucun patient de l'horizon précédent n'occupe de lit au début de janvier. Pour des résolutions de mois consécutifs, ce paramètre est fourni par l'occupation des lits à la fin de l'horizon précédent : on peut documenter ce paramètre puisque l'on dispose de la demande de lits par jour, par classe, service et nature du besoin (passage par les soins intensifs ou non), ainsi que des durées de séjour correspondant.

Finalement, l'ajout de la réservation des salles demande de choisir la valeur de  $\rho$ , le pourcentage de la réservation. Les patients urgents représentent 22,33% des interventions chirurgicales (urgentes et électives) observées sur l'année de donnée. Si on y inclut les patients semi-urgents, dont le temps d'attente est inférieur à une semaine, ce pourcentage s'élève à 31,77% des patients. Nous supposons qu'une réservation de 20% permettrait d'accueillir la majorité des urgences en maintenant un équilibre entre les annulations de chirurgies électives



ainsi que l'efficacité dans l'utilisation des salles. Nous avons simulé l'arrivée de patients urgents pour juger de l'efficacité de ce pourcentage de réservation, ce que nous couvrirons à la fin de ce chapitre.

Ces paramètres, issus de l'étude du centre hospitalier, sont ainsi utilisés pour résoudre le modèle dans ses différents niveaux de complexité présentés au chapitre précédent. En utilisant ces paramètres, nous avons généré cinq scénarios à fins de comparaisons.

## 5.2 Analyse de scénarios

L'efficacité des priorités opératoires générées par les scénarios que nous allons présenter peut être comparée à l'aide des indicateurs de performance suivants.

- **Attente** : Le temps d'attente moyen de tous les patients opérés sur l'horizon de temps, exprimé sous forme de catégorie d'attentes. On peut faire la distinction entre l'attente globale qui concerne l'ensemble des patients, et l'attente pour les patients ayant demandé des lits ou dont le congé a été accordé directement suite à l'intervention.
- **Taux d'utilisation des salles** : Le rapport entre la durée totale des chirurgies programmées pour une salle sur une journée et la durée d'ouverture de la salle ce jour.
- **Demande quotidienne de lits** : La proportion de patients opérés nécessitant un lit sur le nombre total de chirurgies programmées, par jour d'ouverture du bloc opératoire.
- **Taux d'utilisation des lits aux unités** : Le rapport entre le nombre de lits occupés pour un service sur une journée à l'unité chirurgicale et le nombre de lits disponibles pour ce service. Seuls les jours d'ouverture du bloc opératoire sont considérés.
- **Taux d'utilisation des lits aux soins intensifs** : Le rapport entre le nombre de lits occupés sur une journée aux soins intensifs et le nombre de lits disponibles. Seuls les jours d'ouverture du bloc opératoire sont considérés.

Les scénarios présentés dans le tableau 5.1 ont tous été bâtis de façons successive, et comportent toutes les caractéristiques des scénarios précédents : Le dernier scénario est donc une variation consécutive du quatrième scénario, qui est une variation du troisième scénario, ainsi de suite. Leurs indicateurs de performance sont résumés dans le tableau.

Le premier scénario sert de référence pour la suite, il s'agit du modèle de base, soit l'optimisation des salles avec une priorisation des patients selon le temps attendu. Il est résolu pour un horizon de 28 jours. Les contraintes d'écart, les lits et la réservation des salles ne sont pas considérés ici.

Le second scénario est le modèle avec des limitations additionnelles pour éviter les variations dans le nombre de priorités opératoires à l'échelle quotidienne et hebdomadaire, ainsi que pour garantir au minimum une priorité opératoire par service sur l'horizon de temps.

Le troisième scénario implique l'intégration des lits. Ainsi, il est doté de contraintes visant à empêcher le dépassement de la capacité de lits, et maximise non seulement l'objectif du premier scénario, mais aussi l'utilisation des lits. Afin de décider du poids à appliquer à l'utilisation des lits pour que ces deux sous-objectifs partagent un même ordre de grandeur, nous avons au préalable effectué deux résolutions distinctes pour chaque dimension de la fonction objectif. Nous avons ensuite estimé le poids à accorder à la somme des lits utilisés en divisant la valeur de la fonction objectif de l'un par celle de l'autre.

Le quatrième scénario ajoute une réservation des salles. Chaque jour, 20% des salles sont réservées (et ne sont donc pas programmées). Le poids de l'utilisation des lits est généré à nouveau suivant la méthode expliquée pour le troisième scénario.

Enfin, le cinquième et dernier scénario raccourcit l'horizon de temps aux 14 premiers jours. Encore une fois, le poids de l'utilisation des lits est généré à nouveau.

Les résultats qui suivront auront été obtenus en résolvant le modèle avec le solveur commercial ILOG CPLEX 221, pour une implémentation en Julia avec la librairie JuMP. La machine employée disposait de 16 GB de mémoire vive et d'un processeur Intel(R) Core(TM) i7-9700 à 3.00 GHz. Les critères d'arrêt mis en place étaient l'obtention d'un GAP inférieur à 1% ou le dépassement de 15 minutes. Nos expérimentations antérieures ont montré qu'un plateau est atteint après 15 minutes de temps de calcul, nécessitant plusieurs heures de calcul pour de faibles améliorations du GAP. Sur des machines moins puissantes, des heures de calcul sont nécessaires pour atteindre des résultats similaires à ceux présentés.

TABLEAU 5.1 Comparaison d'indicateurs de performance entre 5 scénarios

|                            | 1 - Base 28 jours | 2 - Lim. additionnelles | 3 - Intégration des lits | 4 - Réservation | 5 - 14 jours |
|----------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------|--------------|
| <b>GAP</b>                 | 0,46%             | 0,54%                   | 3,26%                    | 1,41%           | 0,92%        |
| Attente moy*.              | 3,2               | 3,1                     | 2,9                      | 3,0             | 3,5          |
| Attente moy. Lits          | 3,1               | 3,0                     | 2,6                      | 2,6             | 3,0          |
| Attente moy. Congés        | 3,3               | 3,2                     | 3,4                      | 4,0             | 4,9          |
| Util. salles moy.          | 98%               | 98%                     | 96%                      | 98%             | 98%          |
| Util. salles var.          | 0,0019            | 0,0019                  | 0,0024                   | 0,0008          | 0,0008       |
| Util. salle Min            | 68%               | 68%                     | 68%                      | 84%             | 84%          |
| Util. salle Max            | 100%              | 100%                    | 100%                     | 100%            | 100%         |
| Demande lits moy.          | 44%               | 44%                     | 65%                      | 77%             | 78%          |
| Demande lits var.          | 0,0071            | 0,0095                  | 0,0191                   | 0,0185          | 0,0220       |
| Demande lits Min           | 32%               | 24%                     | 45%                      | 50%             | 59%          |
| Demande lits Max           | 63%               | 65%                     | 85%                      | 97%             | 99%          |
| Util. lits chir. moy.      | 48%               | 46%                     | 58%                      | 56%             | 59%          |
| Util. lits chir. var.      | 0,0019            | 0,0114                  | 0,0050                   | 0,0077          | 0,0163       |
| Util. lits chir. Min       | 21%               | 24%                     | 33%                      | 27%             | 29%          |
| Util. lits chir. Max       | 63%               | 64%                     | 65%                      | 65%             | 69%          |
| Util. lits soins int. moy. | 21%               | 18%                     | 24%                      | 26%             | 46%          |
| Util. lits soins int. var. | 0,0213            | 0,056                   | 0,0116                   | 0,0289          | 0,0506       |
| Util. lits soins int. Min  | 0%                | 0%                      | 6%                       | 0%              | 24%          |
| Util. lits soins int. Max  | 47%               | 29%                     | 47%                      | 71%             | 100%         |

\* L'unité employée est la catégorie d'attente.

Plus nous ajoutons de contraintes au modèle, moins il est possible de prioriser les patients ayant attendu le plus longtemps, soit la progression à travers des scénarios 1, 2 et 3. Cela s'observe par la décroissance de l'attente moyenne globale qui diminue d'une décimale entre chaque scénario. Toutefois, cette altération incrémentale de l'attente moyenne est faible, elle avoisine 3 catégories d'attente, soit en moyenne entre 6 mois et un an d'attente. L'intégration des lits creuse également la différence d'attente entre les patients ayant besoin de lits et ceux n'en ayant pas besoin. Cela s'explique partiellement par le fait que l'allocation des patients n'ayant pas besoin de lits est sujette à moins de restrictions, et qu'il est donc possible d'en chercher davantage dans les catégories d'attente les plus longues.

L'utilisation des salles quant à elle demeure relativement constante pour tous les scénarios, à une moyenne de 98%, ce qui est un très bon taux d'utilisation. La faible baisse de l'utilisation des salles dans le scénario d'intégration des lits peut être attribuée au GAP plus élevé que les autres résolutions par contrainte de temps de calcul. Pour les scénarios qui ne considèrent pas de réservation, un manque de patients sur la liste d'attente mène éventuellement à la planification de salles qui répondent à l'objectif de maximisation, mais dont le taux d'utilisation est peu satisfaisant (soit 68% pour le pire cas). Nous en concluons qu'un bénéfice additionnel de la réservation est de concentrer l'effort de programmation sur les meilleures combinaisons possibles, menant à une meilleure utilisation des salles (toujours supérieure à 84%). Il s'agit aussi d'un bénéfice qu'offrirait une réduction de l'horizon de temps, puisqu'avoir moins de salles à planifier pour une même liste d'attente implique une utilisation des salles plus performante.

En ce qui concerne la demande de lits, celle-ci ne suit pas la cible quotidienne de 50% présentement appliquée au centre hospitalier. Pour les deux scénarios qui précèdent l'intégration des lits, ce sont 44% des patients qui nécessitent quotidiennement des lits suite à leur chirurgie en moyenne. Dès l'ajout des contraintes de lits ainsi que de l'objectif de maximiser l'utilisation des lits, cette proportion monte à plus de 65%, soit près de 78% dans le cas des deux scénarios avec de la réservation. Si cela s'explique facilement par la nouvelle fonction objectif, on constate néanmoins que les scénarios avec de la réservation présentent des jours pour lesquels près de la totalité des interventions nécessitent des lits, soit plus de 97%. Ces deux scénarios témoignent du potentiel atteignable avec suffisamment d'organisation et de personnel pour permettre l'accueil d'autant de patients vers les unités. La solution proposée s'accompagne alors d'une recommandation à suivre lors de l'allocation des patients quant à la demande de lits cibles, celle-ci varie sur l'horizon, comme on peut l'observer dans la figure 5.1 pour le quatrième scénario.

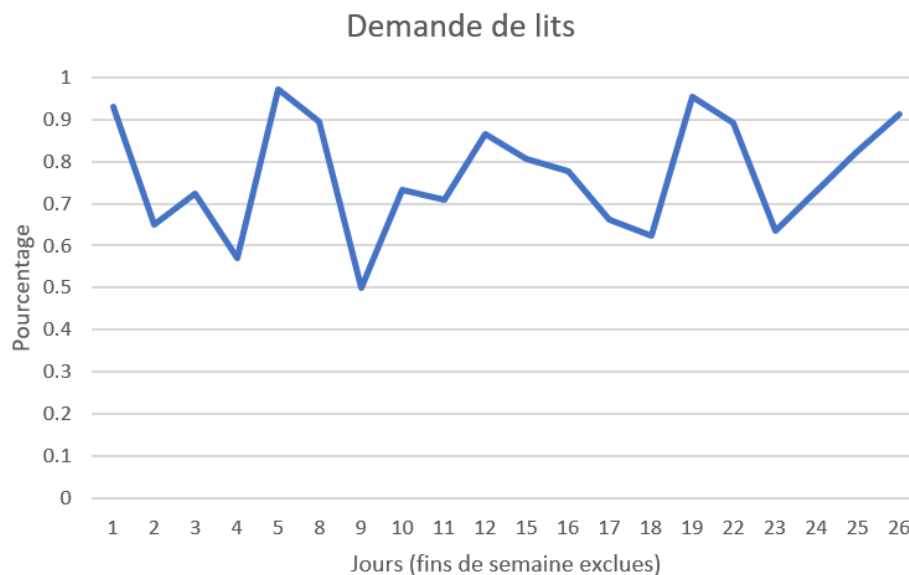


FIGURE 5.1 Fluctuation de la demande de lits pour le scénario 4 - Réservation.

Enfin, l'utilisation des lits peut quant à elle être étudiée à deux niveaux, soit à l'unité chirurgicale ainsi qu'aux soins intensifs. Si le passage d'un horizon de 28 jours à un horizon de 14 jours n'a pas de grand impact sur l'utilisation des lits de chirurgie, le nombre de lits occupés en moyenne aux soins intensifs connaît une considérable augmentation de 75%. L'objectif de maximisation de l'utilisation des lits implique évidemment que l'occupation augmente, ce qui est le cas pour l'unité chirurgicale avec une hausse d'environ 25% à partir du troisième scénario, sans pour autant que l'utilisation minimale ou maximale n'en soit grandement affectée. Il est à noter qu'aucune distinction entre les services n'est effectuée ici.

Parallèlement, les bornes de cette utilisation des lits à l'unité de soins intensifs sont grandement affectées, notamment par le cumul de l'intégration des lits, de la réservation ainsi que l'horizon de temps plus court. En moyenne près de la moitié des lits de soins intensifs occupés dans la semaine, occupation qui ne descend jamais sous le quart des lits et en arrive même à saturation à une seule occasion. Avec moins de priorités planifiables en raison de la réservation de salles et de l'horizon plus court, une plus grande proportion des priorités revient aux services avec une forte demande de lits, dont les patients sont aussi plus susceptibles d'utiliser des lits de soins intensifs. C'est particulièrement le cas de la chirurgie cardiaque, qui est très présente dans la planification malgré le faible nombre de patients présents sur la liste d'attente de ce service, et dont les patients représentent plus de la moitié des patients aux soins intensifs pour ce scénario.

TABLEAU 5.2 Tableau comparatif des priorités opératoires par semaine entre 5 scénarios

| Service   | 1 - Base 28 jours | 2 - Limitations additionnelles | 3 - Intégration des lits | 4 - Réservation | 5 - 14 jours |
|-----------|-------------------|--------------------------------|--------------------------|-----------------|--------------|
| CCARD     | 5,5               | 4,75                           | 5,75                     | 5,75            | 10           |
| CDIGE     | 24,25             | 25                             | 20,5                     | 17              | 14           |
| CHEPA     | 7,25              | 7,5                            | 7,25                     | 3,75            | 2            |
| CONCO     | 6,5               | 6,5                            | 5,5                      | 2,25            | 3            |
| CTHOR     | 2                 | 1,75                           | 4,5                      | 3,75            | 4            |
| CVASC     | 8                 | 8                              | 9,75                     | 8,25            | 8            |
| GRP       | 0,25              | 0,25                           | 0,5                      | 0,25            | 0,5          |
| CBMF      | 0                 | 0,25                           | 0,25                     | 0,25            | 0,5          |
| CPLAS     | 20                | 20                             | 12,5                     | 5,75            | 8            |
| GYNE      | 4,5               | 4,5                            | 6,5                      | 3,5             | 4            |
| GYON      | 0                 | 0,25                           | 0,5                      | 0,25            | 0,5          |
| NEURC     | 9,75              | 9,25                           | 14,25                    | 12,5            | 12           |
| OPHT      | 3,5               | 3,5                            | 0,25                     | 0,75            | 1            |
| ORL       | 20                | 20                             | 14,75                    | 16,25           | 16,5         |
| ORTH      | 7                 | 7,25                           | 11,25                    | 7,75            | 7,5          |
| UROL      | 6,75              | 6,5                            | 11,25                    | 9               | 7,5          |
| Réservées | 0                 | 0                              | 0                        | 28,25           | 29           |

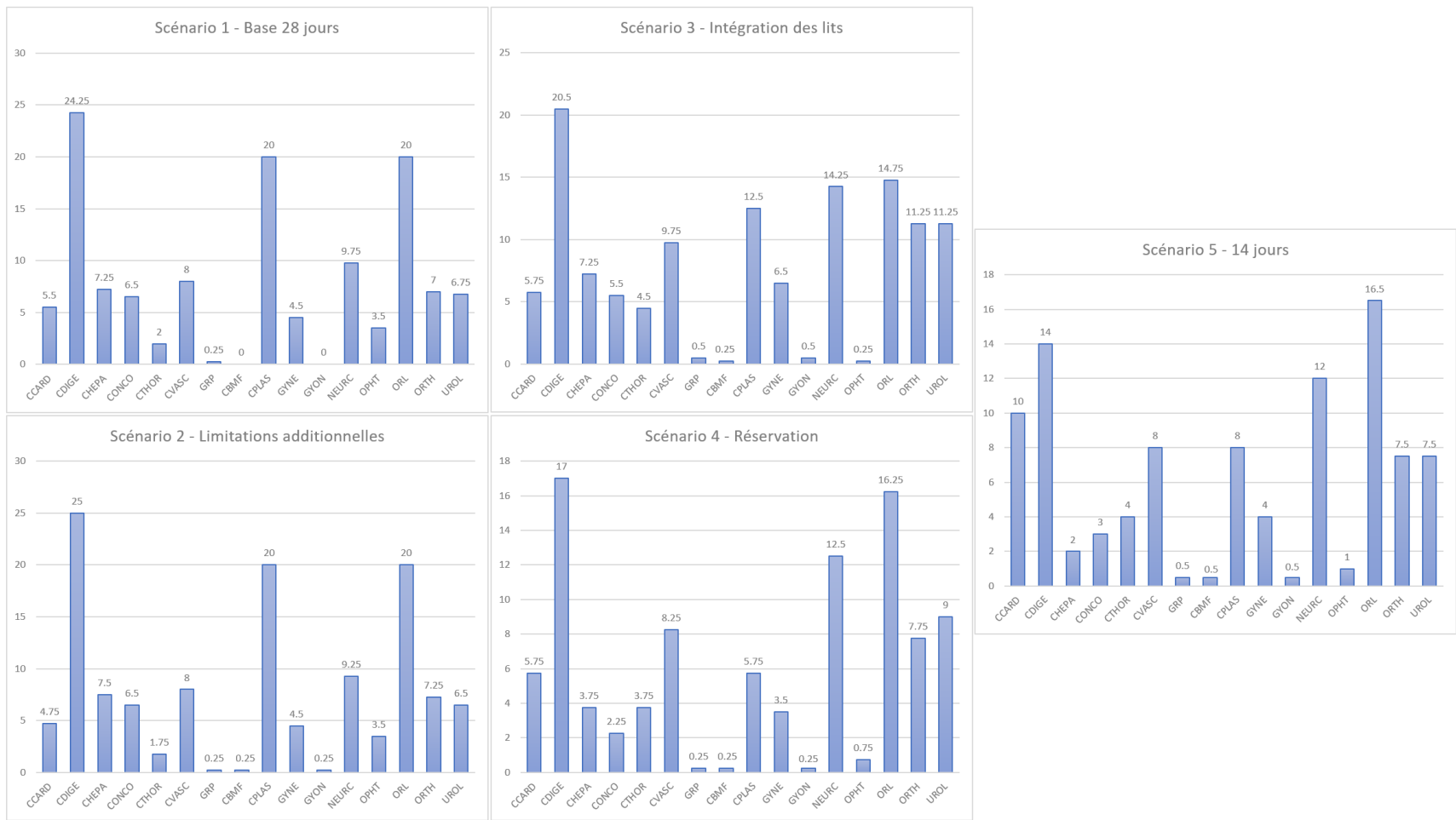


FIGURE 5.2 Histogrammes des priorités opératoires par semaine pour les 5 scénarios

Ce changement conséquent des priorités opératoires selon le scénario peut être observé dans le tableau 5.2 ou la figure 5.2. Les contraintes de lits ont limité la planification de services qui auraient eu plus de priorités opératoires en leur absence. Si c'est le cas pour la chirurgie plastique dont le nombre de priorités diminue tout en restant parmi les plus élevés, d'autres services comme la gynécologie se voient également restreints par le nombre de lits disponibles malgré l'augmentation dans leurs priorités par semaines. Il s'agit ici des résultats du troisième scénario. Les chutes dans le taux d'utilisation correspondent principalement aux fins de semaine, la chute étant plus sévère lorsque les durées de séjour sont courtes. Ces utilisations des lits par service sont compilées dans la figure 5.3.

Toujours en référence aux priorités opératoires présentées par le tableau 5.2, on remarque que si la plupart des services ont cédé des priorités à la réservation, ce n'est pas le cas pour tous. Du côté des chirurgies cardiaques, il s'agit là du service à l'importance bonifiée (par un poids deux fois plus élevé que les autres services), ce qui explique que le nombre de priorités n'ait pas changé. Aussi, la grande majorité des patients de chirurgie cardiaque utilisent des lits (près de 97%), ce qui en fait un service désirable pour un objectif de maximisation de l'utilisation des lits. D'autres services quant à eux voient leurs priorités opératoires augmenter, ce qui est notamment le cas de l'orthopédie. Il est difficile d'en expliquer la cause, mais nous pouvons nous attendre à un certain niveau de variation de la sorte pour maintenir le respect des contraintes d'écart. Aussi, il s'agit d'un service avec de longues durées de séjour et de longs temps d'attente, ce qui rend la planification intéressante pour les deux objectifs de maximisation.

Quant à la réduction de l'horizon de temps, qui passe de 28 à 14 jours, celle-ci se montre plus efficace pour planifier des services aux listes d'attente courtes, mais avec une forte proportion de patients hors liste. S'il n'était pas possible de planifier 10 salles de chirurgie cardiaque par semaine lorsque la planification se faisait sur un mois, par manque de patients sur la liste d'attente, cela devient désormais possible (ce qui reste inférieur aux 14 priorités par semaine qu'y accorde présentement le centre hospitalier).

Ainsi, restreindre le nombre de priorités programmables (par la réservation ou l'horizon) donne une plus grande importance aux temps d'attente longs et aux besoins en lits élevés. Cette importance est diluée par le potentiel manque de patients dans les listes d'attente lorsque le nombre de priorités programmables augmente. Intégrer le besoin en lits permet quant à lui de s'assurer que l'utilisation des lits est efficace, tout en assurant que la capacité aux unités ne sera pas dépassée, comme l'illustre la figure 5.3. En évitant la surcharge des lits de certains services, on évite d'avoir à déplacer des patients (dans le cas des lits l'unité chirurgicale) ou à annuler des chirurgies (dans le cas des lits des soins intensifs).



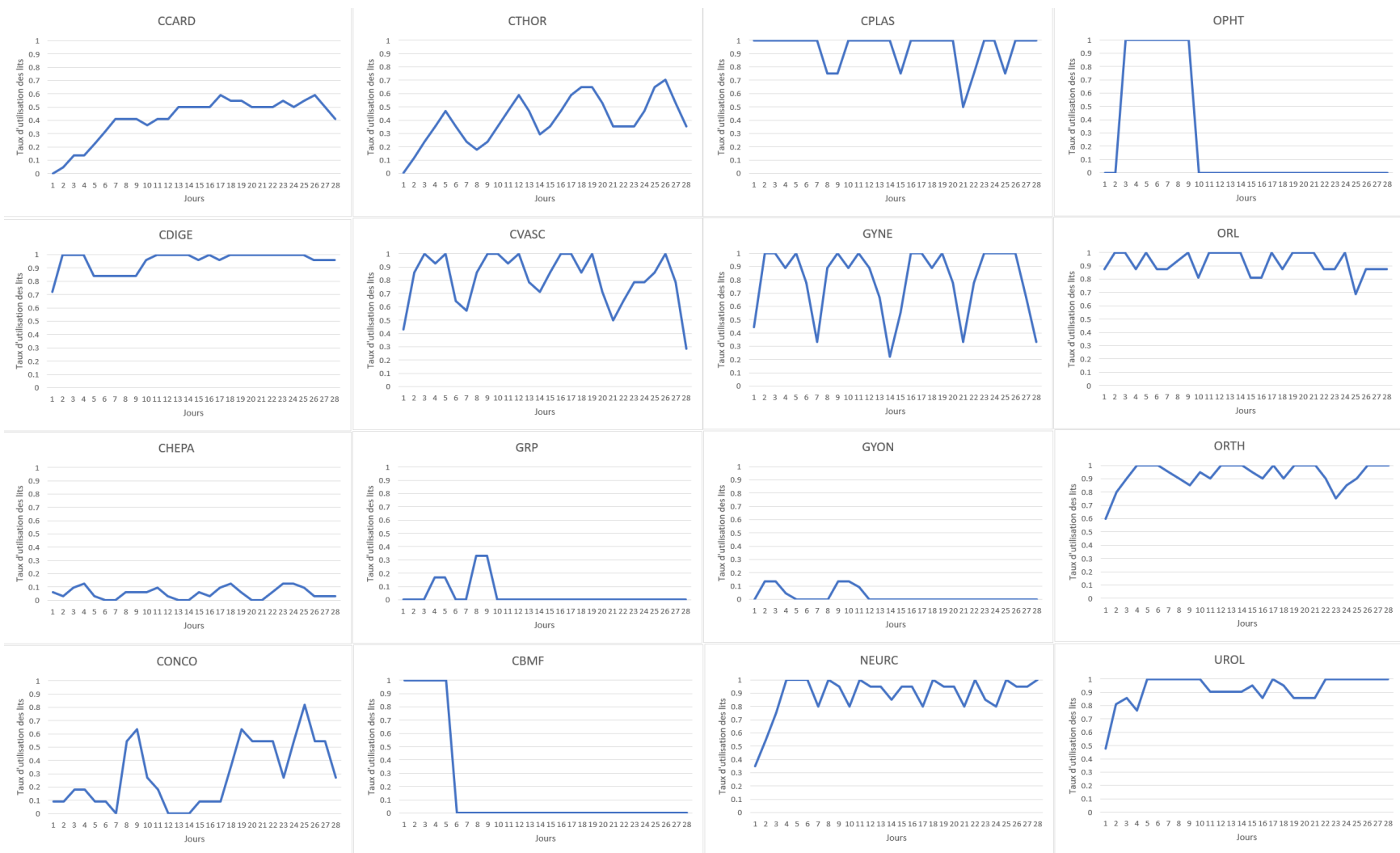


FIGURE 5.3 Utilisation des lits de tous les services pour le troisième scénario : Intégration des lits.

### 5.3 Comparaison avec le CHUM

Nous avons souhaité comparer notre solution correspondant au quatrième scénario (intégration des lits avec réservation sur 28 jours) aux priorités opératoires historiques du CHUM. Pour ce faire, nous avons extrait des données historiques une approximation du temps d'attente des patients et du taux d'utilisation des salles. Comme il est difficile de comparer les indicateurs de performance a priori de notre modèle avec ceux a posteriori des données historiques, nous avons dû émettre quelques hypothèses pour nous rapprocher de la planification a priori du CHUM. La comparaison de ces indicateurs de performance est présentée par le tableau 5.3.

Pour établir l'attente moyenne, nous avons échantillonné toutes les interventions chirurgicales électives ayant eu lieu entre le 7 janvier et le 3 février 2019 (ce qui correspond à l'horizon de notre solution). Nous avons également retiré les chirurgies avec un délai d'attente inférieur à 7 jours puisque celles-ci représentent majoritairement les urgences et semi-urgences. Selon le temps passé sur la liste d'attente, nous avons pu classer chaque patient dans l'une des 10 catégories d'attente.

En ce qui concerne le taux d'utilisation, nous n'avons considéré que les créneaux n'ayant accueilli que des chirurgies électives afin de nous rapprocher de la planification a priori du CHUM. Comme il existe trois horaires de salles possibles et que l'attribution de ces horaires n'est pas connue, nous avons utilisé la logique suivante afin de déterminer la longueur d'ouverture des salles :

1. Si la dernière intervention s'est terminée avant 16h05, il s'agit d'une salle courte.
2. Si la dernière intervention s'est terminée entre 16h05 et 17h20, il s'agit d'une salle moyenne.
3. Si la dernière intervention s'est terminée entre 17h20 et 18h40, il s'agit d'une salle longue.
4. Sinon, il s'agit d'un cas irrégulier (trop de temps supplémentaire) qui ne sera pas considéré.

Cette logique permet un temps supplémentaire de 20 minutes pour les salles courtes et moyennes, et de 40 minutes pour les salles longues. Si le taux d'utilisation d'une salle dépasse 100% à cause du temps supplémentaire, il est plafonné à 100%. Pour calculer ce taux d'utilisation, on divise le temps écoulé entre le début de la première intervention et la fin de la dernière intervention par la durée d'ouverture de la salle.

Nous constatons que notre solution réussit très bien à prioriser les patients ayant attendu le plus longtemps, avec une amélioration globale de 68,5%. Ce progrès est d'autant plus marqué

pour les patients qui obtiennent leur congé de l'hôpital avec une amélioration de 118,6% : puisque leurs interventions ne sont pas contraintes par la disponibilité des lits, le principal critère de sélection devient leur temps d'attente. Les patients qui auront besoin de lits sont plus difficiles à prioriser selon leur temps d'attente, mais notre modèle parvient tout de même à offrir de meilleurs résultats.

Notre solution offre également une amélioration du taux d'utilisation des salles, soit plus efficace d'un tiers. La grande majorité des salles dans notre planification atteignent un taux d'utilisation avoisinant 98% avec une faible variation entre salles planifiées, tandis ce taux varie beaucoup plus pour la situation présente du CHUM. Si la moyenne est très représentative pour notre solution, elle pourrait moins l'être pour le CHUM avec la présence de quelques salles très sous-utilisées, comme le montre le taux d'utilisation minimum de 9%. Cependant, même en nous référant à la médiane de l'utilisation des salles au CHUM, soit 79%, notre solution offrirait toujours une majoration de l'efficacité du bloc opératoire de 19 points de pourcentage, soit 1/4 de fois plus efficace. La sous-division de chaque service en classes nous permet de mieux considérer les différences entre les diagnostics, et ainsi de combiner des chirurgies longues avec des chirurgies plus courtes afin de mieux remplir les créneaux au bloc opératoire. La diminution du nombre de chirurgies planifiées dans notre solution s'explique par le fait que seulement 80% de la capacité est planifiée ainsi que par la stricte absence de temps supplémentaires. Aussi, aucun délai ou annulation n'est causé par un manque de lits.

TABLEAU 5.3 Tableau comparatif entre notre solution et la planification du CHUM

| Métrique                              | CHUM | Scénario 4 | Amélioration |
|---------------------------------------|------|------------|--------------|
| Nombre de chirurgies planifiées       | 1298 | 1009       | -22,2%       |
| Attente moyenne                       | 1,78 | 3,0        | 68,5%        |
| Attente moyenne - Lits                | 1,58 | 2,6        | 64,5%        |
| Attente moyenne - Congés              | 1,83 | 4,0        | 118,6%       |
| Taux moyen d'utilisation des salles   | 72%  | 98%        | 36,1%        |
| Taux d'utilisation des salles minimum | 9%   | 84%        |              |
| Taux d'utilisation des salles maximum | 100% | 100%       |              |

De plus, afin d'évaluer la performance de notre réservation pour accueillir les patients urgents, nous avons effectué une simulation de Monte-Carlo. Nous avons simulé sur 1000 répliques des arrivées aléatoires de patients urgents dont les profils ont été individuellement générés selon la fréquence des combinaisons possibles de services et classes. Ces urgences correspondent à des patients provenant du département des urgences et des patients électifs au temps d'attente inférieur à 24 heures. Nous avons utilisé les salles réservées du scénario 4, qui étaient toutes des salles courtes. Toutes les durées de chirurgies qui dépassent la durée d'ouverture

d'une salle courte ont été raccourcies pour éviter le temps supplémentaire. Les urgences ont été assignées aux salles selon leur ordre d'arrivée.

Notre algorithme pour l'affectation des patients urgents est le suivant :

---

**Algorithm 1** Algorithme d'affectation des patients urgents

---

```

J l'ensemble des jours
Uj l'ensemble des urgences arrivées le jour j
rj le nombre de salles réservées le jour j
duj la durée de chirurgie de l'urgence u arrivée le jour j
n ← 0
for each j ∈ J do
  s ← 1
  c ← 525
  if j ≠ 6, 7, 13, 14, 20, 21, 27, 28 then
    for each u ∈ Uj do
      if duj ≤ c then
        c ← c − duj
      else
        if s < rj then
          s ← S + 1
          c ← 525 − duj
        else
          n ← n + 1

```

---

Cet algorithme renvoie  $n$  le nombre de patients urgents qui n'ont pas pu être placés dans des salles réservées, soit  $n$  potentielles annulations. Bien que cet algorithme ait pour limite de ne pas maximiser l'utilisation des salles réservées, cette perte d'efficacité compense partiellement le fait que l'arrivée réelle des patients urgents n'est pas optimale contrairement aux patients électifs : des "trous" dans les créneaux sont à prévoir, en raison de l'arrivée aléatoire des patients. Comme nous ne connaissons pas la politique d'annulation du CHUM, nous supposons que lorsqu'une urgence se présente et que toutes les salles d'urgence sont pleines, alors un patient non prioritaire sera annulé ou les chirurgies d'une salle seront retardées afin d'insérer l'urgence.

Sur une 1000 répliquations, nous avons obtenu une moyenne 7,5 annulations potentielles suivant cette logique. Ce chiffre est 2,7 fois moins élevé que la moyenne mensuelle d'annulations causées par des urgences au CHUM, soit 20,25 annulations par mois. Ainsi, réserver 20% de la capacité permettrait de fortement diminuer le besoin d'annuler des chirurgies. Il est à souligner que la moyenne mensuelle d'annulations du CHUM sous-représente l'impact réel des urgences, et que celles-ci occasionnent également des délais ainsi que du temps supplémentaire. D'autres proportions de réservation peuvent également être envisagés, et l'ont été

au cours de tests préliminaire dans notre projet. Toutefois, nous avons trouvé que fixer ce niveau à un pourcentage sous-estimant la proportion d'urgences permet d'effectivement accueillir les patients urgents sans risquer de créer de trop grands "trous" dans l'utilisation du bloc opératoire, soit des salles réservées mais non-utilisées.

## CHAPITRE 6 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Ce projet d'optimisation des priorités opératoires nous a mené à étudier la planification au CHUM ainsi que l'historique des interventions chirurgicales et de l'occupation des lits. C'est en utilisant les caractéristiques du bloc opératoire, des patients et des unités que nous avons pu créer un modèle d'optimisation mathématique qui permette d'aider les gestionnaires dans la planification des priorités opératoires. Nous avons d'abord formulé un modèle qui répondait aux contraintes du bloc opératoire uniquement avec pour objectif de maximiser l'utilisation des salles et de prioriser les patients selon le temps attendu. Nous avons par la suite exploré quatre versions du modèle. La première offrait des limitations additionnelles pour faciliter l'adoption de la solution ainsi qu'en minimiser les changements au cours de l'horizon. La seconde intégrait la durée de séjour afin d'assurer le respect de la capacité des lits, tout en ajoutant une nouvelle dimension à l'objectif : la maximisation de l'utilisation des lits. La troisième offrait une piste de solution face à l'aléa des urgences, en réservant une partie de la capacité. Enfin, la dernière version consistait à réduire l'horizon de temps afin de mieux représenter les patients semi-urgents.

Les résultats obtenus démontrent qu'il est possible de mieux programmer les patients ayant passé le plus de temps sur la liste d'attente. C'est particulièrement le cas pour les patients les moins restreints par la disponibilité des lits, soit les patients pouvant obtenir congé le jour même de leur chirurgie. Nous montrons également que notre modèle permet une meilleure utilisation des salles, ce que favorise notre partitionnement des diagnostics en classes pour chaque service.

L'utilisation de notre modèle implique alors de ne l'utiliser pour programmer que 80% des salles au moment de la planification des priorités opératoires. La solution obtenue s'accompagne d'une recommandation quotidienne de la demande de lits à respecter lors de l'allocation des patients. Nous suggérons que le 20% restant soit programmé manuellement pour accueillir les patients urgents ainsi que les semi-urgences. Si notre modèle permet une programmation sur un horizon de 28 jours, nous encourageons également la considération d'un horizon de 14 jours qui aurait pour bénéfice de mieux représenter les services les plus touchés par la présence de patients prioritaires tels que ceux de la chirurgie cardiaque.

## RÉFÉRENCES

- [1] A. Macario *et al.*, “Where are the costs in perioperative care? : Analysis of hospital costs and charges for inpatient surgical care,” *Anesthesiology*, vol. 83, p. 1138–1144, déc. 1995. [En ligne]. Disponible : <https://pubs.asahq.org/anesthesiology/article/83/6/1138/49/Where-Are-the-Costs-in-Perioperative-Care-Analysis>
- [2] B. Denton, J. Viapiano et A. Vogl, “Optimization of surgery sequencing and scheduling decisions under uncertainty,” *Health Care Management Science*, vol. 10, p. 13–24, déc. 2007. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1007/s10729-006-9005-4>
- [3] M. A. Kamran *et al.*, “Adaptive operating rooms planning and scheduling : A rolling horizon approach,” *Operations Research for Health Care*, vol. 22, 100200, sept. 2019. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2211692318301565>
- [4] M. Samudra *et al.*, “Scheduling operating rooms : achievements, challenges and pitfalls.” *J Sched*, vol. 19, p. 493–525, sept. 2016. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1007/s10951-016-0489-6>
- [5] I. Rahimi et A. H. Gandomi, “A comprehensive review and analysis of operating room and surgery scheduling,” *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 28, p. 1667–1688, mai 2021. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1007/s11831-020-09432-2>
- [6] S. Makboul *et al.*, “A two-stage robust optimization approach for the master surgical schedule problem under uncertainty considering downstream resources,” *Health Care Management Science*, vol. 25, p. 63–88, août 2022. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1007/s10729-021-09572-2>
- [7] J. M. van Oostrum, E. Bredenhoff et E. W. Hans, “Suitability and managerial implications of a master surgical scheduling approach,” *Annals of Operations Research*, vol. 178, p. 91–104, juill. 2010. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1007/s10479-009-0619-z>
- [8] F. Guerriero et R. Guido, “Operational research in the management of the operating theatre : a survey,” *Health Care Management Science*, vol. 14, p. 89–114, mars 2011. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1007/s10729-010-9143-6>
- [9] B. Cardoen, E. Demeulemeester et J. Beliën, “Operating room planning and scheduling : A literature review,” *European Journal of Operational Research*, vol. 201, n°. 3, p.

- 921–932, mars 2010. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377221709002616>
- [10] J. T. Blake et J. Donald, “Mount sinai hospital uses integer programming to allocate operating room time,” *Interfaces*, vol. 32, n<sup>o</sup>. 2, p. 63–73, janv. 2002. [En ligne]. Disponible : [https://www.researchgate.net/publication/228762348\\_Mount\\_Sinai\\_Hospital\\_Uses\\_Integer\\_Programming\\_to\\_Allocate\\_Operating\\_Room\\_Time](https://www.researchgate.net/publication/228762348_Mount_Sinai_Hospital_Uses_Integer_Programming_to_Allocate_Operating_Room_Time)
- [11] A. Testi *et al.*, “Prioritizing surgical waiting lists,” *Journal of Evaluation in Clinical Practice*, vol. 14, n<sup>o</sup>. 1, p. 59–64, févr. 2008. [En ligne]. Disponible : <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18211645/>
- [12] P. Santibáñez, M. Begen et D. Atkins, “Surgical block scheduling in a system of hospitals : an application to resource and wait list management in a british columbia health authority,” *Health Care Management Science*, vol. 10, p. 269–282, sept. 2007. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1007/s10729-007-9019-6>
- [13] J. M. van Oostrum *et al.*, “Surgical block scheduling in a system of hospitals : an application to resource and wait list management in a british columbia health authority,” *OR Spectrum*, vol. 30, p. 355–374, avr. 2008. [En ligne]. Disponible : <https://link.springer.com/article/10.1007/s00291-006-0068-x>
- [14] A. Fügener, “An integrated strategic and tactical master surgery scheduling approach with stochastic resource demand,” *Journal of Business Logistics*, vol. 36, n<sup>o</sup>. 4, p. 374–387, déc. 2015. [En ligne]. Disponible : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jbl.12105>
- [15] R. M’Hallah et F. Visintin, “A stochastic model for scheduling elective surgeries in a cyclic master surgical schedule,” *Computers Industrial Engineering*, vol. 129, p. 156–168, mars 2015. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036083521930035X>
- [16] A. Augustin, “Ordonnancement de bloc opératoire avec intégration des soins intensifs,” mémoire de maîtrise, Département de mathématiques et de génie industriel, École Polytechnique de Montréal, Montréal, QC, 2017. [En ligne]. Disponible : <https://publications.polymtl.ca/2677/>
- [17] C. V. Riet et E. Demeulemeester, “Trade-offs in operating room planning for electives and emergencies : A review,” *Operations Research for Health Care*, vol. 7, p. 52–69, janv. 2015. [En ligne]. Disponible : [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=2553849](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2553849)



- [18] D. Duma et R. Aringhieri, “Trade-offs in operating room planning for electives and emergencies : A review,” *Omega*, vol. 83, p. 199–212, mars 2019. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305048317305959>
- [19] A. Jebali et A. Diabat, “A chance-constrained operating room planning with elective and emergency cases under downstream capacity constraints,” *Computers Industrial Engineering*, vol. 114, p. 329–344, déc. 2017. [En ligne]. Disponible : <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360835217303170>
- [20] P. Virtanen *et al.*, “SciPy 1.0 : Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python,” *Nature Methods*, vol. 17, p. 261–272, 2020.